



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ALZADA-TEPAMES (0615), ESTADO DE
COLIMA**

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.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural.....	13
4.3 Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de acuífero.....	14
5.2 Parámetros hidráulicos.....	15
5.3 Piezometría.....	16
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	17
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	19
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	20
7.1 Entradas.....	21
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	21
7.1.2 Recarga inducida (Ri).....	22
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.2 Salidas.....	24
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	24
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	24
7.2.3 Descarga de manantiales (Dm).....	24
7.2.4 Evapotranspiración (ETR).....	25
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	26
8. DISPONIBILIDAD.....	27
8.1 Recarga total media anual (R).....	27
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	27
8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS).....	28
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	28
9. BIBLIOGRAFÍA.....	29

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 Alzada-Tepames, definido con la clave 0615 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción nororiental del estado de Colima, entre los paralelos 18° 52' y 19° 30' de latitud norte y entre los meridianos 103° 29' y 103° 40' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 3,784.3 km². Limita al este con el acuífero Ciudad Guzmán, perteneciente al estado de Jalisco; al sur con los acuíferos Valle de Ixtlahuacán y Coahuayana, pertenecientes al estado de Colima y Michoacán respectivamente; al oeste con el acuífero Colima y al norte con el acuífero Autlán, estos dos últimos pertenecientes al estado de Colima (figura 1).

Geopolíticamente el área que cubre el acuífero comprende parcialmente a los municipios de Colima y Cuauhtémoc.

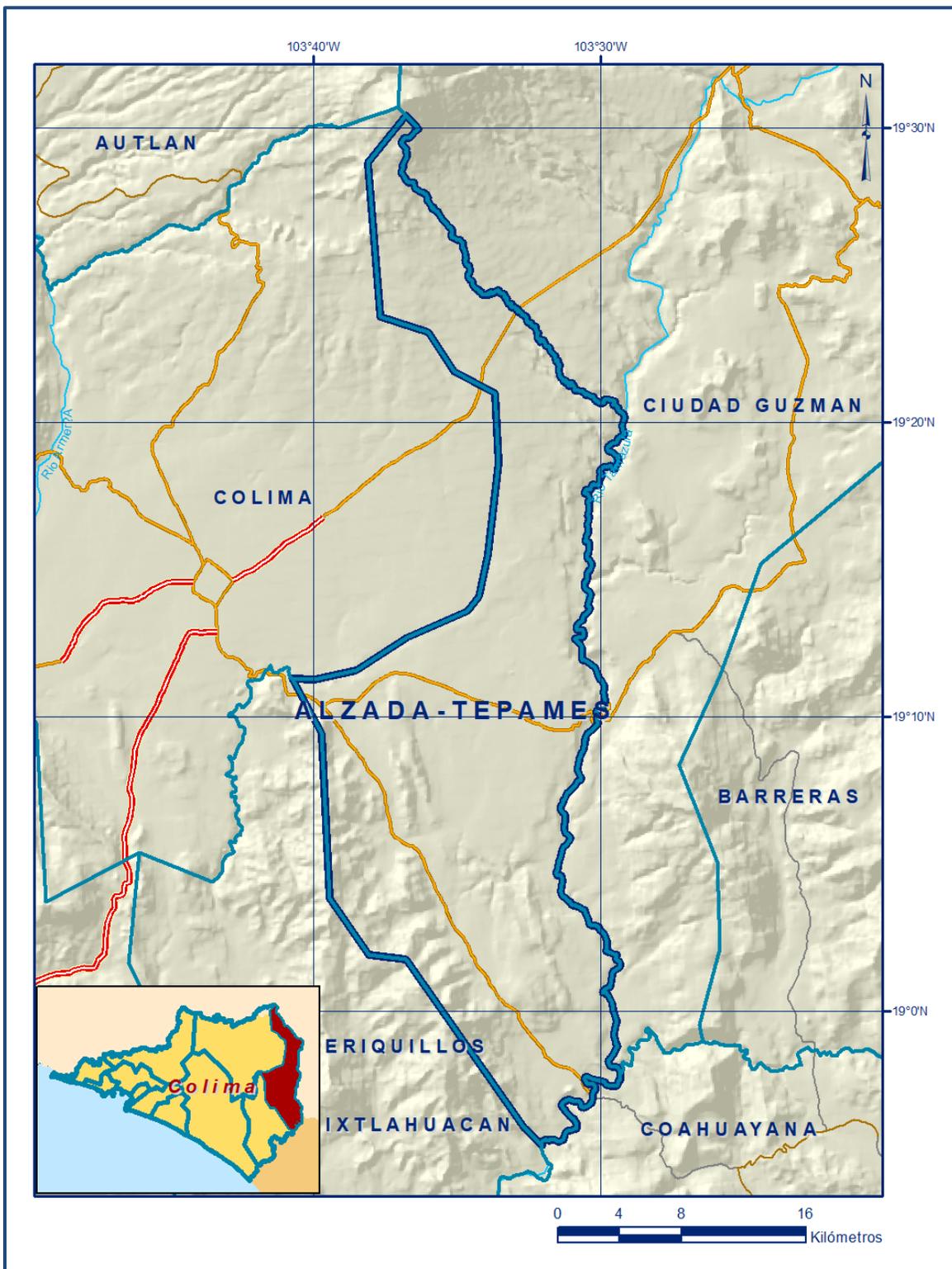


Figura 1. Localización del acuífero

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 0615 ALZADA-TEPAMES							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	40	44.2	19	11	17.4	
2	103	39	58.8	19	11	16.8	
3	103	38	30.8	19	11	35.1	
4	103	36	44.5	19	12	41.4	
5	103	34	37.6	19	13	34.9	
6	103	34	14.8	19	14	4.8	
7	103	33	55.2	19	15	30.5	
8	103	33	32.9	19	18	38.8	
9	103	33	4.14	19	20	59.0	
10	103	35	5.7	19	21	45.1	
11	103	36	0.0	19	23	4.0	
12	103	37	40.7	19	23	36.7	
13	103	38	5.9	19	28	50.4	
14	103	36	45.9	19	30	25.6	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	103	29	18.2	18	57	52.0	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	103	32	2.9	18	55	27.9	
17	103	32	39.4	18	56	2.9	
18	103	36	46.7	19	1	46.8	
19	103	38	4.1	19	1	55.1	
20	103	39	27.2	19	3	50.0	
21	103	39	43.1	19	9	27.0	

1.2 Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Alzada-Tepames pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local de Colima. La totalidad de su territorio se encuentra sujeto a la disposición del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la parte que corresponde a los límites geopolíticos del estado de Colima”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 de septiembre de 1984. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

El uso principal es el agrícola. No existe Distrito o Unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

No se han realizado estudios geohidrológicos de evaluación en el territorio que comprende el acuífero, el único que abarca su superficie es el estudio denominado:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO ALZADA-TEPAMES, EN EL ESTADO DE COLIMA, elaborado por la Universidad Autónoma Chapingo, para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se encuentra en el límite formado por las Provincias Fisiográficas Sierra Madre del Sur (XII) y Eje Neovolcánico (X), las cuales definen la diversa litología, geología y morfología del territorio colimense. Al sur del estado de Jalisco y norte del estado de Colima, se encuentran las dos geoformas más importantes: el Nevado y el volcán de Fuego de Colima, con 4,240 y 3,820 *msnm* respectivamente.

En la misma región, conjuntamente con estas geoformas, se encuentran otras de menores dimensiones como: sierras de laderas abruptas, lomeríos suaves asociados con cañadas y valles de laderas escarpadas.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la zona que corresponde al área del acuífero se localiza en las Provincias Volcanes de Colima y Cordillera Costera del Sur.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación del INEGI, en el territorio que cubre el acuífero, en términos generales, el clima es del tipo cálido-subhúmedo y un régimen lluvioso en verano. Sus variaciones anuales van del predominantemente del clima semiseco, con otoño, invierno y primavera secos, al cálido sin cambio térmico invernal bien definido. En el extremo norte de la cuenca, predomina el clima semifrío subhúmedo subtipo $Cb'(w_2)$ con una variación climática intermedia que va del semiseco, al húmedo, con invierno y primavera secos. Adyacente a esta zona prevalece el clima templado subhúmedo subtipo $C(w_2)$, con una variación climática que va del semiseco y semicálido al húmedo, con invierno y primavera secos, sin estación invernal definida. Conforme la superficie se vuelve menos accidentada, predominan los subtipos $(A)C(w_1)$ y $(A)C(w_2)$ que son, por su grado de humedad, subhúmedos y con relación a su temperatura cálidos. Descendiendo hacia el sur, se extiende un área que ocupa poco más de las dos terceras partes de la cuenca, la cual se encuentra flanqueada por la zona montañosa en su extremo occidental; en esta zona las categorías climatológicas predominantes son de tipo cálido subhúmedo con lluvias en verano, subtipos $A(w_0)$ y $A(w_1)$.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de las estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **808 mm** y **26.9 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **426.10 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia, uno en verano de mayo a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, mayo es el mes más cálido, con una temperatura media de 25.1 °C, en tanto que el mes de enero registra la menor temperatura media, 27.8 °C.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 16 "Armeria-Coahuayana", cuenca del Río Coahuayana. El drenaje se define como subparalelo dendrítico, conformado por corrientes intermitentes y perennes, cuyo escurrimiento llega a desembocar en el Océano Pacífico.

A su vez, este sistema se divide en 10 subcuencas: Tacotán, Corcovado, Las Piedras, El Rosario, Canoas, Armería, Coahuayana-Jalisco, Coahuayana-Colima y Coahuayana-Michoacán. El acuífero de Alzada-Tepames está circunscrito en la cuenca Coahuayana-Colima, en donde las corrientes superficiales se originan en el estado de Jalisco y tienen su mayor aportación en el estado de Colima.

Por la ubicación del acuífero de Alzada-Tepames, resulta de gran interés el río Coahuayana, que constituye el recurso hidrológico superficial más importante de la zona, que al mismo tiempo divide el estado de Colima con los estados de Jalisco y Michoacán. El río Coahuayana inicia su recorrido en el límite noreste del acuífero a la altura de la población de Cuauthémoc.

A partir de este punto de contacto, el río cambia de nombre de río Tuxpan a río El Naranjo, en cuyo recorrido, hasta su confluencia con el río el Cajón, recibe los aportes en su margen izquierda del río El Tule y por su margen derecha del río El Zarco. En la confluencia con el río El Cajón, cuyo escurrimiento proviene de los aportes del río La Tortuga y los desfogues de la presa Trojes, ambos aportes provienen de los estados de Michoacán y Jalisco, cambia de dirección del sur hacia el suroeste. Desde ese punto de confluencia, el río El Naranjo escurre en dirección suroeste, que posteriormente, fuera de los límites del acuífero, se asocia con los aportes del río Salado que drena parte de las aguas superficiales del valle de Ixtlahuacán.

3.4 Geomorfología

Las distintas formas de relieve en el área son reflejo y consecuencia de la historia geológica de la región. La fase de deformación Laramídica ocurrida hacia finales del Cretácico y comienzos del Terciario dio origen a la elevación y plegamiento de las unidades geológicas. Simultáneamente ocurrió el emplazamiento de grandes cuerpos graníticos que conforman sierras altas en la porción noroeste, con formas irregulares a semicirculares y elevaciones de hasta 3,960 msnm en el volcán de Colima.

Un análisis de pendientes muestra que la región de estudio en el norte tiene condiciones morfológicas más abruptas y escarpadas, que la región sur con topografía más suave y plana. El volcán de Colima, actualmente activo, en sus vertientes presenta una fuerte actividad erosiva producto de una densa red de drenaje, altamente inestable debido a la actividad volcánica.

Estas topofomas se observan muy disectadas por barrancas labradas por arroyos y forman pendientes abruptas. Hacia el Terciario Medio y Superior se manifiestan periodos de deformacionales distensivos, que dieron origen a fallamientos de tipo normal, con orientación preferencial noreste-suroeste y norte-sur.

Estas etapas vienen asociadas al desarrollo de fosas tectónicas y vulcanismo de tipo calcoalcalino y afinidad alcalina, que fue el responsable del emplazamiento de grandes depósitos de conglomerados hacia la parte norte y noreste de la zona en estudio.

Las planicies costeras y rellenos sedimentarios, que ocasionalmente forman lomeríos de pendientes suaves, son resultado de intemperismo, erosión y depósito.

Sin embargo, al noreste del área de estudio se observan algunos depósitos recientes de origen volcánico (conglomerados), que forman valles semiplanos como lomeríos, mostrando redes de drenaje poco desarrolladas.

La zona del valle ha sido modelada a través de un corto periodo geológico, donde los rasgos morfológicos se presentan bien definidos, determinando un extenso valle en etapa de desarrollo consolidado.

Este valle está constituido por sedimentos aluviales y fluviales, que en su mayor parte son materiales volcánicos y en menor proporción sedimentos marinos. El valle presenta un drenaje de tipo arborescente bien marcado, con una pendiente algo pronunciada desde el volcán hacia la población de Estapilla.

4. GEOLOGÍA

El acuífero se encuentra situado en dos provincias fisiográficas del país: la provincia Sierra Madre del Sur (SMS) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). La Sierra Madre del Sur (SMS) constituye una gran estructura morfológica formada por un conjunto de bloques montañosos discontinuos y valles de diferentes dimensiones, cuya composición litológica con un basamento de rocas metamórficas fueron desplazadas durante el Jurásico.

Así mismo, en esta región existen rocas volcánicas y vulcanoclásticas del Cretácico temprano y del Terciario, así como formaciones impermeables compuestas de dolomías, calizas recristalizadas y lechos de arcilla, arena y limo del Paleozoico, Triásico y Jurásico (figura 2).

En cambio, los derrames basálticos y la mayoría de las rocas que se extienden en toda la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) se caracterizan por una alta permeabilidad que varía en un amplio rango, controlado principalmente por su grado de fracturamiento, la presencia de tubificaciones en los derrames y la intercalación de material escoriaáceo (Gómez-Tuena et al., 2005).

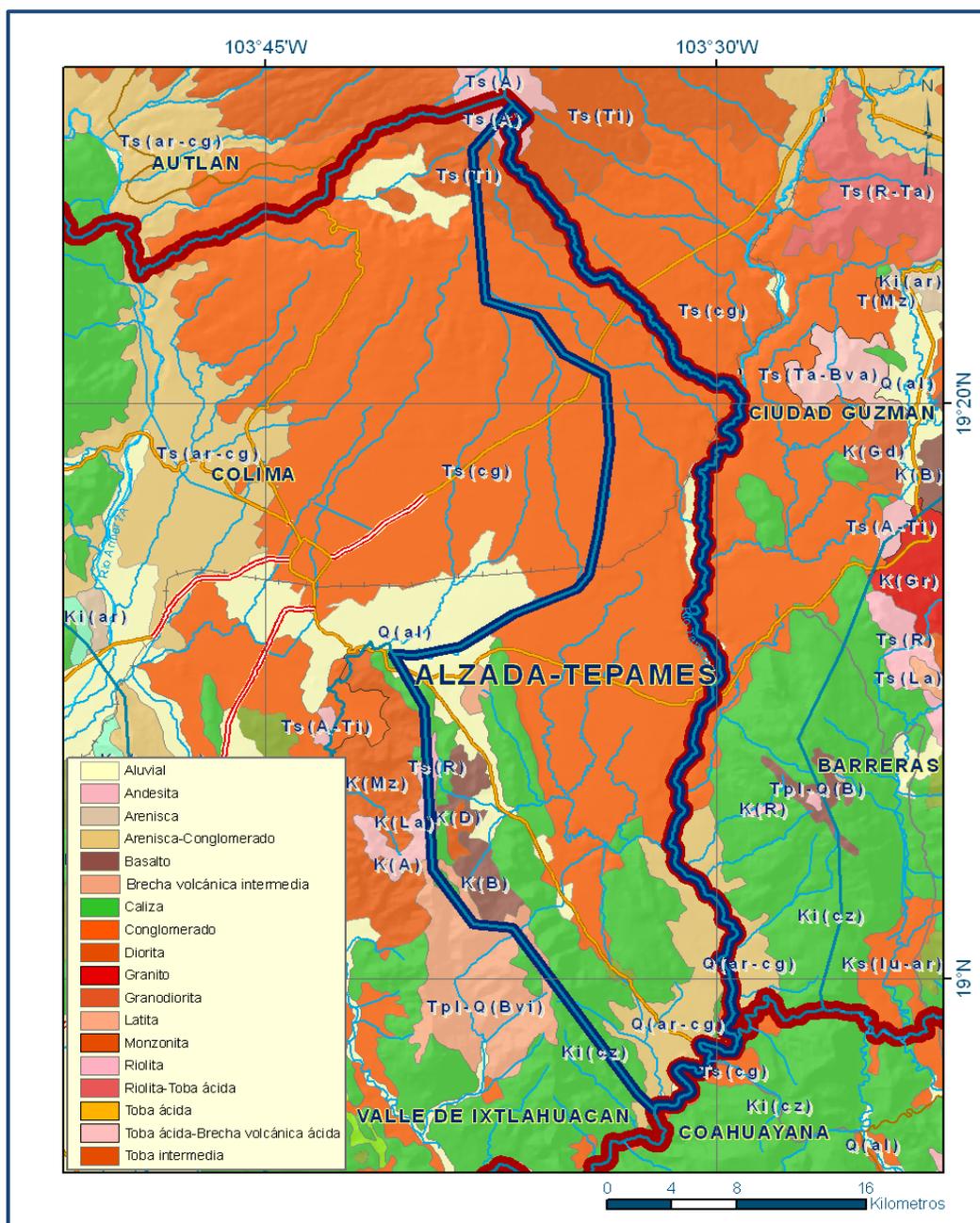


Figura 2. Geología general del acuífero

Por su extensión, características y con base en su geología y tectónica, esta provincia se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental (Ferrari, 2000; Pasquaré *et al.*, 1988).

Dado que el acuífero de Alzada-Tepames pertenece al sector occidental, delimitado entre la falla de Colima y la Provincia Sierra Madre del Sur (Ferrari, 2000), siempre que en lo sucesivo se haga mención de alguna característica de la *FVT* se referirá en particular al sector occidental.

En particular, sobre la cuenca de Alzada-Tepames incide la subprovincia de los Volcanes de Colima, en este sector se aprecia una extensión de derrames basálticos y rocas de alta permeabilidad en función de su grado de fracturamiento, así como derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial en diferentes profundidades que forman acuíferos locales independientes.

En el subsuelo de los valles, los derrames andesíticos funcionan como basamento geohidrológico, sobre el cual se intercalan derrames de rocas no fracturadas con rellenos aluviales en diferentes profundidades, formando acuíferos locales independientes, mientras que la composición riolítica, extendida dentro de las cuencas aluviales, forma acuíferos de gran densidad y moderada permeabilidad debido a su fracturamiento. Así mismo, se tiene la subregión geomorfológica denominada región de las sierras volcánicas y valles internos o intermontanos, constituida por una serie de mesetas y valles altos de rocas sedimentarias continentales del Terciario, aluvión del Holoceno y grandes depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario.

A su vez, la geología del área de estudio está representada principalmente por secuencias volcanosedimentarias, cuerpos batolíticos del Cretácico y Paleógeno, así como depósitos volcánicos y aluviales del Reciente. En algunos sitios, las rocas calcáreas están cubiertas por material terrígeno impermeable del terciario. Esta área constituye el basamento para otras formaciones impermeables compuestas por dolomías, calizas recristalizadas y lechos rojos compuestos de arcilla, arena y limo del Paleozoico, Triásico y Jurásico. Al sur, con dirección al estado de Colima predomina la litología intrusiva con granitos y granodioritas, así como material sedimentario (Velázquez y Ordaz, 1992).

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Jurásico al Reciente. La formación más antigua que existe en el área está compuesta de rocas sedimentarias e ígneas débilmente metamorfoseadas de edad correspondiente al Jurásico–Cretácico. El basamento que sostiene a toda la secuencia volcánica está integrado por rocas volcánicas volcanosedimentarias y sedimentarias marinas relacionadas con procesos de arco magmático insular, el cual se encuentra aflorando al oriente y suroriente del Volcán de Colima, correspondiendo con brechas volcánicas bien consolidadas y andesitas masivas zeolitizadas.

En tal sentido, el Terciario-Superior-Pleistoceno tardío está representado por el grupo del Volcán de Colima, el cual se encuentra constituido principalmente por un conjunto de unidades litoestratigráficas de composición dominante andesítica, formada por derrames de lava y material piroclástico, originados por las diversas emisiones del Volcán de Colima. Esta formación se observa principalmente en la porción norte del acuífero, donde las unidades litoestratigráficas que integran este grupo son: andesita La Lumbre, el lahar Cofradía, andesita El Playón y la grava Cordován, así como depósitos de Toba intermedia y conglomerados.

En la parte central del acuífero, se observa la presencia de unidades del Terciario que se encuentran constituidas por derrames de basaltos y andesitas, y por derrames de piroclásticos de composición riodacítica, representadas por un paquete de ignimbritas de textura eutaxítica y conglomerados. Sobreyace a calizas del Cretácico Inferior y subyacen a rocas vulcanoclásticas del Cretácico Superior y depósitos clásticos del Cuaternario.

Esta unidad está constituida por material clástico con diferentes grados de redondez, producto de la erosión de rocas preexistentes. Aflora en la porción central del área de estudio y en las inmediaciones del río El Naranjo. En la zona aledaña al río El Naranjo está conformada por arenas y gravas, con una gradación de gravas gruesas a finas, provenientes de lahares de aparatos volcánicos localizados al norte del área de estudio. Esta formación se encuentra rellenando las zonas bajas, su morfología es de abanicos aluviales y por su posición estratigráfica se considera de edad Pleistoceno. Presenta permeabilidad alta, debido a su pobre consolidación e intersticios entre clastos con espacios libres o arenosos.

Por otra parte, en la porción sur del acuífero existen paquetes de calizas y arenisca conglomerada, compuestas principalmente por derrubios de rocas volcánicas que han sido cementadas y el producto de la desintegración de las rocas basalto-andesíticas.

La formación calcárea está compuesta de calizas relativamente puras de origen sub-arrecifal, se presentan en bancos masivos con algunos niveles dolomíticos. Los niveles fosilíferos llegan a formar coquinas con espesores considerables, generalmente hacia la parte superior de la secuencia calcárea. De acuerdo a sus características, a estas unidades se les asigna una edad correspondiente al Reciente y, aunque son poco permeables, su espesor es reducido, siendo en este caso transmisores del agua hacia rocas más profundas. Por otra parte, en el área de influencia del río El Naranjo existen intercalaciones de riolita con escasos derrames andesíticos. Estas formaciones son locales, con bancos de escaso desarrollo vertical y horizontal que afloran en particular en la llanura aluvial.

A su vez, los suelos aluviales, de una edad correspondiente al Reciente, están compuestos por materiales granulares como gravas, arenas, limos y arcillas, que se han depositado principalmente en el cauce de la corriente superficial y se encuentran, principalmente, en las partes más bajas de la cuenca. Por último, en la porción occidental del acuífero se encuentra un afloramiento combinado de calizas, basalto, brecha volcánica intermedia, suelos aluviales y entremezclados localmente, diorita y riolita. Esta formación es una secuencia constituida en su base por caliza recristalizada, de textura espática fina con ligeras deformaciones y estructura compacta fracturada; la mineralogía está constituida por calcita, cuarzo, tremolita, hematita, arcilla y trazas de dolomita. Así mismo, esta unidad se compone de alternancias de calizas y vulcanoclásticos; estos últimos se componen por fragmentos subredondeados de roca ígnea extrusiva intermedia y de plagioclasas sódicas, además se asocian con horizontes arenosos de composición tobácea. En este afloramiento en especial se puede apreciar la presencia de arenas y limos producto de la disgregación de la roca preexistente. La unidad presenta fracturas, diques básicos y fallas normales, así como pliegues en los horizontes calcáreos. Esta unidad sobreyace a calizas del Cretácico Inferior y subyacen a rocas vulcanoclásticas del Cretácico Superior y depósitos clásticos del Cuaternario. Debido a las características antes descritas se le atribuye una permeabilidad que varía de baja a media.

4.2 Geología estructural

La región de estudio debe sus rasgos estructurales a su relación con las placas de Cocos y Rivera y su cercanía con los límites entre diferentes bloques estructurales. En tal sentido, el marco tectónico-estructural, que se observa en el área, se originó con las primeras fases tectónicas del Cretácico Superior con la Orogenia Laramide, la cual provocó un plegamiento y levantamiento de las rocas sedimentarias marinas. Durante el Cenozoico Inferior y Medio tuvieron lugar los derrames volcánicos formando montañas de relieves positivos.

Estos eventos deformacionales se presentaron en estrecha relación con el emplazamiento de cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas. Probablemente los movimientos tectónicos del Terciario Superior sean los responsables de la formación de la fosa de Colima; ya que estos movimientos dieron lugar a bloques de la corteza, los cuales debido a la actividad tectónica dieron lugar a la formación de grabens que caracterizan al sector occidental del Eje Neovolcánico. La actividad efusiva del Cenozoico Superior fue la causante de la división de la fosa de Colima en dos sectores, uno de ellos el del Valle de Zapotlán y el otro corresponde con el Llano Grande. Finalmente, en el Pleistoceno y Holoceno tienen lugar la formación de los cerros La Calera y Apaxtepec, constituidos por brechas volcánicas.

Los cuerpos intrusivos provocaron en las rocas sedimentarias calcáreas, al igual que en las secuencias vulcanosedimentarias y metamórficas, la formación de bloques colgados de diversas dimensiones. Dichos cuerpos intrusivos se han denominado Conjunto batolítico de Jalisco, cuyo ambiente geotectónico es de raíz de arco (Ortega, 1992); tiene una migración temporal del Cretácico al Terciario Inferior y espacial de la región costera a las zonas internas continentales; los del Terciario Inferior se muestran en el noreste y centro del estado en forma de troncos y diques.

En el área de Alzada-Tepames, afloran rocas de la edad Cretácica que fueron afectadas por la Revolución Laramídica, dando origen a fallas, pliegues y cabalgaduras, que forman sierras en herradura y una morfología abrupta de tipo complejo. Los pliegues son notorios preferentemente en unidades sedimentarias como las formaciones calcáreas, no así en rocas volcánicas como los basaltos y las rocas ígneas. Los pliegues y fallamientos regionales son de orientación general noroeste-sureste, también con fallas de rumbo nor-noreste y sur-suroeste, aunque en el área de estudio las fallas mejor expuestas muestran un rumbo general norte-sur, provocado por el sucesivo levantamiento de estas formaciones. Se reconocen otras fallas asociadas de menores dimensiones, que interceptan a las estructuras más antiguas.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, podemos afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su parte superior, por los depósitos de rocas volcánicas de composición basáltica e ígnea intrusiva ácida; en tanto que en la parte inferior está conformado por depósitos lacustres y vulcanoclásticos.

Los límites de la porción oriental del acuífero coinciden con el sistema natural de no flujo, donde confluyen en dirección opuesta las líneas de flujo de los acuíferos de Ciudad Guzmán y Coahuayana, constituyendo el río El Naranja una condición natural de frontera que delimita el flujo regional. En Cambio, en el occidente, en los límites con los acuíferos de Colima y Valle de Ixtlahuacán, el comportamiento hidrogeológico es independiente por el parteaguas hidrológico que separa naturalmente los acuíferos. De acuerdo a la geología del subsuelo, la explotación se efectúa principalmente en el acuífero granular; sin embargo, en ciertos casos la explotación se extiende hasta el acuífero fracturado, especialmente cuando los pozos son de abastecimiento urbano, indicando, a su vez, que existe una continuidad hidráulica entre ambas formaciones hidrogeológicas.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, donde es posible reconocer dos unidades hidrogeológicas (uno de tipo fracturado y el otro de tipo granular), con interconexión hidráulica entre ellas: las unidades superiores son intercalaciones de conglomerados y suelo aluvial, que en algunos pozos se interdigitan con limos y arcillas o aglomerados en matriz arcillosa, lo que sugiere algún grado de confinamiento pero que en general tiende a conformar un sistema libre. Su espesor es reducido y es la unidad donde se está explotando el agua con obras someras, aunque también existen aprovechamientos instalados mediante pozos profundos. Esta disposición de suelos aluviales es típica en las zonas topográficamente más bajas, donde se asientan algunas poblaciones, como por ejemplo Estapilla, Tinajas y Los Tepames, cuyas actividades principales son muy limitadas y restringidas. Desde el punto de vista del sistema flujo, el área de influencia de esta unidad coincide con la zona de descarga, donde confluye el sistema de flujo local e intermedio.

Por otra parte, en gran parte de la superficie del acuífero se encuentran las unidades constituidas por rocas carbonatadas y conglomerados, que constituyen las formaciones predominantes en el área, con una permeabilidad que se clasifica entre media alta dependiendo del grado de fracturación. Estas condiciones caracterizan al acuífero de tipo semiconfinado, caracterizado por un gradiente hidráulico que se desarrolla en las áreas de recarga situadas en el Volcán de Colima, constituyendo un típico acuífero aluvial con un sistema de flujo que confluye en las áreas de descarga. Una condición particular en este acuífero es la frontera natural representada por el cauce del río El Naranjo, donde convergen las líneas de flujo de los acuíferos Alzada-Tepames y Ciudad Guzmán en el estado de Jalisco.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2010, se realizaron 5 pruebas de bombeo de larga duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob, tanto en etapa de abatimiento como recuperación. Se pueden distinguir tres zonas de transmisividad: por una parte, los valores representados por el pozo localizado en un área compuesta por sedimentos aluviales y brechas volcánicas (pozo 37), con valores de transmisividad que oscilan entre **0.1 a 0.4 x 10⁻³ m²/s**, que por su ubicación en el extremo del acuífero deberían tener mayores valores de transmisividad.

En este pozo destaca el hecho que la presencia de brechas volcánicas no favorece la condición hidrodinámica del área de captura del pozo o la fracturación de la formación geológica que atraviesa el pozo no tienen las condiciones favorables para su explotación. La segunda zona de transmisividad se desarrolla en áreas que contienen materiales carbonatados entremezclados con material que proviene de la desintegración de las rocas basalto-andesíticos (pozo 18). Las pruebas de bombeo en este pozo proporcionaron valores de transmisividad variables, cuyos valores fluctúan en el rango de **7 a 15 x 10⁻³ m²/s**. La característica hidrodinámica de este pozo tiene una condición de explotación aceptable, que se favorece, de acuerdo a las características geológicas, por la fracturación de la caliza, lo que induce a pensar que el pozo se asienta sobre una zona de alta permeabilidad que favorece que el área de captación del pozo intercepte el flujo de recarga que proviene del límite oeste del acuífero. El grupo de pozos que están localizados sobre afloramientos de conglomerados entremezclados localmente con material carbonatado, con valores de transmisividad que oscilan entre **5 a 10 x 10⁻³ m²/s** (pozos 4, 82 y A9).

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 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010 (figura 4), muestra valores que varían de 1 a 45 m, los menores valores están en el área de la población de Quesería, donde se ubica la zona de recarga y las mayores pendientes del terreno. Así mismo, en las estribaciones de la porción oeste del acuífero en el límite con el acuífero de Colima, donde inicia la sierra que limita la frontera suroeste del acuífero, el nivel estático es de 3 m.

En las áreas próximas a las poblaciones de Tinajas y Estapilla se observan valores del nivel estático de 25 m, que también pueden asociarse con zonas de intensa actividad agrícola ya que el consumo público de estas poblaciones no justifica estos valores del nivel estático.

En cambio, en las estribaciones de la sierra que se ubica en el suroeste del acuífero se observan valores del nivel estático de 45 m, debido a las formaciones montañosas que circundan al acuífero, donde las cargas hidráulicas son mayores para generar el gradiente hidráulico que define la dirección de flujo.

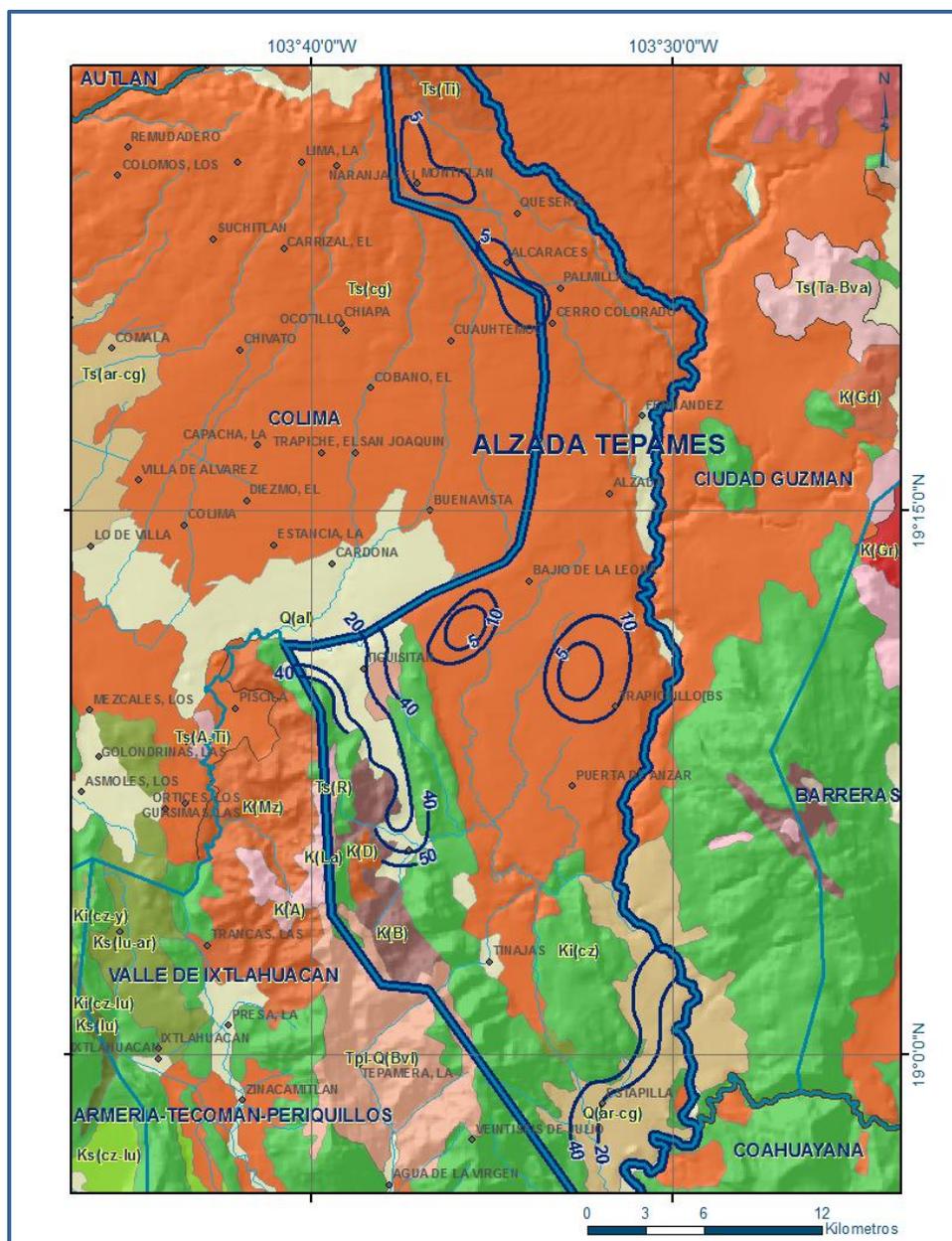


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5, se observa que los valores varían de 300 a 1,473 msnm, la configuración del nivel estático en las laderas del volcán de Colima, define un sistema de flujo con dirección del norte hacia el sur, que converge en parte con el curso del río El Naranjo, el cual se asocia, así mismo, con el sistema de flujo del acuífero de Ciudad Guzmán.

Por otra parte, se tiene el sistema de flujo que se genera en la porción del flanco derecho y que tiene una dirección preferencial hacia el sureste pasando por las poblaciones Los Tepames y Tinajas para confluir con el anterior sistema de flujo en el extremo sur del acuífero. Las condiciones de explotación del acuífero no definen conos de abatimiento críticos, en las regiones donde existen principales asentamientos humanos, manteniendo el sistema de flujo una dirección preferente al sureste, excepto en la zona central donde existe una intensa actividad agrícola.

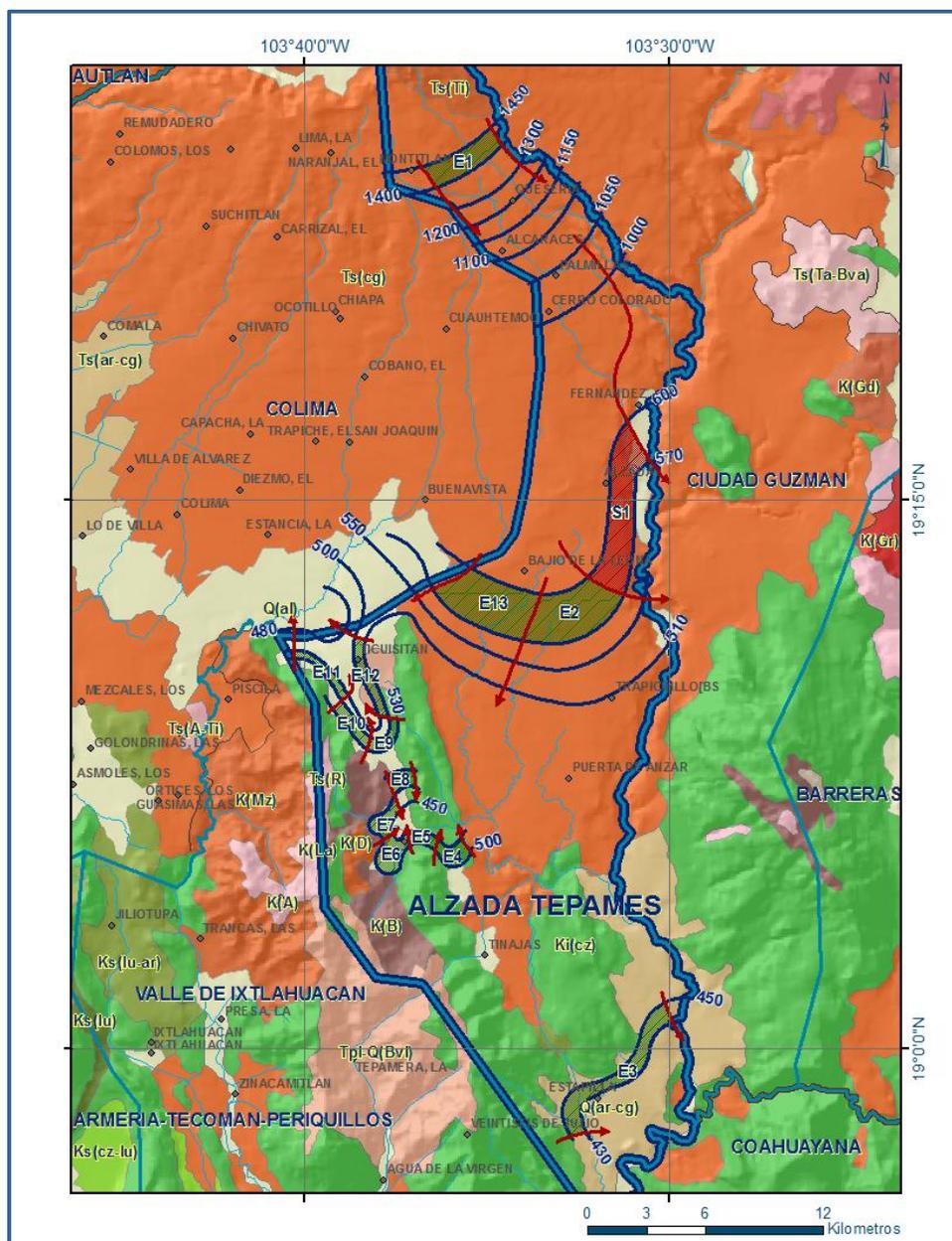


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica consistente que permita elaborar la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en 2010 muestran una gran dispersión espacial y valores inconsistentes, de tal manera que no fue posible realizar una configuración de evolución del nivel estático. Adicionalmente, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo.

Por estas razones, 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. Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

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

La calidad del agua se determinó a partir de los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, de los que se puede observar que los valores de sólidos totales disueltos (STD) varían de 159 a 1,155 ppm, la mayoría de las muestras no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 ppm establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, excepto en un aprovechamiento donde se obtuvo un valor de 1,155 ppm.

De manera general, el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, según la clasificación establecida por la APHA, ya que el promedio en los aprovechamientos muestreados es de 717 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que no rebasa el límite para el agua dulce de 2,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las temperaturas registradas en los sitios de muestreos varían de 19.8° C a 31.6° C y el pH variable de 7.0 a 9.0.

Con respecto a las familias del agua, las que predominan en el acuífero son las: bicarbonatada cálcica magnésica (HCO_3^-Ca/Mg), bicarbonatada sulfatada cálcica-magnésica ($HCO_3^-SO_4^-Ca/Mg$) y la sulfatada sódico-cálcica (SO_4^-Na/Ca), que representa aguas más evolucionadas, que tuvieron intercambio iónico con las rocas que conforman el medio geológico.

Un parámetro que ha resultado primordial para la evaluación de la contaminación de los acuíferos es la concentración de arsénico inorgánico disuelto (*iAs*), la cual puede ser provocada por la incorporación de contaminantes de origen antropogénico desde la superficie y/o por los procesos naturales de interacción agua-roca en medios geológicos específicos. La norma define concentraciones límite que van de $0.025\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para uso doméstico (NOM, 2021) a $0.100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para uso agrícola (SEDUE, 1989). El 100% ($n=20$) de pozos analizados se sitúa dentro del rango permisible para uso doméstico, con una concentración promedio de $0.0013\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($0 < As < 0.003$). El arsénico forma parte de la estructura química de numerosos minerales, aunque se asocia principalmente con los yacimientos ricos en sulfuros y con las rocas riolíticas-ignimbríticas que incorporan este catión al agua subterránea en condiciones de oxidación (Ortega-Guerrero, 2009).

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2010, se registraron un total de 157 obras en el acuífero, del total de obras, 142 están activas y 15 inactivas.

El volumen de extracción asciende a **5.1 hm³ anuales**, de los cuales 3.9 hm³ (76.5 %) se destinan al uso agrícola, 0.7 hm³ (13.7 %) se utilizan para uso público-urbano y 0.5 hm³ (9.8 %) en otros usos.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2010, en una superficie de 324 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (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, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Recarga por flujo subterráneo horizontal;

R_i = Recarga inducida;

B = Bombeo;

S_h = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

D_m = Descarga por manantiales;

ETR = Evapotranspiración;

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Recarga inducida (R_i)

El rango típico de pérdidas por fugas en las redes de distribución es del orden del 20 % al 45 %. Los valores altos de pérdidas aplican a redes de distribución con muchos años de operación o cuya integridad estructural se ve sometida a esfuerzos producto de la subsidencia, terremotos o incrementos de presión. En las redes de distribución de las principales poblaciones en la cuenca de Alzada-Tepames no hay evidencia de que estos factores adversos afecten substancialmente las pérdidas por fugas. Además, la distribución de los pozos tiene una configuración en la que los puntos de extracción no se encuentran distantes de las tomas de uso final. Por consiguiente, para el cálculo de fugas en la red de distribución en el acuífero de Alzada-Tepames se consideró un valor del 20 %.

De este modo, esta componente del balance se calculó como la suma del total de las concesiones registradas en el censo de aprovechamientos del 2010 como público urbano. Así, dicho volumen total anual de extracción concesionado bajo estas condiciones asciende a 0.70 hm³/año, que al multiplicarse por 0.20 se tiene un volumen de fugas en la red de distribución de 0.10 hm³/año. Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo y a la correlación entre acuíferos, se consideró un 20% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a los 5 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo. Por lo que el volumen de entradas por retornos de riego asciende a 0.80 hm³ anuales. Por lo que, en conjunto, el volumen total de recarga inducida asciende a **$R_i = 0.9 \text{ hm}^3$ anuales.**

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. Las entradas al acuífero, tienen su origen en las zonas de recarga localizadas en las sierras que rodean al valle. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

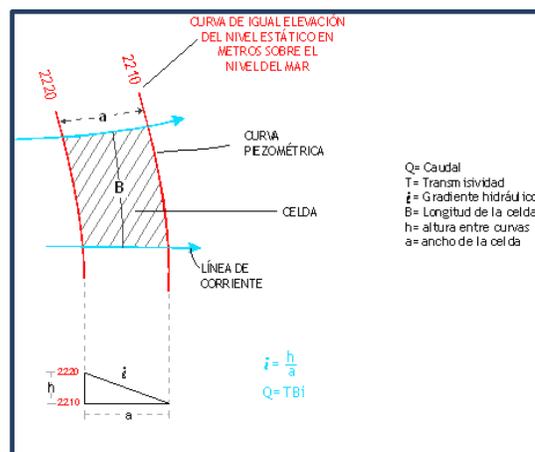
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



Partiendo de esta configuración se seleccionó un canal de flujo para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas. El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2010 se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

Canal	LONGITUD B	ANCHO a	h_2-h_1	Gradiente	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
	(m)	(m)	(m)	hidráulico i^2	(m^2/s)	(m^3/s)	($hm^3/año$)
E1	3925	1155	50	0.0433	0.0005	0.085	2.7
E2	5075	2310	30	0.013	0.0008	0.0527	1.7
E3	8080	925	20	0.0216	0.0005	0.0874	2.8
E4	1845	925	50	0.0541	0.0005	0.0499	1.6
E5	1615	690	50	0.0725	0.0008	0.0936	3
E6	1385	1155	50	0.0433	0.0005	0.03	0.9
E7	2540	925	50	0.0541	0.0005	0.0686	2.2
E8	1155	1155	30	0.026	0.0003	0.009	0.3
E9	2540	810	20	0.0247	0.0003	0.0188	0.6
E10	2770	575	20	0.0348	0.0008	0.0771	2.4
E11	3230	690	10	0.0145	0.001	0.0468	1.5
E12	4615	690	10	0.0145	0.001	0.0669	2.1
E13	4615	2310	30	0.013	0.0005	0.03	0.9
Total entradas							22.6

Los valores de T utilizados corresponden al promedio de los obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas tanto en este acuífero como en otros acuíferos vecinos, adaptados al espesor saturado de las celdas de flujo.

De los resultados mostrados en la tabla anterior, se observa que el valor para las entradas por flujo subterráneo asciende a **22.6 hm³ anuales**.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) de niveles freáticos someros. No existen descargas por flujo base (Dfb).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **5.1 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2011, mostrada en la figura 4. En la tabla 3 se muestra el valor obtenido en la única celda de salida.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2010)

CANAL	LONGITUD B	ANCHO a	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
S1	7385	1500	30	0.020000	0.0008	0.1182	3.7
Total salidas							3.7

El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **3.7 hm³/año**.

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

Puesto que no se dispone de un registro histórico de niveles ni de los aforos en los manantiales del acuífero, un cálculo aproximado de esta componente con base en los caudales estimados durante las visitas de campo permitió estimar un caudal de 2.0 hm³/año en el manantial El Naranjito y un caudal de 1.1 hm³/año en el manantial Los Tepames, lo cual da lugar a un valor de Dm = 3.1 hm³/año.

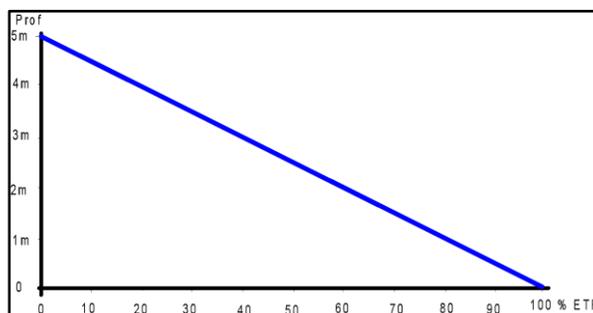
7.2.4 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

T (°C) =	26.9		
P(mm) =	808	P ² =	652864
L =	1945.75545	L ² =	3785964.27
ETR (mm)	780.2		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. Tomando en cuenta una superficie de 40 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y una lámina de evapotranspiración obtenida de 780.2 mm. $ETR = 40 \text{ km}^2 (0.7802 \text{ m}) (0.4) = 12.5$ Por lo tanto; **ETR = 12.5 hm³/año.**

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no muestran consistencia, se registran valores extremos tanto positivos como negativos en distancias relativamente cortas. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; por lo que **$\Delta V(S) = 0$.**

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + D_m + ETR \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2) \\ R_v &= 5.1 + 3.7 + 3.1 + 12.5 + 0.0 - 22.6 - 0.9 \\ R_v &= 0.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 0.9 + 22.6 + 0.9 \\ R &= 24.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego. Para este caso su valor es **24.4 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso de este acuífero la descarga natural comprometida es **9.3 hm³ anuales**, En este balance, la descarga natural comprometida está constituida por las descargas de los manantiales y las pérdidas por evapotranspiración de los niveles estáticos someros, considerando el aporte de agua subterránea hacia el flujo base de las corrientes superficiales como nulo, dado que no existe conexión hidráulica entre el agua superficial y el acuífero. Se considera como comprometido el 50% del volumen de evapotranspiración (6.2 hm³/año) y el volumen de descarga por manantiales.

8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (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 (REPGA), 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 **14,572,533 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 24.4 - 9.3 - 14.572533 \\ \text{DMA} &= 0.527467 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **527,467 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para Determinar la Disponibilidad del Acuífero Alzada-Tepames, en el Estado de Colima. Elaborado por la Universidad Autónoma del Estado de México.