



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CIUDAD HIDALGO (1610), ESTADO DE
MICHOACÁN**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. GENERALIDADES..... | 2 |
| Antecedentes | 2 |
| 1.1. Localización..... | 2 |
| 1.2. Situación administrativa del acuífero..... | 4 |
| 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD | 5 |
| 3. FISIOGRAFÍA..... | 5 |
| 3.1 Provincia fisiográfica | 5 |
| 3.2 Clima | 6 |
| 3.3 Hidrografía..... | 6 |
| 3.4 Geomorfología..... | 6 |
| 4. GEOLOGÍA..... | 6 |
| 4.1 Estratigrafía..... | 7 |
| 4.2 Geología estructural | 11 |
| 4.3 Geología del subsuelo..... | 11 |
| 5. HIDROGEOLOGÍA..... | 12 |
| 5.1 Tipo de acuífero..... | 12 |
| 5.2 Parámetros hidráulicos | 12 |
| 5.3 Piezometría..... | 13 |
| 5.4 Comportamiento hidráulico..... | 13 |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático..... | 13 |
| 5.4.2 Elevación del nivel estático..... | 14 |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático | 16 |
| 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea | 16 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA | 16 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS | 17 |
| 7.1 Entradas..... | 18 |
| 7.1.1 Recarga vertical (Rv)..... | 18 |
| 7.1.2 Recarga inducida (Ri) | 19 |
| 7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)..... | 19 |
| 7.2 Salidas | 20 |
| 7.2.1 Extracción por bombeo (B)..... | 20 |
| 7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) | 20 |
| 7.2.3. Descarga por manantiales (Dm) | 21 |
| 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) | 21 |
| 8. DISPONIBILIDAD | 22 |
| 8.1 Recarga total media anual (R)..... | 22 |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)..... | 23 |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)..... | 23 |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 23 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 25 |

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 Ciudad Hidalgo –Tuxpan, definido con clave 1610 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza a la porción oriente del estado de Michoacán, entre los paralelos 19°49'24.96" y 19°14',59.64" de latitud norte y los meridianos 100°13'4.80" y 100°48'50.40" de longitud oeste. Tiene una superficie aproximada de 2,100km². Colinda al noroeste con el acuífero Morelia-Queréndaro, al este con Huetamo, al norte y noreste con Maravatío-Contepec-E. Huerta en el estado de Michoacán; al este con Ixtlahuaca-Atlacomulco, al sur y sureste con Villa Victoria-Valle de Bravo en el estado de México (figura 1).

Geopolíticamente abarca los municipios Angangueo, Áporo, Tuxpan y Jungapeo y parcialmente los municipios de Hidalgo, Tuzantla, Ocampo, Irimbo, Zitácuaro, Juárez, Zinapécuaro y Senguio.

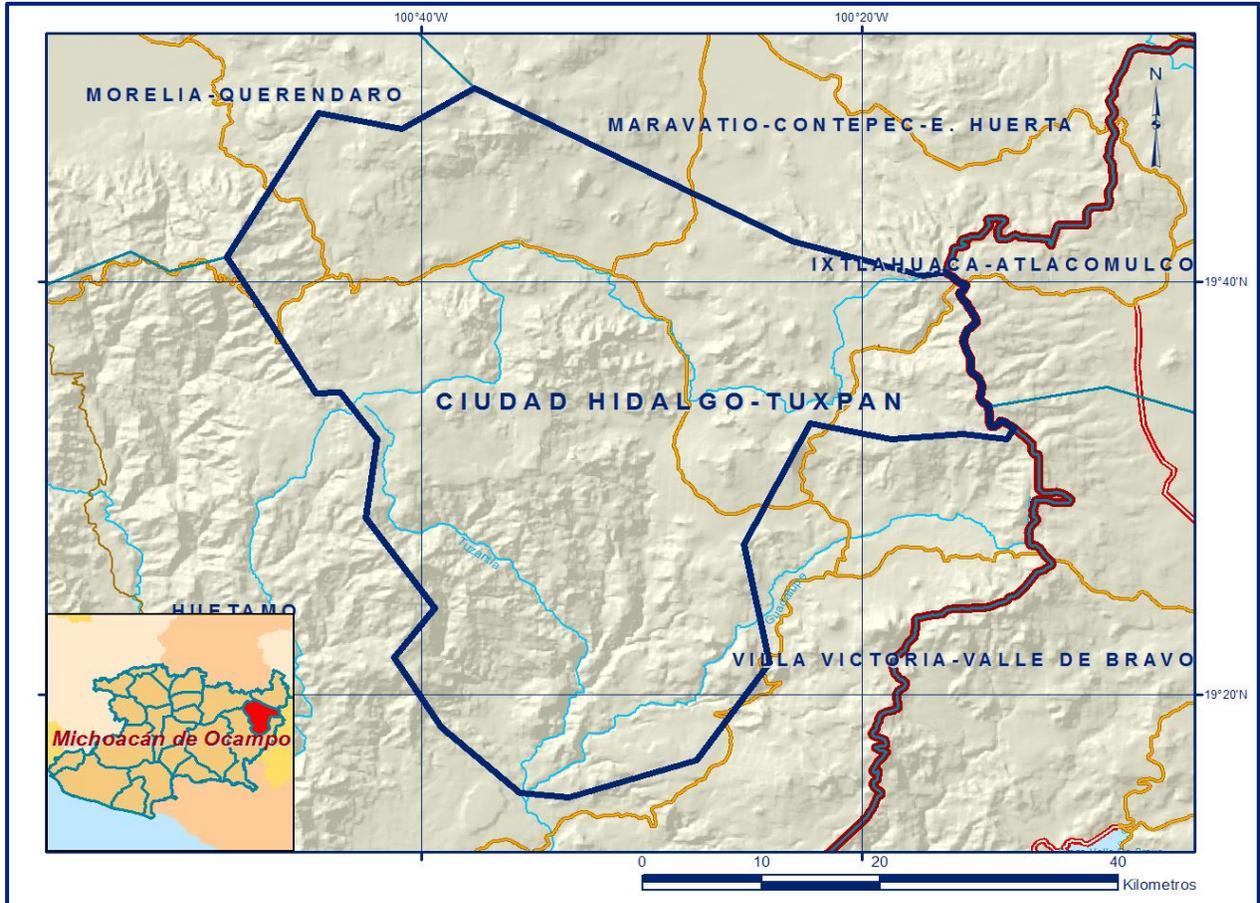


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

| ACUIFERO 1610 CIUDAD HIDALGO-TUXPAN | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|----------------------------------|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | | OBSERVACIONES |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | |
| 1 | 100 | 37 | 36.9 | 19 | 49 | 25.0 | |
| 2 | 100 | 23 | 11.3 | 19 | 41 | 59.7 | |
| 3 | 100 | 17 | 16.1 | 19 | 40 | 19.4 | |
| 4 | 100 | 16 | 10.5 | 19 | 40 | 30.1 | DEL 4 AL 5 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 5 | 100 | 14 | 15.6 | 19 | 33 | 57.6 | DEL 5 AL 6 POR EL LIMITE ESTATAL |
| 6 | 100 | 13 | 6.3 | 19 | 32 | 56.2 | |
| 7 | 100 | 13 | 27.6 | 19 | 32 | 23.0 | |
| 8 | 100 | 15 | 26.4 | 19 | 32 | 39.0 | |
| 9 | 100 | 18 | 39.8 | 19 | 32 | 22.7 | |
| 10 | 100 | 22 | 21.9 | 19 | 33 | 8.1 | |
| 11 | 100 | 25 | 21.8 | 19 | 27 | 15.9 | |
| 12 | 100 | 24 | 11.9 | 19 | 21 | 30.3 | |
| 13 | 100 | 27 | 32.0 | 19 | 16 | 47.1 | |
| 14 | 100 | 33 | 18.4 | 19 | 14 | 59.5 | |
| 15 | 100 | 35 | 33.0 | 19 | 15 | 13.7 | |
| 16 | 100 | 39 | 7.2 | 19 | 18 | 23.4 | |
| 17 | 100 | 41 | 15.1 | 19 | 21 | 46.3 | |
| 18 | 100 | 39 | 24.7 | 19 | 24 | 10.7 | |
| 19 | 100 | 42 | 32.1 | 19 | 28 | 32.5 | |
| 20 | 100 | 42 | 1.3 | 19 | 32 | 23.4 | |
| 21 | 100 | 43 | 40.2 | 19 | 34 | 39.1 | |
| 22 | 100 | 44 | 48.2 | 19 | 34 | 35.9 | |
| 23 | 100 | 46 | 54.9 | 19 | 38 | 7.0 | |
| 24 | 100 | 48 | 50.0 | 19 | 41 | 12.7 | |
| 25 | 100 | 44 | 39.5 | 19 | 48 | 13.4 | |
| 26 | 100 | 40 | 53.0 | 19 | 47 | 26.3 | |
| 1 | 100 | 37 | 36.9 | 19 | 49 | 25.0 | |

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan pertenece al Organismo de Cuenca Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Michoacán.

El territorio del acuífero está sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda; en la parte noroeste por el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de los terrenos que ocupa y circunda la Laguna de Los Azufres, en el Estado de Michoacán”*, publicado en el Diario Oficial (DOF) el 13 de febrero de 1956.

Esta veda se clasifica como tipo III que permiten e extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. En la parte centro y sur por el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona del Bajo Balsas, estableciéndose veda por tiempo indefinido”*, publicado en el Diario Oficial (DOF) el 27 de junio de 1975.

Y el resto del acuífero por el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos, y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los Municipios”*, publicado en el Diario Oficial (DOF) el 20 de octubre de 1987.

Ambas vedas se clasifican como tipo II que 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 I. El principal usuario es el agrícola. En la región noreste de su territorio se encuentra una porción del Distrito de Riego 045 Tuxpan y a la fecha no existe Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Los estudios realizados en la zona son escasos. Algunos lo han cubierto de manera parcial y otros lo incluyen en estudios regionales. A continuación, se mencionan los estudios hidrogeológicos de evaluación:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS AZUFRES-CUITZEO, ESTADO DE MICHOACÁN. Realizado por CFE, en 1985, En donde se censaron 368 aprovechamientos de agua subterránea, correspondientes a 182 pozos, 50 norias, 103 manantiales, 26 fuentes termales y 7 arroyos.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO EN LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE ATLIXCO-IZÚCAR DE MATAMOROS, PUEBLA, CIUDAD HIDALGO-TUXPAN Y HUETAMO, MICHOACÁN. Elaborado por Gondwana Exploraciones S.C, para la Comisión Nacional del Agua, en 2003. Señala el muestrearon 18 pozos profundos para establecer la red de monitoreo.

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 de provincias fisiográficas del INEGI (1997), el acuífero se ubica dentro de las provincias del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur. Donde al norte se halla la subprovincia Mil Cumbres y en tanto las porciones del centro y sur pertenecen a la subprovincia de la Depresión del Balsas. El conjunto de sierras y valles que integran las subprovincias de la depresión del Balsas Pertenece a la Sierra Madre del Sur, y se caracteriza en los márgenes del río Balsas y Mil Cumbres correspondiente al Eje Neovolcánico, es relativamente de poca extensión y el paisaje que identifica corresponde a un valle formado por bosques y sierras volcánicas además del río Lerma y la Presa Solís.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García para las condiciones de la República Mexicana, el tipo de climas predominantes en la zona son tres: en una pequeña franja de la región sur es de tipo Cb'(w2) que es Semifrío subhúmedo, mientras que hacia la zona centro y oriente predomina el tipo C(w2) templado subhúmedo y la región norte el tipo (A)C(w1) semicálidos subhúmedos.

Se analizó la información de ocho estaciones climatológicas, y se estimó una temperatura media anual entre 12° C a 18° C. Los meses más calurosos se presentan en abril y mayo, La precipitación media anual es de 790 a 1420 mm/año. En este acuífero entre el periodo de lluvias se presenta en los meses de julio a septiembre con un promedio de 175 mm/mes; la evaporación potencial media anual es de 1582 mm/año.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 18 Río Balsas; el acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan, cuenta con un gran número de corrientes tanto intermitentes como perennes, sus principales corrientes de agua son del Río Balsas y del Río Tuxpan que en su recorrido se le unen los arroyos Chiquito, Aguacate y San Lorenzo, además en su territorio se localiza la presa de San Lorenzo.

3.4 Geomorfología

Dentro de la zona se distinguen tres rasgos geomorfológicos que la integran la unidad de sierras volcánicas con forma de domos y drenajes detríticos, subparalelos y radiales. La unidad de lomeríos y mesetas alargadas, donde sus direcciones predominantes de drenaje son detríticas y subparalelo a unidad del valle Ciudad Hidalgo-Tuxpan.

4. GEOLOGÍA

En el área se manifiestan un vulcanismo del periodo neógeno, caracterizado por rocas ígneas extrusivas predominando basaltos, brechas volcánicas y material vulcanoclástico de composición andesítica, dacítica y riolítica. Sobre ellas descansan rocas de tipo aluvial y areniscas-conglomeráticas de edad cuaternaria.

Cerca del noreste aflora una secuencia de roca metasedimentaria del periodo mesozoico intercalada con rocas vulcanoclásticas, tobas y basalto del cenozoico en el que subyace roca de tipo conglomerado.

En la región sur del acuífero afloran calizas del cretácico intercaladas con metavolcánicas, basaltos, dacitas y brechas en ellas se superponen rocas de tipo conglomerado y Arenisca conglomerática. La distribución de las distintas unidades litológicas se muestra en la figura 2.

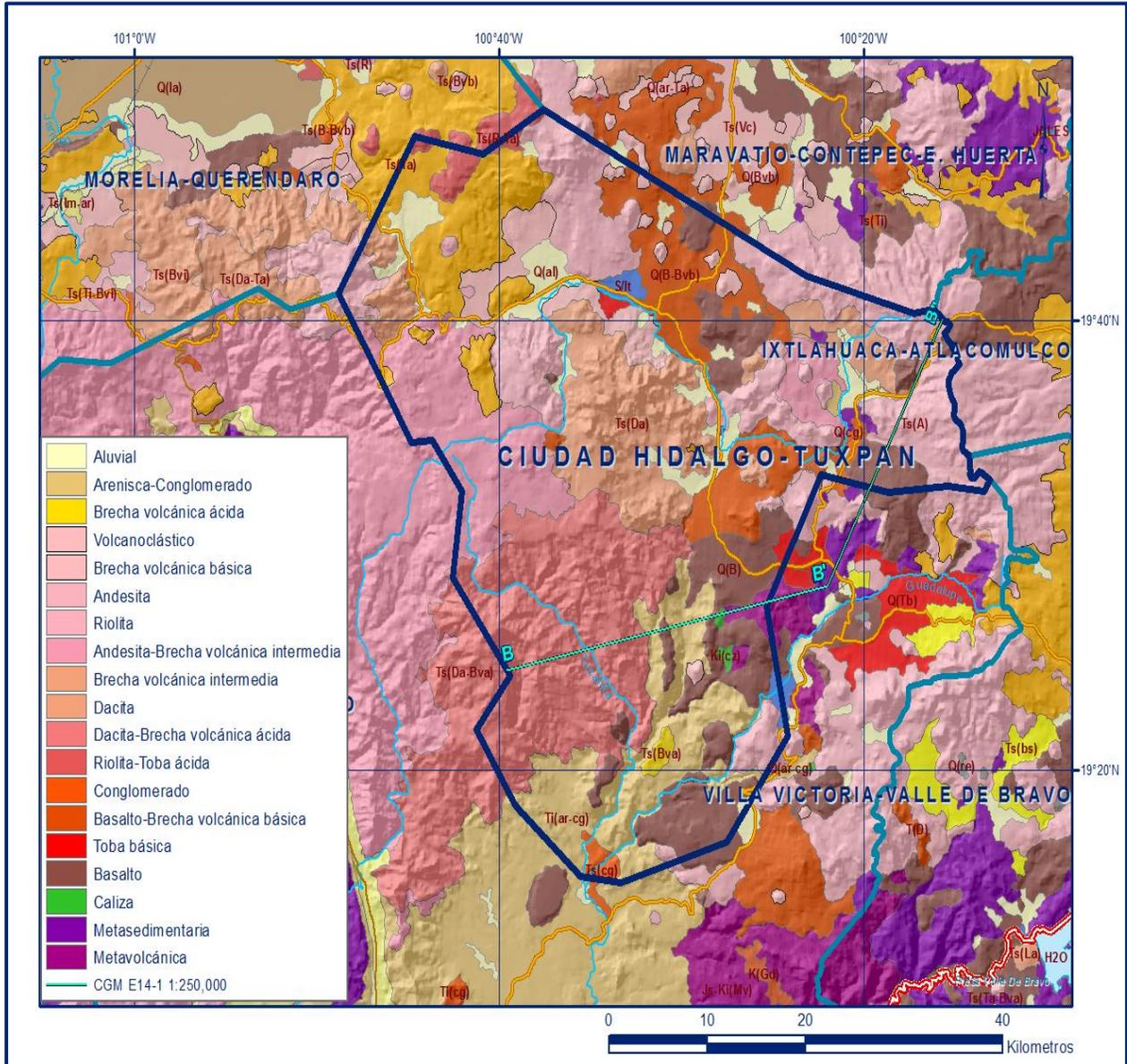


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En la región que cubre el acuífero afloran rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas cuyo registro estratigráfico comprende del jurasico superior al reciente. A continuación, se describen las distintas unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente.

reciente.

Formación Villa Ayala (Ji-Ki (Mv, Ms)

En el noreste y sureste del acuífero, comprende la unidad estratigráfica más antigua que data del jurasico superior y cretácico inferior.

La unidad consiste en una secuencia de rocas volcánicas con un bajo grado de metamorfismo, corresponden a coladas de lava de composición basáltica y andesítica, con horizontes de arenas volcánicas interestratificadas con bioclastos de caliza las cuales fueron afectados por un metamorfismo de bajo grado (González P. y et. al, 2001).

Este afloramiento se caracteriza por su facies de esquisto verde interestratificada con material vulcanoclásticos pertenecientes a un arco volcánico del periodo jurásico superior y cretácico inferior.

Formación Mal Paso

Sobreyaciendo al complejo metamórfico Villa Ayala se observa un grupo reducido de roca cretácica constituido por Secuencia de rocas calcarías concordantes a la formación San Lucas, definiéndose en dos miembros:

El primer miembro se integra por una secuencia de rocas clásticas de arenas líticas y cuarzo-feldespáticas con fragmentos de roca metamórfica y vulcanoclásticas, sus espesores son reducidos a medios, en la parte superior del miembro se observan lenticulas de caliza intercalándose con areniscas, limolitas y lutitas.

El segundo miembro se asocia a una secuencia de intercalaciones de caliza arcillosa con bancos de lutita y arenisca.

Grupo Balsas

Los materiales que componen a esta unidad, difícilmente guardan una continuidad, es decir las variaciones litológicas son muy variables debido a los diferentes ambientes de depósito.

Las rocas del terciario se encuentran en abundancia y es una de las unidades estratigráficas está compuesto por depósitos continentales en la región de la cuenca del río Balsas en la región sur del acuífero las rocas están constituidas de conglomerado de color rojizo.

Hacia la base de la unidad se presenta un material vulcanoclásticos de composición andesítica que se distingue por los flujos piroclásticos de la zona y las cuales se intercalan con brechas volcánicas. Sobreponiéndose a las rocas vulcanoclásticas se observan estratos de arenisca conglomerática de color crema a rojiza.

Grupo Balsas

La unidad Balsas está constituida por depósitos continentales del terciario, que se distribuye en la región central y sur del acuífero, cerca del río balsas, el tipo de roca que aflora de esta unidad es un paquete de conglomerados calcaríos soportados por una matriz arcillosa a arenosa de color rojizo y de estratificación masiva, en la base de la unidad se presenta material piroclástico de composición andesítica, intercalado con brechas volcánicas del terciario.

Andesita Mil Cumbres

Esta unidad del periodo terciario aflora en la región del Tzitzio y se considera el basamento natural cubierto de rocas volcánicas que se extiende hasta la región de los Azufres (Demant, 1976). Está constituido por andesitas, dacitas e ignimbritas intercaladas con depósitos sedimentarios continentales y en menor proporción rocas ácidas, basaltos y flujos piroclásticos, la cima de la unidad se observan rocas de tipo ígneo extrusivo, y andesita acida (Dobson, 1985).

Las lavas andesíticas afloran en la zona norte y sur del campo, presentan aspecto aglomerático, brechoide y de lahamiento de color gris oscuro al fresco; son muy compactas y textura afanítica. Las rocas de esta formación son alteradas por procesos hidrotermales y en esta unidad se localiza el yacimiento geotérmico de los azufres.

Riolita Agua Fría

Es una serie de domos de lava y flujos fragmentados de Riolita del terciario, de tonalidad gris-azul con bandas de flujo y esférulas bien desarrolladas afectada hidrotermalmente por el yacimiento geotérmico de los azufres, provocando grandes zonas de caolinización y silicificación. Comportándose como capa sello del yacimiento.

Dacita Tejamaniles

En la región centro y suroeste se observan rocas intrusivas de tipo dacítica, formadas por domos como el Cerro Las Humaredas.

Estas rocas afloran discordantemente sobre las Riolitas Agua Fría, con textura porfídica afectadas intensamente por alteración hidrotermal.

Otro de los afloramientos de litología dacítica es el Cerro el Mozo la cual sobreyace en discordancia con la riolita Agua Fría, Este domo se alinea hacia el NW con otros domos como, El Cerro de San Andrés que es de la misma composición y de color gris oscuro a azul grisáceo.

Riolita La Yerbabuena

Esta unidad es una secuencia de riolitas con alto contenido en sílice y Riodacitas con una matriz pumicítica. Estas rocas sobrepuestas discordantemente a las Andesitas Mil Cumbres.

La formación fue una fase explosiva que dejó como evidencia una serie de depósitos piroclásticos de flujo y de caída libre con una amplia distribución en la zona del acuífero.

Tobas

Esta secuencia de tobas se encuentra constituida por material piroclástico no consolidado; compuesto por fragmentos de riolita fluidal, pómez y obsidiana; resaltan los fragmentos de andesita cementados por una matriz pumicítica.

Se presentan en la parte centro-occidente de los Azufres, son de origen explosivo. Depositados por la última fase explosiva de los domos riolíticos

Basaltos

Esta unidad se caracteriza por su estructura cónica que se encuentran a lo largo de la región sureste. Representan un episodio volcánico y tectónico más reciente de la zona, están constituidas por coladas de lava de composición basáltica y escasos depósitos piroclásticos, los cuales son paquetes de ceniza hasta bloques que contienen bombas piroclásticas.

Complejos de domos Tuxpan

Al Oeste y Noroeste de Tuxpan se elevan abruptamente domos y conos con lavas intermedias y ácidas y tobas pumicíticas. Se estima que este complejo está sobrepuesto a los basaltos, probablemente presentan los derrames de una sola

cámara magmática local de composición intermedia a ácida.

Suelos y Aluviones

El material que constituye esta unidad presenta espesores muy delgados de roca sedimentaria de tipo aluvión, como producto de depósitos recientes de rocas preexistentes debida erosión de las fuentes cercanas.

4.2 Geología estructural

La Faja Volcánica Transmexicana se originó en los periodos geológicos del cretácico, se subdivide en tres arcos grandes, el cual cruza por un sistema menor del arco Tarasco-Oaxaca-Chiapas, donde se desprende un sistema menor de fracturamiento. El área del acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan y en la zona geotérmica de los Azufres esta surcada al mismo tiempo por las fracturas y fallas profundas que corren al NNE.

Presenta un fracturamiento en cruz que refleja un doble control tectónico para los centros eruptivos: i) el alineamiento de los centros volcánicos en hileras, se visualizan al sureste y al sur- suroeste, ii) por otra parte la distribución de las calderas, que obedecen a un arreglo general dispuesto en dirección sur- suroeste y norte-noreste.

La zona de Ciudad Hidalgo-Tuxpan y la caldera de los Azufres se enmarcan en un sistema de pilares y fosas tectónicas producidos por una serie de fallas escalonadas. Estas estructuras presentan tres tipos de fallamiento.

El primero sólo se presenta en la zona norte, que afecta a las andesitas del Mioceno; el segundo sistema presenta una dirección NE-SW, afectando a las Andesitas Mil Cumbres, así como a las Riolitas Agua Fría y paralelamente a estas estructuras se presenta el tercer sistema de fallas con orientación E-W, que es el más reciente e importante dentro del campo Geotérmico.

Las rocas andesíticas son cortadas por las fallas y fracturas representan zonas de alta conductividad hidráulica. También la manera en que se distribuyen los materiales de alteración hidrotermal, indica una posible geometría dómica dentro del yacimiento; el cual consiste en rocas fracturadas tanto en la zona norte como en la zona sur.

4.3 Geología del subsuelo

Con base a la información geológica y geofísica recabada, es posible definir los espesores y la geometría del subsuelo del acuífero. Con base en los valores de

resistividad obtenidos se definieron las características de los materiales identificados en el subsuelo que se presentan en la tabla 2. De acuerdo con las resistividades obtenidas y las características de los materiales del subsuelo se definieron 3 unidades:

Unidad Impermeable: formada por rocas ígneas intrusivas masivas, tobas líticas y material arcilloso, las rocas ígneas de composición masiva constituyen parte del basamento dentro del acuífero.

Unidad semipermeable: está constituida por rocas volcánicas poco fracturadas, material limo – arcilloso y tobas líticas de baja permeabilidad, presenta un espesor aproximado de 200 m.

Unidad permeable: está constituida por materiales granulares poco compactos de granulometría variada, El material varía de grueso a medio y se presenta saturado; material de tipo volcánico muy fracturado y muy característico como basaltos y andesitas. Esta unidad presenta un espesor que va de 100 a 350 m en promedio. Dentro de esta unidad están localizadas la mayoría de las captaciones perforadas.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero presenta condiciones hidráulicas de tipo libre, emplazado en depósitos de volcánicos de lahares y materiales piroclásticos, derivados de explosiones volcánicas, sin embargo, las rocas sedimentarias junto con los derrames de lavas intermedias y básicas presentan un intenso fracturamiento secundario, que aún no ha sido explotada.

Esta es la unidad hidrogeológica de mayor importancia dentro del área de explotación, ya que en ella se encuentran ubicados los aprovechamientos de agua subterránea. Está constituida por depósitos de fragmentos que se han acumulado por la acción de la gravedad y la sobresaturación de agua. Su granulometría varía de fina a gruesa, predominando esta última, al igual que los materiales aluviales.

Tanto los depósitos volcánicos como los aluviales, presentan un alto grado de porosidad y permeabilidad. El flujo a través de los poros está restringido debido a la poca distribución de los depósitos granulares en el acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo con la interpretación de 15 pruebas de bombeo, tanto en su etapa de abatimiento y de recuperación, en la porción norte y noreste del acuífero, los valores

de transmisividad varían de $0.066 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ a $23.94 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, en promedio **$5.689 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** y coeficiente de almacenamiento de 0.0178.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible para 2003 y 2007.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En 2003 la profundidad del nivel estático variaba de 0.90 m a 126 m los valores máximos se presentan hacia la porción noroeste de Ciudad Hidalgo y las profundidades van descendiendo de forma gradual hacia el sureste cercano a la comunidad Los Marzos ahí las profundidades se encuentran entre 10 y 50 m, al igual que en la localidad de San Miguel el Alto.

En 2007 la profundidad al nivel estático es de 0 m en los manantiales y de 1 a 125 m en las norias y pozos; las mayores profundidades se presentan en la porción norte del acuífero, cerca de Ciudad Hidalgo.

En la comunidad Lázaro Cárdenas se presentan profundidades que van de 30 a 60 m, el resto de la zona presenta valores por debajo de los 30 m (figura 3).

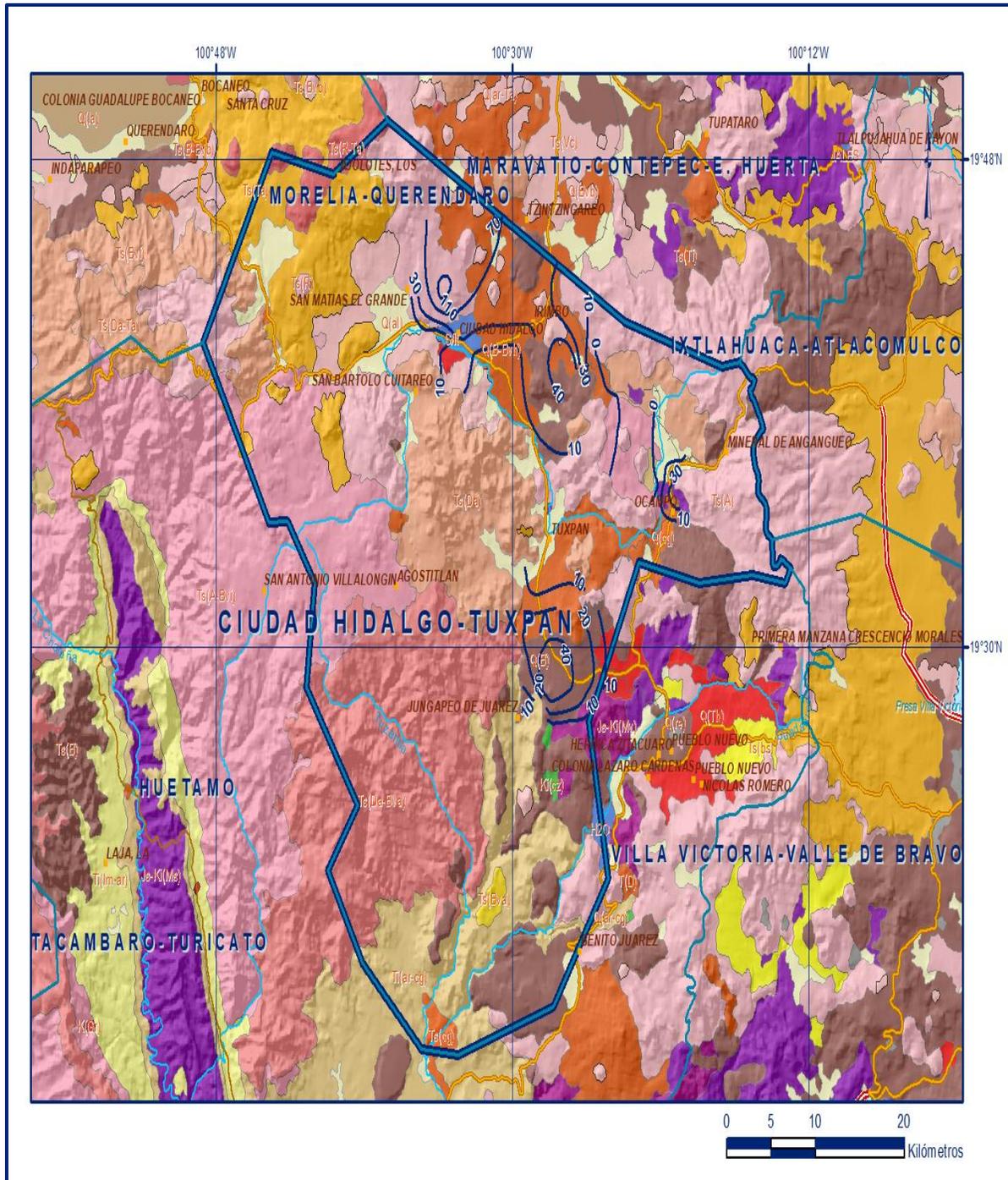


Figura 3. Profundidad del nivel estático en m (2007)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2003 muestra valores que van de 1,338 msnm a 2,535 msnm; las mayores elevaciones se presentan en la parte norte de los municipios de Hidalgo, Angangueo y Ocampo, las cuales van disminuyendo conforme se acerca a la localidad de Jungapeo.

La configuración muestra que el agua fluye hacia el Río Tuxpan de acuerdo al sistema montañoso existente en la zona. Para 2007, el comportamiento del flujo de agua es similar al de 2003, los valores de elevación del nivel estático varían también de 1,338 a 2,535 msnm (figura 4).

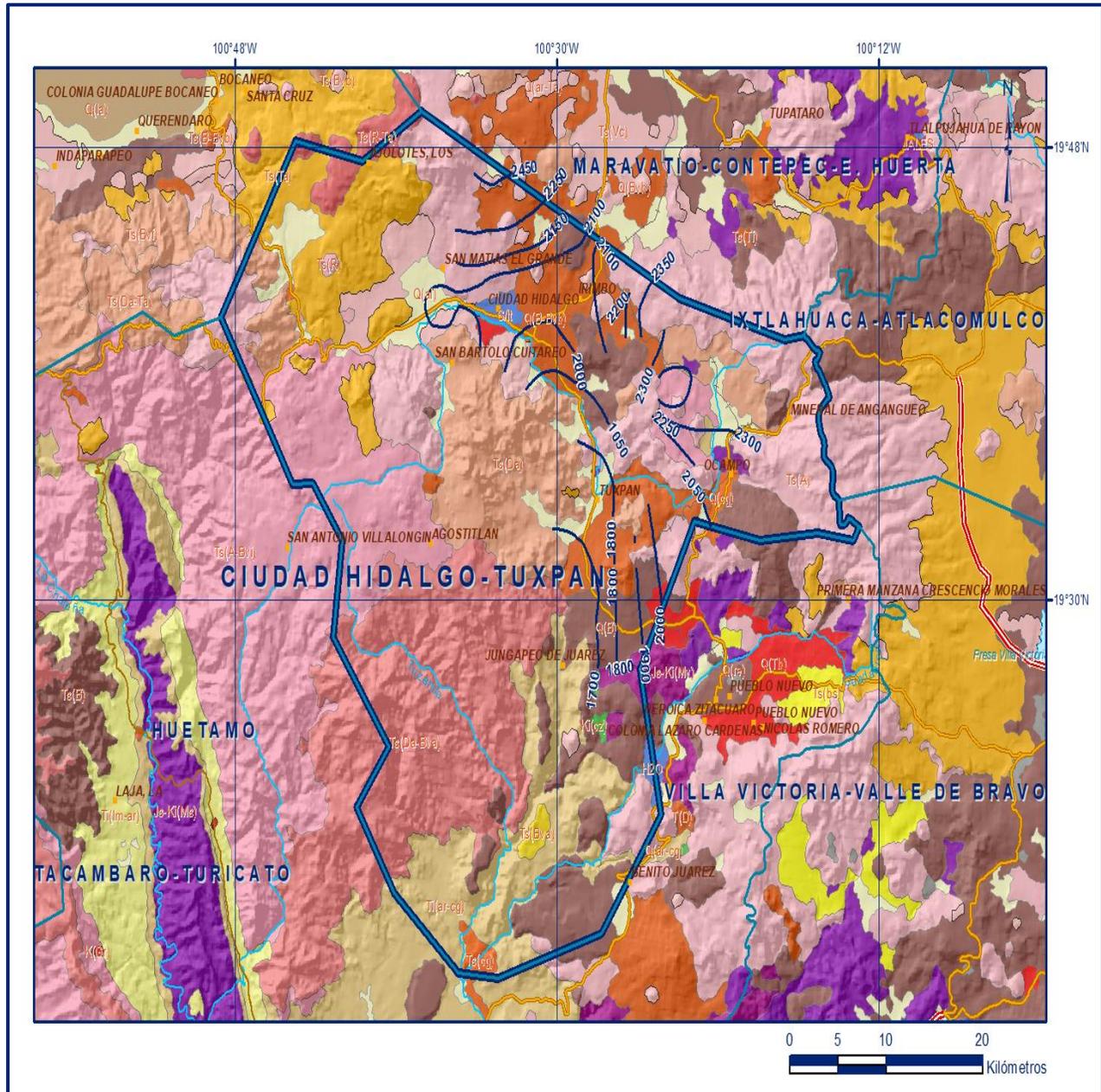


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

5.4.3 Evolución del nivel estático

En el periodo de 2003 a 2007 el nivel estático ha evolucionado positivamente en la porción norte, donde varían de 0.0 a 2.2 m y se observan evoluciones negativas de -0.1 a -4.78 m en la zona de Anganguero, Ocampo y Áporo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La información hidrogeoquímica en el acuífero, se basa en un muestreo de agua subterránea de 30 aprovechamientos. Se determinó la variabilidad espacial de la calidad del agua, así como la evolución de su composición química relacionada con la interacción agua-roca. Se determinaron temperatura, pH, dureza, aniones y cationes principales.

La zona de Huajúmbaro presenta aguas bicarbonatadas magnésicas sódicas, cálcicas, o bien bicarbonatadas mixtas. Para Los Azufres se presentan aguas Sulfatadas-Sódicas en mayor proporción y en menor proporción bicarbonatadas sódicas.

La zona de Ciudad Hidalgo, Tuxpan y Jungapeo presenta agua bicarbonatada, magnésica y cálcica, y sódicas. La composición química del agua subterránea confirma que ésta se desplaza a través de un medio de origen volcánico.

El agua subterránea rebasa los límites permisibles para consumo humano potasio, calcio, magnesio, y bicarbonatos, además de contaminación por coliformes totales, coliformes fecales y por nitratos; las elevadas concentraciones de nitratos en agua pueden producir cianosis en niños, así como corrosividad al agua. La zona con condiciones más favorables para uso potable es la zona de Huajúmbaro, así como las pequeñas cuencas que se forman en Ciudad Hidalgo, Tuxpan y Jungapeo, aunque la presencia de concentraciones de fierro y otros cationes en algunos sitios se tendrá que requerir un tratamiento adicional para su remoción.

Para uso agrícola la calidad del agua también está limitada principalmente por el sodio, calcio, magnesio y bicarbonatos, además de que las unidades de pH, en algunas zonas es muy bajo, lo que indica aguas muy ácidas y agresivas para los cultivos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Para 2007, en el área de balance definida, se consideraron 31 aprovechamientos, 16 son pozos, 14 manantiales y 1 noria, en conjunto se extraen 10.0 hm³/año.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El área de balance es de 475 Km² y fue determinada de acuerdo con criterios geológicos, piezométricos e hidrogeoquímicos.

El período de balance seleccionado fue de 2003 al 2007 (5 años), de acuerdo con la cobertura e información existente para la zona de balance. 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:

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

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:

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

Una vez integrada la información necesaria, se calculó el balance de aguas subterráneas para las subcuencas hidrológicas de Ciudad Hidalgo, Angangueo y Tuxpan. La ecuación de balance para el sistema Ciudad Hidalgo-Tuxpan se resume de la siguiente manera:

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

Dónde:

- R_v**: Recarga vertical
- E_h**: Entradas por flujo subterráneo horizontal
- R_i**: Recarga inducida
- B**: Bombeo
- D_m**: Descargas por manantiales
- ΔV(S)**: Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

Representa la sumatoria de entradas de agua al sistema acuífero, ya sean naturales o inducidas. Para este caso las entradas están integradas por la recarga natural y la recarga incidental o inducida que se origina por la infiltración del agua que se destina a las actividades agrícolas, principalmente, ya que en esta región no existen centros de población importantes, que estén ocasionando fugas en las redes de abastecimiento de agua potable o del drenaje.

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (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 y de las fugas de la red de agua potable constituye otra fuente de recarga al acuífero. Este volumen se integra 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 el cambio de almacenamiento (ΔV) fue estimado a partir de la sobreposición de configuraciones del nivel estático, a que se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo con base en la Ley de Darcy, el valor de la recarga vertical fue despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión.

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

Donde:

- R_v :** Recarga vertical
- E_h :** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- R_i :** Recarga inducida
- B :** Bombeo
- Sh :** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- D_m :** Salidas por descarga a través de manantiales
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Recarga inducida (Ri)

La recarga inducida está constituida principalmente por retornos de riego e infiltración de fugas de la red de agua potable.

De acuerdo con la superficie regable, los sistemas de riego aplicados y las prácticas agrícolas, se determinó el coeficiente por retorno de riego agrícola, que es del 15% del volumen usado en la agricultura, el volumen estimado es de 3.7 hm³/año.

De acuerdo con las características de las zonas urbanas, se propone un coeficiente de retorno del 20% del volumen total, el volumen de retorno estimado es de **2.4 hm³/año**. El volumen total de estimado como recarga inducida es de 6.1 hm³/año.

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 pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2003 y 2007 (figura 5 y 6), mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

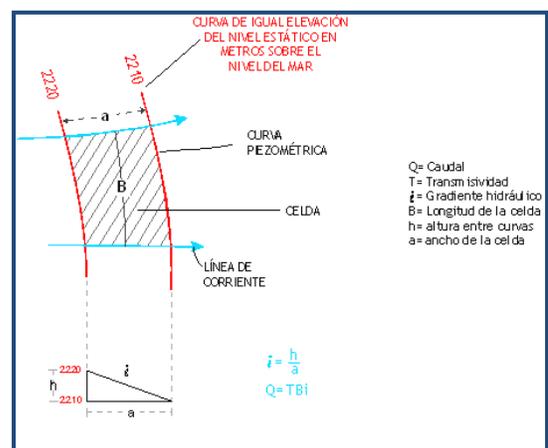
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m²/s)



El cálculo del volumen de entradas por flujo subterráneo horizontal en 2003 fue de 24.5 hm³ y para 2007 de 25.1 hm³.

Con estos valores se determinó que para el periodo de 2003 – 2007, el volumen de entrada es de 124.0 hm³ y el volumen medio anual es de **24.8 hm³**.

Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2003

ENTRADAS SUBTERRANEAS 2003

| CELDA | Longitud B (m) | Gradiente hidráulico i | Trasmisividad T (m ² /s) | Caudal Q (m ³ /s) | Volumen entradas (hm ³ /año) |
|-------------------|----------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|
| E1 | 4.73 | 0.04367 | 1.901 | 0.3927 | 12.383 |
| E2 | 2.59 | 0.03817 | 1.273 | 0.1258 | 3.969 |
| E3 | 3.55 | 0.0165 | 0.717 | 0.0420 | 1.327 |
| E4 | 3.605 | 0.0314 | 1.901 | 0.2152 | 6.796 |
| Total de Entradas | | | | | 24.5 |

Tabla 3. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2007

ENTRADAS SUBTERRANEAS 2007

| CELDA | Longitud B (m) | Gradiente hidráulico i | Trasmisividad T (m ² /s) | Caudal Q (m ³ /s) | Volumen entradas (hm ³ /año) |
|-------------------|----------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|
| E1 | 5.24 | 0.0361 | 1.901 | 0.3596 | 11.341 |
| E2 | 4.57 | 0.03378 | 1.273 | 0.1965 | 6.199 |
| E3 | 3.46 | 0.0163 | 0.717 | 0.0404 | 1.278 |
| E4 | 3.425 | 0.0305 | 1.901 | 0.1986 | 6.26 |
| Total de Entradas | | | | | 25.1 |

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas subterráneas (Sh) y descarga por manantiales. No se presentan salidas por evapotranspiración (ETR) ni descarga de flujo base a lo largo del arroyo en la zona de balance pues se considera que esta salida tiene lugar aguas abajo.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **10.0 hm³/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Sh) en 2003 fue de 49.5 hm³ y en 2007 de 48.8 hm³.

Con estos valores anuales, se determinó para el periodo de 2003 – 2007 el volumen de salida subterránea de 245.9 hm³, que corresponde a una media anual de 49.2 hm³. (Tablas 4 y 5).

Tabla 4. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2003

SALIDAS SUBTERRANEAS 2003

| CELDA | Longitud B (m) | Gradiente hidráulico i | Trasmisividad T (m ² /s) | Caudal Q (m ³ /s) | Volumen entradas (hm ³ /año) |
|------------------|----------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|
| S1 | 5 | 0.0621 | 4.896 | 1.5704 | 49.5 |
| Total de Salidas | | | | | 49.5 |

Tabla 5. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2007

SALIDAS SUBTERRANEAS 2007

| CELDA | Longitud B (m) | Gradiente hidráulico i | Trasmisividad T (m ² /s) | Caudal Q (m ³ /s) | Volumen entradas (hm ³ /año) |
|------------------|----------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|
| S1 | 5 | 0.0602 | 4.896 | 1.5484 | 48.8 |
| Total de Salidas | | | | | 48.8 |

7.2.3. Descarga por manantiales (Dm)

En esta componente se contabilizó el volumen que descargan los manantiales que se encuentran dentro del área de explotación del acuífero, el volumen estimado que aportan los manantiales (2007) es de **2.0 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la determinación de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero registrada para el periodo de 2003–2007.

Con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático y el coeficiente de almacenamiento (Sy) de 0.02, se estimó el cambio en el volumen almacenado de -172.76 hm³, que, al multiplicarlo por el coeficiente de almacenamiento, se obtiene un volumen de -3.5 hm³. El cambio de almacenamiento es de **-0.7 hm³**.

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):

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

$$Rv = 10.0 + 49.2 + 2.0 - 0.7 - 24.8 - 6.1 \quad (2)$$

$$Rv = 29.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = Rv + Eh + Ri$$

$$R = 29.6 + 24.8 + 6.1$$

$$R = 60.5 \text{ hm}^3/\text{años}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **60.5 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso el volumen considerado como descarga natural comprometida corresponde a la descarga por manantiales y al 80% de la salida por flujo subterráneo horizontal, por lo que el volumen es de **41.3 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 **26,664,330 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 60.5 - 41.3 - 26.664330 \\ \text{DMA} &= -7.464330 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **7,464,330 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA