

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Amajac (1321), 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.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE HIDALGO							
1321	AMAJAC	166.0	161.8	2.826879	9.8	1.373121	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

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO AMAJAC (1321), ESTADO DE HIDALGO***

México, D.F. mayo de 2011

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	1
Antecedentes	1
1.1. Localización	1
1.2. Situación Administrativa del Acuífero	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	4
3.1. Provincia Fisiográfica.....	4
3.2. Clima	5
3.3. Hidrografía.....	5
3.4. Geomorfología.....	6
4. GEOLOGÍA	6
4.1. Estratigrafía	8
4.2. Geología Estructural	13
4.3. Geología del Subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA	15
5.1. Tipo de Acuífero	15
5.2. Parámetros hidráulicos	15
5.3. Piezometría	15
5.4. Comportamiento hidráulico	16
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	16
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	17
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	17
7.1. Entradas	17
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	18
7.2 Salidas.....	23
7.2.1 Bombeo (B)	24
7.2.2 Descarga por manantiales (Dm)	24
7.2.3 Descarga natural por flujo base (Dfb)	24
8. DISPONIBILIDAD.....	24
8.1. Recarga total media anual (Rt).....	24
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM).....	25
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	25
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	25
9. BIBLIOGRAFÍA.....	26

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 (REPDA).

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 Amajac, definido con la clave 1321 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción central del estado de Hidalgo, entre los paralelos 20° 07” y 20° 44” de latitud norte y entre los meridianos 98° 37” y 99° 11” de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 1,411 km².

Limita al norte con el acuífero Orizatlán, al este con los acuíferos Meztlán y Huasca- Zoquital, al sur con Cuautitlán-Pachuca, al sur-suroeste con Actopan-Santiago de Anaya y al oeste con Ixmiquilpan.

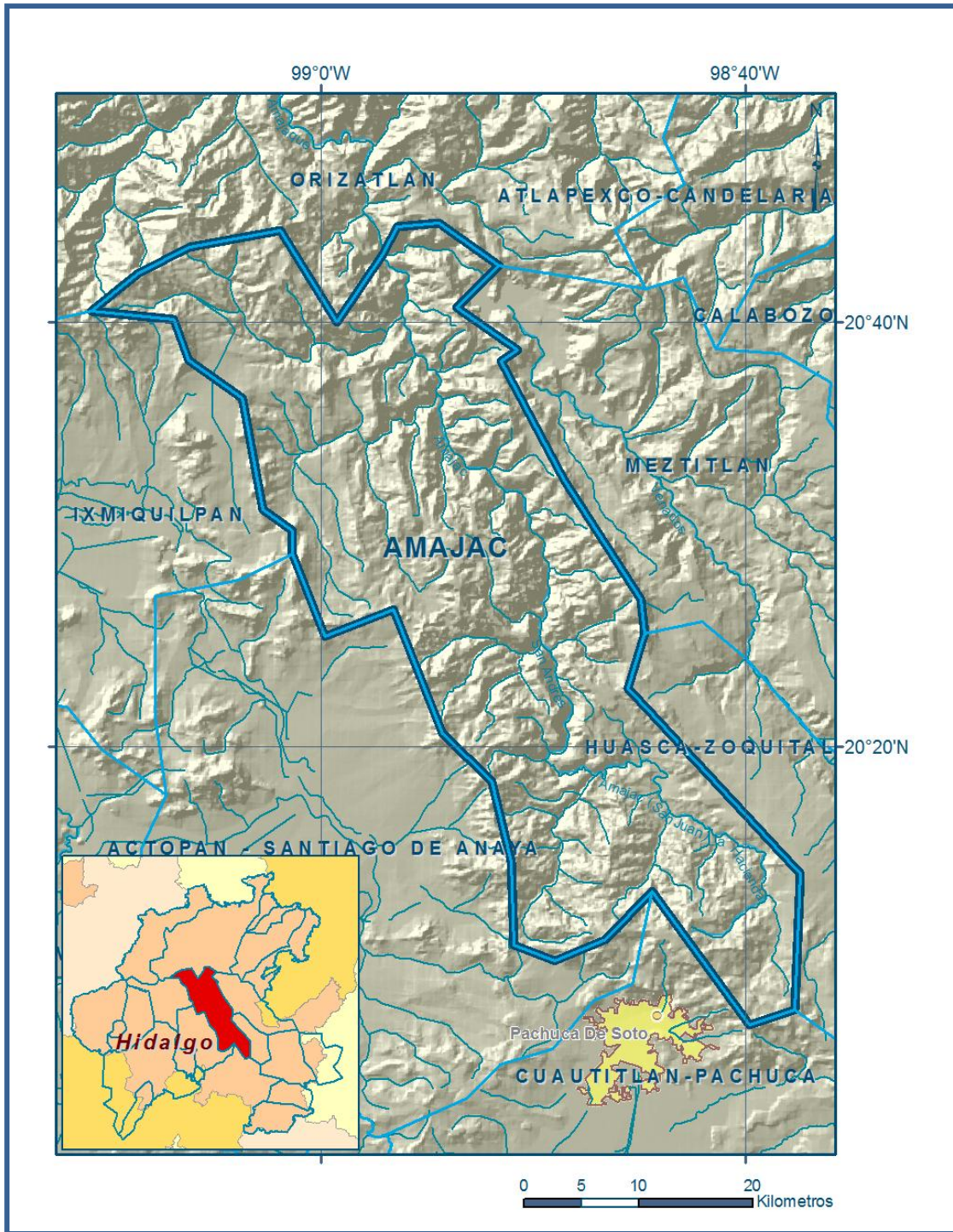


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente su territorio abarca parcialmente los municipios Cardonal, Metztlán, Santiago de Anaya, Atotonilco el Grande, Actopan, Mineral del Chico, Omitlán de Juárez, Mineral del Monte y pequeñas porciones de Tlahuiltepa, Eloxochitlán y El Arenal. 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

ACUIFERO 1321 AMAJAC						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	98	51	36.3	20	42	37.9
2	98	53	36.9	20	40	40.2
3	98	50	43.9	20	38	40.7
4	98	51	30.6	20	38	8.8
5	98	48	34.5	20	32	33.3
6	98	44	55.6	20	26	58.3
7	98	44	46.1	20	25	21.3
8	98	45	33.7	20	22	47.1
9	98	37	26.6	20	14	2.5
10	98	37	42.0	20	7	37.6
11	98	39	50.7	20	6	55.3
12	98	44	25.9	20	13	13.9
13	98	46	35.5	20	10	57.4
14	98	48	59.5	20	9	57.1
15	98	50	54.4	20	10	41.3
16	98	51	3.7	20	14	36.2
17	98	51	58.4	20	18	23.1
18	98	54	15.8	20	20	36.5
19	98	56	36.0	20	26	28.8
20	98	59	49.4	20	25	11.4
21	99	1	21.0	20	29	4.3
22	99	1	18.8	20	30	11.6
23	99	2	42.9	20	31	11.7
24	99	3	41.6	20	36	23.9
25	99	6	13.7	20	38	13.3
26	99	6	53.8	20	40	8.1
27	99	10	47.3	20	40	30.8
28	99	8	34.1	20	42	19.0
29	99	6	11.1	20	43	30.5
30	99	1	55.3	20	44	18.4
31	98	59	14.7	20	39	58.3
32	98	57	3.8	20	43	11.9
33	98	56	25.1	20	44	29.9
34	98	54	26.8	20	44	40.2
1	98	51	36.3	20	42	37.9

1.2. Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero Amajac pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Norte y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Hidalgo. Solo una pequeña superficie en la porción suroriental del acuífero se encuentra sujeto a las disposiciones del “*Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida como Valle de Tulancingo, en el Estado*”

de Hidalgo”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 23 de septiembre de 1965, esta veda se clasifica como tipo III, que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros; el resto del acuífero no está vedado.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2011, los municipios Santiago de Anaya y El Arenal, se clasifican como zona de disponibilidad 6; Meztitlán y Actopan como zona de disponibilidad 7 y Cardonal, Atotonilco el Grande, Mineral del Chico, Omitlán de Juárez, Mineral del Monte, Tlahuiltepa y Eloxochitlán como zona de disponibilidad 8.

El usuario principal es el público urbano. En el territorio del acuífero se localiza el Distrito de Riego 008 Meztitlán. A la fecha no se ha constituido Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Los estudios realizados en la zona del acuífero son escasos y con objetivos geológicos o mineros, algunos abarcan la zona de estudio pero tienen un carácter regional. El único estudio realizado en el acuífero es el siguiente:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO AMAJAC (1321), EN EL ESTADO DE HIDALGO. Elaborado por la empresa Geofísica y Perforaciones del Medio Ambiente, S.C. para la Comisión Nacional del Agua en 2010. El objetivo del estudio fue recopilar la información hidrogeológica para determinar la condición geohidrológica, conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea, analizar el comportamiento de los niveles del agua, cuantificar la recarga media anual y determinar su disponibilidad. Para ello se realizó un censo de captaciones de agua subterránea, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos, toma de muestras de agua para su análisis fisicoquímico y reconocimientos geológicos.

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 Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1997), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en dos Provincias Fisiográficas. La mayor parte del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental constituida, en esta zona por rocas sedimentarias calcáreas y calcáreo- terrígenas, en especial calizas e intercalaciones de lutitas con areniscas y calizas; así como conglomerados.

La porción al sur se ubica en la provincia fisiográfica Cordillera Volcánica-Transmexicana (Eje Neovolcánico) representado por productos y estructuras volcánicas.

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, en la superficie que cubre el acuífero se presentan dos tipos de climas (A)C(m)(w), que corresponde a un clima semicálido, húmedo, con abundantes lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor del 5%; mientras que hacia el sur y suroeste, en la zona que corresponde a la sierra, el clima es (A)C(fm), que corresponde a un clima semicálido, húmedo con lluvia todo el año y un porcentaje de lluvia invernal menor del 18%.

Las variables climatológicas presentan cambios muy notables que son el resultado del efecto topográfico, debido a la diferencia en la altitud. Los valores extremos se registran en las estaciones Omitlán (ubicada en la región topográficamente más alta) y San Cristóbal que se localiza en el valle. Los valores medios anuales de temperatura, precipitación y evaporación potencial para la estación Omitlán son 13.3 °C, 1238 mm y 1223 mm, respectivamente; en la estación San Cristóbal los valores promedio anuales son 20.5 °C, 458 mm y 1672 mm, respectivamente.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 16 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Atotonilco, Capula, El Cardonal, El Chico, El Encino, El Santuario, Encarnación, Ixmiquilpan, Magdalena, Metztitlán, Omitlán, Real del Monte, San Cristóbal, Sta. María Amajac, Santiago de Anaya y Tixqui, el registro en algunas de ellas comprende un periodo de 30 años.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1096 mm y 17.9 °C** respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1445.7 mm anuales**

3.3. Hidrografía

El acuífero se localiza dentro de la Región Hidrológica RH 26 Río Pánuco, Cuenca del Río Moctezuma, subcuenca del Río Amajac.

Morfológicamente, el acuífero de Amajac se encuentra en una zona serrana, constituida al sur por materiales volcánicos y sedimentarios al centro y norte. El patrón de drenaje formado es de tres tipos, dendrítico, radial y rectangular. El segundo y tercer tipos están ampliamente regulados por las estructuras existentes; en el caso del radial, con zonas volcánicas y el rectangular, por la presencia de fracturas y fallas.

La densidad de drenaje es variada, intensa en donde afloran las intercalaciones de lutitas con areniscas y moderada, en las porciones en donde dominan las rocas volcánicas y las calizas. La mayoría de los escurrimientos son de régimen intermitente, todos ellos afluentes del río Amajac. Este río en el inicio y final de su recorrido tiende a ser perenne, debido a la presencia de manantiales que le aportan agua todo el año; en temporada de estiaje el río desaparece en la porción central del acuífero, donde los depósitos aluviales presentan mayor espesor.

El río Amajac corre de Sureste a Noroeste, cortando las secuencias mesozoicas y terciarias que integran las sierras circundantes; nace en la Sierra de Pachuca y se alimenta de los arroyos Bandola, General y Aguacate; al final confluye con el Río Metztlán, en el extremo norte del acuífero, después de haber recorrido poco más de 60 kilómetros. Sus principales afluentes por la margen izquierda se conocen como Arroyo Bandola, Río General, Río Aguacate, Río Ocotillos, Arroyo El Chico y Magdalena, Arroyo Gualulo, Arroyo Milpitas, Río San Nicolás, Arroyo El Senthe, Río Carrizal y el Río Tolantongo. Por la margen derecha, provenientes de la meseta de Huasca Zoquital, los arroyos intermitentes de La Luna y Xhate.

En el extremo norte del acuífero existen dos estaciones hidrométricas, actualmente inactivas, que medían el caudal proveniente de la Laguna de Metztlán. No existe infraestructura hidráulica para el almacenamiento de las corrientes superficiales.

3.4. Geomorfología

La región está ubicada en una zona serrana constituida por rocas ígneas extrusivas del Neógeno Superior y rocas sedimentarias cuyas edades varían del Jurásico hasta el Reciente, fuertemente fracturadas, afalladas y disectadas por una gran cantidad de escorrentías que las han erosionado a lo largo de decenas de miles de años. Las rocas ígneas presentan una composición variada, desde las andesitas y dacitas hasta los basaltos; las sedimentarias en su caso, corresponden a intercalaciones de lutitas con areniscas, calizas, conglomerados, brechas sedimentarias y aluviones.

Las zonas en donde predominan las calizas, los cerros en general se presentan redondeados, en ocasiones cortados por fallamientos; la densidad de drenaje es alta, con vaguadas semiprofundas y taludes inclinados. En donde predominan las rocas sedimentarias calcáreo-terrágenas (lutitas-areniscas-calizas), los cerros tienden a ser irregulares, mayormente disectados y con vaguadas profundas y taludes verticales.

4. GEOLOGÍA

Las secuencias litológico-estructurales existentes en la zona de Amajac, evidencian el fuerte tectonismo y la gran diversidad de fenómenos de sedimentación y vulcanismo ocurridos desde el

Paleozoico, época en que se depositó la unidad más antigua que aflora en la zona que es la Formación Guacamaya, constituida por una sucesión de lutitas, areniscas y conglomerados formados con partículas y clastos de origen volcánico y escasos paquetes de flujos de detritos calcáreos que se formaron durante el Pérmico, esto es a fines del Paleozoico.

Posteriormente, durante el Triásico (Mesozoico), se generó la Formación Huizachal (TRsLu-Ar), constituida por secuencias tipo flysch (los depósitos tipo Flysch corresponden a una alternancia bastante uniforme, de materiales duros, areniscas aunque también pueden aparecer calizas), con materiales blandos (arcillas y margas). Las arcillas suelen tener abundantes restos de microorganismos marinos fosilizados, mientras que las areniscas presentan gradación normal en su depósito.

Iniciado el Jurásico continuó este tipo de depósitos, dando origen a la Formación Huayacocotla (JiLu-Ar), constituida por secuencias de lutitas y areniscas; a esta unidad le sobreyacen las formaciones Pepéxic, Santiago, Chipoco y Pimienta (JsLu-Cz), conformadas por calcarenitas, lutitas calcáreas, calizas arcillosas y calizas con bandas de pedernal, de edad Jurásico Superior.

De manera transicional, la profundización del mar y alejamiento del continente permitió que los depósitos anteriores fueran cubiertos por una caliza con intercalaciones de lutitas y bandas de pedernal negro, pertenecientes a la Formación Tamaulipas (KiCzT), misma que comprende a las formaciones Tamaulipas Inferior, Horizonte Otates y Tamaulipas Superior (esta unidad es visible en diversos tramos de la carretera a Metztlán). A su vez, esta unidad es sobreyacida en forma concordante por una intercalación de calizas arcillosas, lutitas y bandas de pedernal de la Formación Agua Nueva (KsLu-Cz). A esta formación le sobreyacen a su vez, en forma concordante, intercalaciones de lutitas y areniscas con intercalaciones de glauconita de la Formación San Felipe. Sobreyaciendo a esta se encuentran intercalaciones de lutitas, areniscas, calizas, margas y limolitas de la Formación Méndez.

Hacia el centro y norte del acuífero, coincidente con la Formación El Doctor, afloran calizas y dolomías de la Formación El Abra, sobreyacidas por secuencias de lutitas, areniscas-limolitas y calizas arcillosas de la Formación Soyatal (KsLu-Cz).

Durante el Terciario se originaron los depósitos continentales, cuya base está representada por un conglomerado polimíctico constituido principalmente por fragmentos de caliza y pedernal, cementados por una matriz areno-arcillosa. Dicha unidad pertenece al Conglomerado El Morro (localmente conocida con el nombre de Formación Metztlán). Hacia el Terciario Medio inició la intensa actividad volcánica que generó las coladas y piroclastos de composición ácida del Grupo Pachuca. Continuaron los depósitos volcánicos constituidos por derrames de andesita basáltica, basalto y aglomerados de la Formación Atotonilco El Grande. Esta última quedó cubierta parcialmente por lahares y flujos piroclásticos pertenecientes a la Formación Tarango.

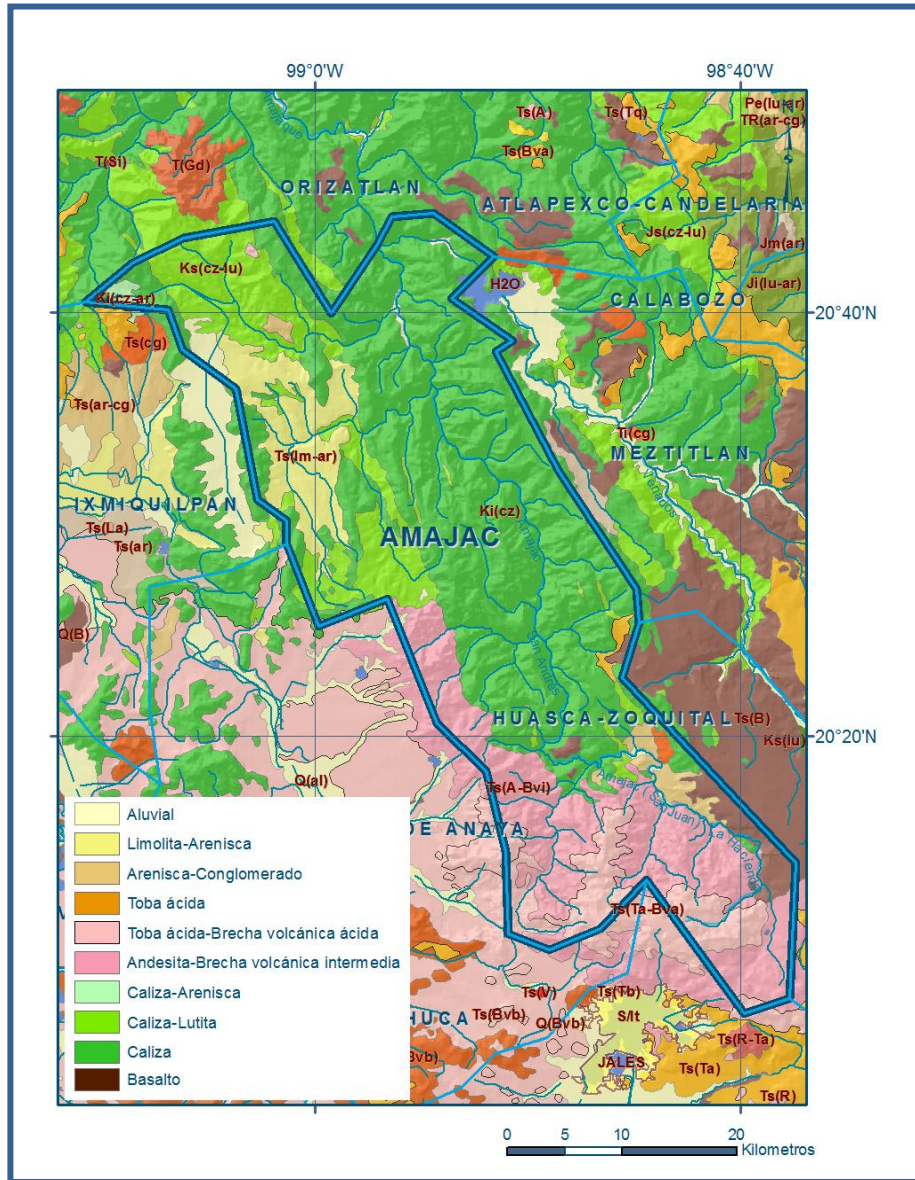


Figura 2. Geología del acuífero

4.1. Estratigrafía

La geología regional de la zona está representada por rocas sedimentarias marinas y continentales, así como rocas volcánicas, cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Paleozoico Superior al Reciente. La distribución de las diferentes unidades litológica se presenta en la figura 2. La columna estratigráfica presente en la zona se describe a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente. La descripción de las unidades litológicas, fue tomada de las cartas F-14-11 “Pachuca” (SGM, 1997) y E14-2 “Ciudad de México” (SGM.2002), ambas a escala 1:250,000.

Las rocas más antiguas que se encuentran en la zona de estudio, corresponden a lutitas y areniscas del Pérmico y Triásico, a las que les sobreyacen calizas y lutitas del Jurásico. Sobre estas descansan sedimentos calcáreos marinos del Cretácico que en conjunto forman la Sierra Madre Oriental. Hacia el oriente, le sobreyacen lutitas y areniscas del Terciario. Finalmente, sobre el valle en la porción noroccidental, se encuentran delgadas capas de aluviones del Cuaternario.

Paleozoico

Formación Guacamaya Pérmico Inferior. Dentro del llamado Anticlinorio de Huayacocotla se encuentra una secuencia de rocas del Pérmico Inferior correspondiente a la Formación Guacamaya, constituida por una sucesión vulcano-sedimentaria de derrames andesíticos a basálticos, intercalados con lutitas, areniscas y conglomerados formados por fragmentos de rocas volcánicas y escasos paquetes de flujos de detritos calcáreos (Centeno-García *et al.*, 1995; Rosales-Lagarde *et al.*, 1997). En los estratos de lutita y arenisca (epiclásticos) y de flujos de detritos calcáreos, se han recolectado fósiles de diversos invertebrados, principalmente braquiópodos, bivalvos, gasterópodos, crinoideos, trilobites, corales rugosos y fusulínidos, que demuestran el origen marino de los depósitos.

Mesozoico

Triásico

Formación Huizachal. Esta unidad está formada por una secuencia de Lechos Rojos en la que se encuentran areniscas conglomeráticas, limolitas y algunos horizontes de lutitas, dispuestas en estratos delgados, medianos, gruesos y masivos. Algunas areniscas presentan estratificación cruzada. Los conglomerados presentan una matriz arcillo-arenosa y clástica de cuarzo, con fragmentos de gneis y de rocas ígneas. A la secuencia se le ha asignado un espesor de 2000 metros aproximadamente.

Jurásico

Formación Huayacocotla (Ji lu-ar). Esta formación aflora al norte de la zona de estudio, en las cercanías de Metztlán. Consiste de una secuencia de lutitas fósiles con intercalaciones de areniscas muy competentes; las lutitas presentan color gris oscuro y negro y aspecto verdoso, que intemperiza en tonos amarillos y rojizos; los estratos varían de 2 a 10 cm de espesor. Las areniscas son de grano fino a medio y presentan un color gris claro, en estratos de 5 a 25 cm.

Los paquetes de areniscas pueden ser observados con mayor precisión hacia la cima de la formación y en ocasiones pueden observarse en forma de nódulos. Dentro de la zona de estudio no es posible observar la relación que guarda con la formación que le sobreyace, pero cerca de Santa María Tlaola, Pue., sobreyace concordantemente a la Formación Huizachal. En el lecho del Río Zempoala, exactamente a la altura del valle de Zapotitlán de Méndez, la formación subyace discordantemente con la Formación Cahuasas. Por su contenido abundante de fósiles de amonitas, se le asigna a esta formación una edad Sinemuriano- Pleinsbaquiano.

Formación Cahuassas. Fue definida por Carrillo-Bravo en 1965 como una secuencia de más de 1,000 metros de espesor que consiste en areniscas, conglomerados y limonitas de color rojo. Descansa en discordancia angular sobre la Formación Huayacocotla y está cubierta concordantemente por la Formación Tepexic la cual fue descrita formalmente por Erben (1956) y está formada por margas, limonitas calcáreas, calcarenitas y coquinas. De acuerdo con sus relaciones estratigráficas, se le asigna una edad Jurásico Medio.

Formaciones Pimienta, Santiago, Chipoco y Tamán (JsLu-Cz). Corresponden a una alternancia calcáreo-arcillosa, cartografiada como una sola unidad. En forma concordante sobreyacen calizas intercaladas con grauvacas y lutitas, de la Formación Santuario del Cretácico Inferior, afloran en la porción noroeste de la carta.

Cretácico

Formación El Doctor. Unidad definida por Wilson en el año de 1956, para referirse a las facies calcáreas de banco y de cuenca, de edad Albiano Medio-Cenomaniano Temprano; posteriormente, en el año de 1962, Fries menciona que la facies de cuenca es la que aflora entre Apaxco y Tula, Hidalgo y que probablemente hacia el sur se interdigite en el subsuelo con la Formación Morelos. Esta facies, según Fries, forma una secuencia de 200 metros de espesor, constituida por caliza mudstone en capas delgadas con nódulos y lentes de pedernal e intercalaciones locales de lutita; yace sobre la Formación Santuario en la parte norte de la zona de Actopan y en algunos sitios sobreyace a la Formación Las Trancas.

Formación El Abra. Consiste de un complejo calcáreo formado durante el Albiano-Cenomaniano (Cretácico Inferior), compuesto por calizas y dolomías formadas en un ambiente de tipo plataforma, de facies pre-arrecifal, post-arrecifal y arrecifal. Su localidad tipo se ubica en El Abra, localizada sobre la carretera Ciudad Valles-Tampico, aproximadamente a 10 km al oriente de Ciudad Valles, S.L.P.

Formación Tamabra. Está compuesta por secuencias autóctonas de "mudstone" y "wackestone" con fauna pelágica, características de ambientes de aguas profundas que se intercalan con sedimentos alóctonos gravitacionales y de suspensión compuestos por "packstone" y "grainstone" hasta "mudstone" con alto contenido de bioclastos y litoclastos provenientes de ambientes de aguas someras. En las secuencias alóctonas dominan los depósitos del tipo de flujos de detritos y escombros ("debris flows") seguidos por turbiditas calcáreas asociadas con esporádicos pliegues sinsedimentarios debidos a deslizamientos.

Formación Tamaulipas. Está constituida por calizas criptocristalinas en bancos gruesos, con estilolitas paralelas a los planos de estratificación y nódulos esferoidales y elipsoidales de pedernal; alternando con las calizas anteriores, en ocasiones se observan algunos horizontes de calizas microcristalinas. El espesor aproximado de esta formación es de 214 m, en capas que

varían de 10 cm a más de 2 m, se observan horizontes que varían de unos centímetros hasta dos metros de calizas dolomitizadas. Para una mayor diferenciación, Muir y Humphrey y posteriormente W. Stephenson dividieron a esta formación en dos como sigue:

a) Formación Tamaulipas Inferior. Consiste de calizas de estratificación mediana a gruesa de color gris claro y gris oscuro con nódulos de pedernal, con dolomitización en su porción basal. Está constituida por calizas de textura microcristalina y dolomitas de color gris a gris oscuro con líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación, en estratos que varían de unos centímetros a dos metros de espesor, con pequeños mantos de óxido de fierro inter estratificados y lajamiento perpendicular al rumbo de la estratificación.

b) Formación Tamaulipas Superior. El nombre fue introducido a la literatura geológica por W. Stephenson, para designar una sección de calizas criptocristalinas de color crema claro y capas medianas con líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación y lentes de pedernal gris. Está constituida por calizas en las cuales se pueden distinguir dos miembros: el inferior está representado por calizas de textura fina, de color crema, en capas de espesor medio y ocasionalmente con lentes de pedernal; el miembro superior se compone de calizas de color amarillento en capas de espesor delgado y con nódulos de pedernal de color gris.

Ambas formaciones presentan sus mejores afloramientos en los cañones de Juan Capitán, Ojo Caliente y el Novillo, que cortan la Sierra Madre Oriental.

c) Formación Otates. Muir fue el primero en aplicar este término, para denominar un intervalo arcillo-calcárea que separa estratigráficamente a las calizas de las Formaciones geológicas Tamaulipas Inferior y Superior. Su localidad tipo se encuentra en el cañón de los Otates, ubicado sobre el flanco occidental de la Sierra de Tamaulipas. Inicialmente se consideró como "horizonte" y posteriormente fue elevado al rango de Formación, debido a su amplia extensión e importancia, conforme a la magnitud del evento sedimentológico que representa. Está constituida por calizas arcillosas de estructura laminar ligeramente carbonosas de color gris oscuro, su espesor se estima de 6 a 13 m. Aflora en los cañones antes mencionados.

Formación Soyatal. Esta formación está conformada por calizas arcillosas de color gris oscuro en capas de espesor mediano a delgado y sin pedernal; sobreyace a la Caliza El Doctor, aparentemente sin discordancia angular.

Formación Agua Nueva. Esta unidad está formada por calizas de estratificación delgada que sobreyacen en forma discordante sobre la Formación Tamaulipas Superior sobre la Formación Soyatal. Tiene un espesor de 130 m y su edad es Turoniano-Santoniano.

Formación San Felipe. Consiste en calizas margosas con intercalaciones de arcilla bentonítica. Sobreyace concordantemente a la Formación Agua Nueva y presenta un espesor medio de 130 m. Se caracteriza por la intercalación de micrita fosilífera de globotruncana, con margas y bentonita, el color de las capas de 10 a 20 cm de espesor es verde cuando los cortes son frescos, y beige amarillento cuando están intemperizados. Su edad se asigna al Coniaciano-Santoniano.

Formación Méndez. Está constituida principalmente por margas con intercalaciones menores de arenisca, principalmente hacia su cima. Se le ha asignado una edad que abarca del Campaniano al Maestrichtiano y un espesor que varía de 200 a 300 m.

Terciario (Neógeno)

Formación El Morro. Conglomerados calizos bien cementados en matriz rojiza que sobreyacen en discordancia angular y erosional sobre las rocas marinas en muchas localidades aisladas. Comprende también, lavas y tobas andesíticas y basálticas. Su localidad tipo se ubica en las cercanías de Zimapán (Segerstrom, 1961) y se correlaciona con el Conglomerado Rojo de Guanajuato. En la región de Zimapán está relacionada principalmente con andesitas.

Grupo Pachuca. Son rocas volcánicas cuya composición varía de basáltica a riolítica que sobreyacen a la Formación El Morro, con o sin discordancia angular. El nombre está asociado a una serie de rocas volcánicas, muy afalladas, intrusionadas, alteradas hidrotermalmente y mineralizadas, que subyacen a las corrientes de Riolita en la Sierra de Pachuca. Este grupo se ha dividido en siete formaciones entre las cuales predomina la andesita; cada formación tiene en su parte basal estratos lenticulares de tobas y en las corrientes suprayacentes existen lavas masivas y brechoides. Ocasionalmente presenta depósitos lacustres.

Las rocas ígneas extrusivas de composición ácida están representadas por tobas dacíticas y riolíticas, vítreas, compactas, de color rosáceo y de estructura a veces bandeada (ignimbritas). En cuanto a las efusiones lávicas y de productos piroclásticos de composición básica, sobreyacen de manera discordante a las rocas carbonatadas de la secuencia Cretácica de rocas calizas (facies de plataforma y talud), a la secuencia Jurásica constituida por una alternancia de calizas-lutitas y margas y a las rocas volcánicas ácidas.

Formación Zumate. Consiste de corrientes y brechas dacíticas con cantidades menores de tobas que sobreyacen en discordancia sobre el Grupo Pachuca. Se encuentran relativamente inalteradas, poco falladas y con algunos diques. Es notable esta formación por su textura porfídica excepcionalmente gruesa de sus lavas y por sus formas erosionables en forma de pináculos. Alcanza un espesor máximo de unos 300 metros.

Toba Don Guinyó. Propuesta por Kenneth Segerstrom, está compuesta de tobas y brechas riolíticas y dacíticas, compactas y con lentes horizontales de vidrio negro (toba soldada o

ignimbrita). Esta formación se depositó sobre zonas muy erosionadas; su máximo espesor es de 170 metros.

Vulcanitas intermedias en estratovolcanes. Está constituida por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas, de composición dacítica a basáltica; penecontemporáneas a esta unidad, se encuentran los depósitos volcánicos del Plioceno Temprano. Consisten de secuencias piroclásticas de composición andesítica a dacítica, tobas cristalinas, vítreas, líticas y pumíticas; cubiertas por intercalaciones de derrames lávicos, algunos autobrechados, con brechas de flujo. Los flujos lávicos más máficos presentan exfoliación regular horizontal con vesículas alargadas en dirección del derrame; los más ácidos, tienen estructura fluidal incipiente.

Formación Atotonilco. Segerstrom (1961) la describe como la unidad litoestratigráfica que aflora en los dos lados del río Venados, semejante a la Formación Tarango porque sus rocas rellenaron los paleovalles preexistentes. Se les distingue por el mayor contenido de lava. De hecho, el pueblo de Atotonilco El Grande, se encuentra en una llanura parcialmente rellenada por aglomerados de basalto y basalto intercalados con depósitos clásticos no consolidados al este y norte de la localidad. El espesor máximo de la lava basáltica es de 200 m. Contiene restos de mastodonte, probablemente del Plioceno Superior o del Pleistoceno Inferior.

Aflora al de Amajac, al suroeste de la población de Zacualtipán, cerca de las poblaciones de Zoquiteno, Zoquizoquipan y Los Arcos donde están los límites de las dos emisiones de basalto (Tehuiztla y Tlatoxca) descritas por Almanza (1956). Es notable la diferencia topográfica entre Metztlán y la mesa de rocas ígneas y sedimentarias donde se localiza Zacualtipán (1990 m de altitud), la cual es cercana a los 700 m.

Formación San Cristóbal. Consiste de una sucesión de tobas, lavas basálticas y conglomerados que contienen guijas y guijarros de andesitas y riolitas más antiguas, que sobreyacen a rocas volcánicas más antiguas en discordancia erosional y/o angular. El basalto que contiene olivino, tiende a formar extensas mesetas o masas de montañas maduramente erosionadas. El espesor de esta formación puede alcanzar hasta los 400 metros.

Aluvión (Qal). Son depósitos recientes que contienen fragmentos provenientes de una gran variedad de rocas, los tamaños de los clastos varían desde arcillas a guijarros y se encuentran muy poco compactos. Su espesor es reducido y su presencia se restringe a los cauces de los ríos y arroyos.

4.2. Geología Estructural

Los rasgos estructurales que se observan en esta región indican varios tipos de deformación de la secuencia rocosa que la conforman. Algunos de estos rasgos corresponden a una fase

neotectónica y se manifiestan como rupturas en el relieve y fuertes cambios de pendientes transversales a las estructuras.

Los principales elementos geológicos estructurales están representados, en orden de importancia, por anticlinales, sinclinales, vestigios de estructuras volcánicas, fallas, fracturas. Estos elementos estructurales son comunes en toda la porción norte del estado de Hidalgo, en los límites con los estados de San Luis Potosí y Veracruz. En esta región, las rocas del Mesozoico que se encontraban cubiertas por el mar, fueron deformadas y plegadas por el efecto tectónico de la Orogenia Laramide; posteriormente a los esfuerzos de compresión siguió una etapa de extensión durante la cual se generaron grandes fallas de tipo normal, que actuaron entre fines del Cretácico y principios del Terciario. Este tipo de fallamiento estuvo acompañado de fracturamiento y dio lugar a la formación de profundas cañadas.

Es posible que la invasión de rocas intrusivas (que no afloran en el área cubierta por el acuífero, pero sí en el acuífero vecino al norte Orizatlán) se haya dado en forma casi simultánea con la fase orogénica que plegó la secuencia del Mesozoico, propiciando a su vez mayor deformación local en la zona de intrusión, y al mismo tiempo la inyección de fluidos mineralizantes en las rocas fracturadas.

La actividad volcánica que inició durante el Oligoceno y Mioceno y continuo hasta el Holoceno, formó lo que se conoce hoy en día como la provincia fisiográfica y geológica del Eje Neovolcánico, actividad que de nueva cuenta rompió las rocas sedimentarias preexistentes, incrustándolas y al final, cubriéndolas con fuertes espesores de rocas volcánicas, mismas que comenzaron como rocas ácidas y a medida que se vaciaban las cámaras magmáticas, las más profundas comenzaron a abastecer las nuevas emisiones volcánicas, variando la química de las lavas y piroclastos a más básicas. De esta forma es común que encontremos en las zonas altas de las sierras, afloramientos de rocas volcánicas de composición basáltica, e incluso almohadilladas y muchas veces alteradas.

4.3. Geología del Subsuelo

De acuerdo con la información geológica e hidrogeológica recaba 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 que constituyen el lecho y la llanura de inundación del Río Amajac y arroyos tributarios; en su porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias calcáreas y terrígenas (calizas y areniscas y lutitas), así como volcánicas (tobas, brechas y basaltos) que presentan permeabilidad secundaria fracturamiento. Las calizas de las formaciones Tamaulipas Superior e Inferior, Tamabra, El Abra y El Doctor, constituyen horizontes acuíferos profundos que no han sido explorados en la zona.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas al desaparecer el fracturamiento, y por las lutitas, limolitas y areniscas compactas, que forman parte de las secuencias calcáreo-arcillosas de las unidades litológicas que afloran ampliamente en todo el acuífero.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de Acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido vertical como horizontal, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada, de espesor reducido que no sobrepasa los 10 m, debido a que están subyacidos por lutitas. Este es el acuífero que se actualmente puede explotarse en los valles intermontanos, principalmente mediante norias perforadas en los subálveos del río y arroyos que sólo satisfacen las necesidades del uso doméstico. Las calizas y areniscas representan una fuente potencial de agua subterránea que aún no ha sido explorada.

Debido a la topografía accidentada y al carácter general impermeable de la zona serrana, los escurrimientos fluyen de manera rápida sin permitir su infiltración. Solo en la porción baja es posible la acumulación de agua, conformando un acuífero de reducidas dimensiones y de baja capacidad de almacenamiento, que presenta permeabilidad media.

En las porciones sur y centro del acuífero es común la existencia de pequeños manantiales que en forma de “lloraderos” descargan localmente la infiltración del agua a través de las fracturas o por el contacto con rocas impermeables.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2010 solo se realizó una prueba de bombeo de corta duración, en etapa de recuperación, en el pozo “El Encino” ubicado aproximadamente a 60 metros de un afloramiento de lutitas- areniscas del Cretácico. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos, se establece que el valor de transmisividad es de $2.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y un caudal específico de 1.1 lps/m.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en el año 2010. Sólo fue posible obtener los valores de profundidad al nivel estático en un número escaso de aprovechamientos dispersos en el acuífero.

5.4. Comportamiento hidráulico

No se cuenta con información piezométrica suficiente que permita elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático. Debido a la extensión superficial y a las condiciones orográficas del acuífero, existen pequeños valles intermontanos esparcidos en toda la superficie del acuífero, en los que se extrae de manera incipiente el agua subterránea de los niveles freáticos someros.

Debido al escaso número de aprovechamientos que existen en el área que cubre el acuífero y al incipiente volumen de extracción, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el año 2010, se tomaron muestras de agua 14 de ellas en manantiales y una en un pozo para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe Mn.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos presenta valores que varían de 78 a 1,830 mg/l. La heterogeneidad del medio geológico y el hecho de que el muestreo consideró en su parte manantiales, dificulta la definición de la dirección del flujo subterráneo, tomando en cuenta las concentraciones de STD.

El pH del agua en general ácido (menor a 7), muestra el poco contacto del agua con medios calcáreos y en cambio el agua de los manantiales San Pablo Tetlapayac y Tolantongo, con pH de 7.5 indica el tránsito del agua por rocas calcáreas. Los manantiales de la zona de Amajac, por su elevado termalismo (uno de ellos presenta 51°C en su descarga) y alta concentración de STD, muestran orígenes distintos.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), de las 15 muestras tomadas, 2 se clasifican como C1-S1 (baja salinidad y bajo contenido de sodio intercambiable); 2 como C1-S2, 2 como C2-S1, 2 como C3-S1, 5 como C4-S1, 1 C3-S4 y 1 como C4-S4. La mayoría de las muestras presentan salinidad de media a muy alta, poco recomendable para actividades agrícolas.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificaron como familias dominantes la cálcico-bicarbonatada y la cálcico-sulfurada, la primera corresponde a agua de reciente infiltración que ha circulado principalmente a través de rocas sedimentarias calcáreas (calizas).

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2010, existen en el acuífero un total de 136 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 134 son manantiales, sólo 3 pozos.

El volumen de extracción calculado es de 9.8 hm³ anuales, destinados en su totalidad al uso público urbano para abastecimiento de agua potable a la parte alta de la ciudad de Pachuca y a las comunidades rurales de la región comprendida dentro del acuífero. Adicionalmente, a través de manantiales se descarga un volumen anual de 64.0 hm³, destinados casi en su totalidad al abastecimiento de agua potable y en menor proporción para usos de servicios y recreativo

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

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa se expresa como:

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

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 una unidad hidrogeológica:

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

7.1. Entradas

Las entradas al acuífero están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv).

No existe suficiente información piezométrica actual ni histórica en la superficie que cubre el acuífero. La escasa información disponible, procedente de recorridos de campo se encuentra dispersa en tiempo y espacio, es puntual e inconsistente de tal manera que no es posible

extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas. Aunado a esto, existen pocos aprovechamientos del agua subterránea y la superficie del acuífero está conformada en su mayor parte por sierras entre las cuales existen pequeños valles intermontanos en los que se localizan los escasos aprovechamientos. Por estas razones, se optó por plantear el balance hidrometeorológico en la superficie de 1,411 km² del acuífero, para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \quad (1)$$

V_{LL} = Volumen de lluvia;

V_{ETR} = Volumen evapotranspirado;

V_{ESC} = Volumen escurrido;

V_{INF} = Volumen infiltrado;

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (1,411 km²) por la lámina de precipitación media anual (1,096 mm):

$$V_{LL} = 1,411 \text{ km}^2 (1.096 \text{ m}) = \mathbf{1,546.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Para estimar la evapotranspiración real, se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando el valor promedio anual de precipitación que es de 1,096 mm y temperatura de 17.9 °C.

Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas por todos los climas del mundo, define la expresión siguiente para la estimación de la evapotranspiración real:

$$ETR = \frac{P}{\left[0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)\right]^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

ETR= Evapotranspiración real, en mm;

P= Precipitación media anual, en mm;

L= $300 + 25T + 0.05T^3$;

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc es que la precipitación no debe ser menor a la relación $0.31L$. En caso contrario se obtiene una $ETR > P$ y para estos caso se debe considerar a $ETR = P$. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración es de 770.6 mm anuales.

Fórmula de Turc:	$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$	$L = 300 + 25T + 0.05T^3$
T (°C) =	17.9	
P(mm) =	1096	P ² = 1201216
L =	1034.26695	L ² = 1069708.12
ETR (mm)	770.6	

Si consideramos el valor de la ETR obtenida (770.6 mm anuales), el volumen de la ETR es:

$$V_{ETR} = 1,411 \text{ km}^2 (0.7706) = 1,087.3 \text{ hm}^3/\text{año}.$$

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 (DOF), del 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”.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

$$\text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA} = \text{PRECIPITACION ANUAL DE LA CUENCA} * \text{AREA DE LA CUENCA} * \text{COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO}$$

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, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

Tabla 2. Valores de K en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2000)

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3
TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		

En el caso de que en la cuenca en estudio, existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado. Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si K resulta menor o igual que 0.15,
Si K es mayor que 0.15,

$$Ce = K (P-250) / 2000;$$

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

Donde:

P= Precipitación anual;

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;

K = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

De acuerdo con la cartografía del CONABIO escala 1:1, 000, 000 para el tipo y uso de suelo, predominan los tipos Feozem, Litosol, Regosol, Rendzina, (figura 3). En cuanto al uso de suelo (figura 4) de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1'000,000; 57 % de la superficie del acuífero está cubierta por bosque, en los que el suelo es tipo C, cubierto del 50% al 75%, por lo que $K=0.24$; 33% del acuífero corresponde a pastizales y matorral, cubierta, del 50% al 75%, suelo tipo C por lo que $K=0.3$ y el 10 % de la superficie del acuífero se destina a uso agrícola, por lo que $K=0.3$.

$$K \text{ ponderado} = 0.24 (0.57) + 0.3 (0.33) + 0.3 (0.1) = \mathbf{0.27}$$

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.27, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

$$Ce = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 = \mathbf{0.1896}$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento:

$$V_{ESC} = 0.1896 (1,546.5 \text{ hm}^3) = 293.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales.}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} V_{INF} &= V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} & (2) \\ V_{INF} &= 1,546.5 - 1,087.3 - 293.2 \\ V_{INF} &= \mathbf{166.0 \text{ hm}^3/\text{año}} \end{aligned}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de $1,546.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.11.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de $166.0 \text{ hm}^3/\text{año}$ en los $1,411 \text{ km}^2$ de superficie del acuífero. Por lo que la $Rv = \mathbf{166.0 \text{ hm}^3/\text{año}}$.

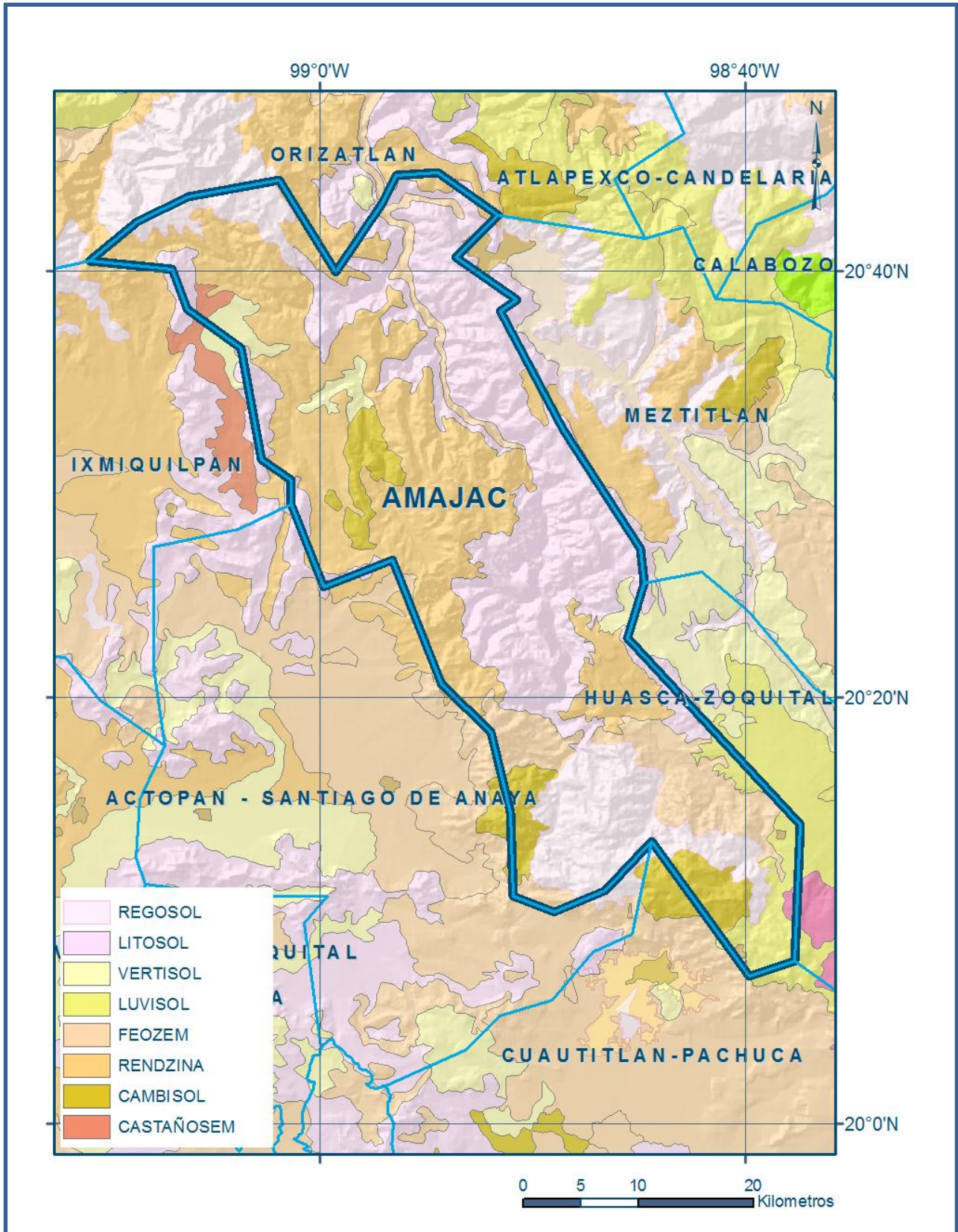


Figura 3. Tipos de suelo

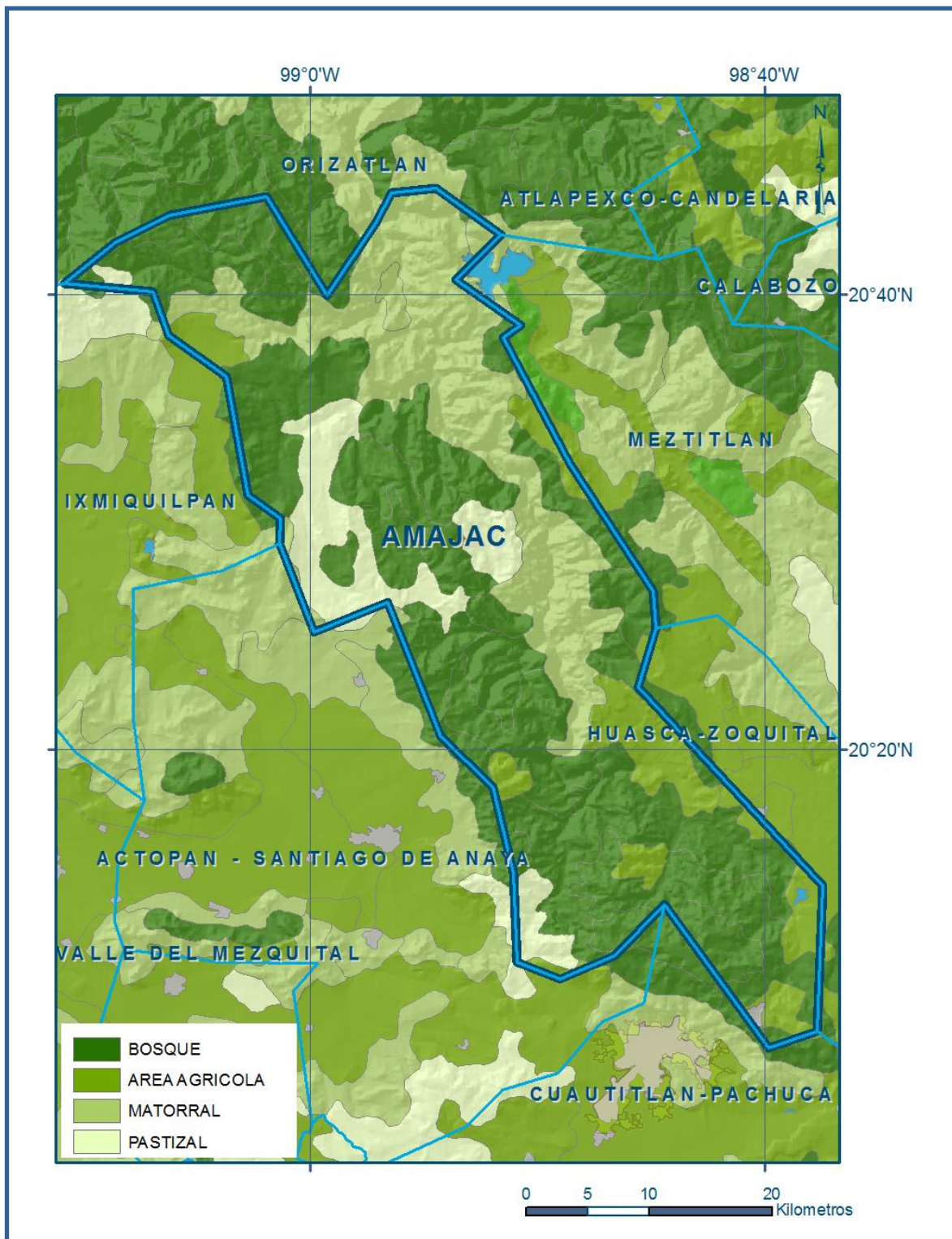


Figura 4. Uso de suelo

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y descarga a través de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **9.8 hm³ anuales**.

7.2.2 Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo realizado en el 2010, se identificó la existencia de 30 manantiales dentro de la zona. El volumen de descarga estimado asciende a **64.0 hm³/año**, medidos agua abajo de los balnearios de Tolantongo, por lo que se consideran independientes del flujo base medido aguas arriba

7.2.3 Descarga natural por flujo base (Dfb)

Debido a la falta de estaciones hidrométricas, se realizaron aforos (en qué mes del año) en diferentes sitios a lo largo del curso de los ríos Amajac y Tolantongo, antes de que reciban el aporte de los manantiales. De acuerdo con los resultados a través del Río Amajac se descargan 1.4 m³/s y 1.7m³/s en el río Tolantongo. Esto representa un caudal de 3.1 m³/s, que equivalen a **97.8 hm³ anuales**.

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 expresión siguiente:

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

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 con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **166.0 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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 natural comprometida corresponde a los volúmenes de agua concesionados de los manantiales, para este caso su valor es **161.8 hm³/año**, de los cuales 64.0 hm³ corresponden a la descarga por manantiales y 97.8 hm³ al flujo base de los Ríos Amajac y Tolantongo.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (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 2011** es de **735,115 m³ anuales**.

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.

$$\begin{aligned} \mathbf{DAS} &= \mathbf{Rt} - \mathbf{DNCOM} - \mathbf{VCAS} \\ \mathbf{DAS} &= 166.0 - 161.8 - 0.735115 \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{3.464885 \text{ hm}^3/\text{año}} \end{aligned}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **3'464,885 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio Geohidrológico para Determinar la Disponibilidad del Acuífero Amajac (1321), en el estado de Hidalgo. Realizado por la empresa Geofísica y Perforaciones del Medio Ambiente, S.C.