



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE ACÁMBARO (1117),
ESTADO DE GUANAJUATO**

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.....	7
3.1. Provincias fisiográficas.....	7
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrografía.....	9
3.4. Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1. Estratigrafía.....	11
4.2. Geología estructural.....	15
4.3. Geología del subsuelo.....	17
5. HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1. Tipo de acuífero.....	19
5.2. Parámetros hidráulicos.....	20
5.3. Piezometría.....	20
5.4. Comportamiento hidráulico.....	20
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	21
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	22
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	23
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	25
7.1. Entradas.....	25
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	26
7.1.3. Recarga incidental (Ri).....	28
7.2. Salidas.....	28
7.2.1. Bombeo (B).....	28
7.2.2. Descarga a través de manantiales (Dm).....	28
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	29
8. DISPONIBILIDAD.....	30
8.1. Recarga total media anual (R).....	30
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	31
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	31
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	31
9. BIBLIOGRAFÍA.....	33

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 Valle de Acámbaro, definido con la clave 1117 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo suroriental del estado de Guanajuato, entre los paralelos 19° 56' y 20° 12' de latitud norte y los meridianos 100° 21' y 100° 55' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 1,123 km². Limita al norte con el acuífero Valle de La Cuevita, al noroeste y oeste con Salvatierra-Acámbaro, al suroeste con el acuífero Lago de Cuitzeo, todos ellos pertenecientes al estado de Guanajuato, al sur y este con el acuífero Maravatío-Contepec-E. Huerta, perteneciente al estado de Michoacán (figura 1).

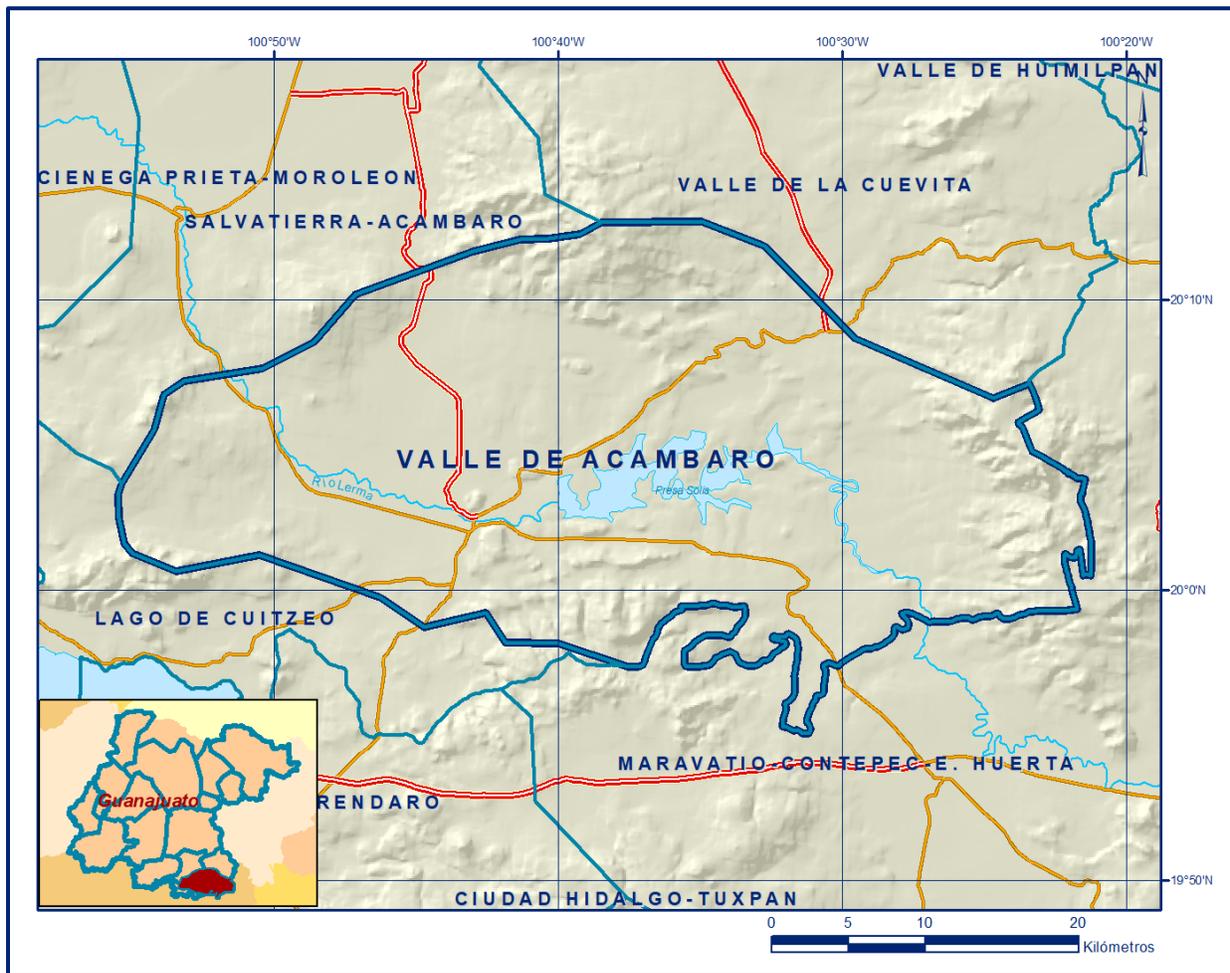


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero cubre completamente el municipio de Tarandacuao, la mayor parte de Acámbaro y Jerécuaro; así como pequeñas porciones de Salvatierra y Tarímoro.

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 1117 VALLE DE ACAMBARO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	40	1.3	19	58	11.3	
2	100	41	52.8	19	58	13.5	
3	100	42	34.0	19	59	14.7	
4	100	44	44.1	19	58	44.5	
5	100	46	16.7	19	59	46.0	
6	100	50	31.6	20	1	13.3	
7	100	53	26.2	20	0	40.1	
8	100	55	0.5	20	1	16.4	
9	100	55	16.7	20	1	37.4	
10	100	55	29.0	20	2	30.3	
11	100	55	30.5	20	3	18.9	
12	100	55	21.8	20	3	40.0	
13	100	54	13.3	20	5	32.6	
14	100	53	52.6	20	6	44.8	
15	100	53	11.2	20	7	12.8	
16	100	50	24.9	20	7	38.1	
17	100	48	35.7	20	8	32.4	
18	100	47	9.2	20	10	12.6	
19	100	43	0.2	20	11	42.1	
20	100	41	20.1	20	12	6.2	
21	100	40	20.6	20	12	7.0	
22	100	39	14.0	20	12	16.1	
23	100	38	30.2	20	12	40.9	
24	100	34	58.5	20	12	42.9	
25	100	32	46.9	20	11	52.1	
26	100	29	32.4	20	8	40.6	
27	100	24	42.2	20	6	37.9	
28	100	23	25.6	20	7	7.1	DEL 28 AL 29 POR EL LIMITE ESTATAL
29	100	37	38.1	19	57	23.7	
1	100	40	1.3	19	58	11.3	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VII “Lerma-Santiago-Pacífico”, al consejo de Cuenca Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guanajuato.

Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda.

La mayor parte de la superficie del acuífero está regido por el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en diversos Municipios del Estado de Guanajuato”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 14 de noviembre de 1983; esta veda se clasifica como tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Una pequeña área de la porción sur del acuífero está regida por el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de los terrenos que ocupa y circunda la laguna de Los Azufres, en el estado de Michoacán”, publicado en el DOF el 13 de febrero de 1956; esta veda se clasifica como tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

El principal uso del agua subterránea es el agrícola.

Dentro del territorio del acuífero se localiza una pequeña porción del Distrito de Riego Alto Río Lerma.

Los usuarios se encuentran organizados y constituidos en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Acámbaro-Cuitzeo, instalado el 25 de agosto de 1999.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, los estudios más relevantes se describen a continuación:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO Y MODELO MATEMÁTICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE ACÁMBARO, GTO. Elaborado por Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C.V., para la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG) en 1999. Los objetivos principales fueron: determinar las estructuras geológicas que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea, determinar la superficie piezométrica del acuífero, cuantificar y delimitar las zonas de recarga y descarga del acuífero, realizar el balance hidrogeológico del acuífero y representar las condiciones hidrogeológicas del acuífero mediante un modelo matemático.

SEGUIMIENTO DEL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE ACÁMBARO, GTO. Elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C.V., para la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG) en 2000. Sus objetivos principales fueron difundir los resultados de los estudios hidrogeológicos de los acuíferos del estado, conocer las características bajo las cuales se está extrayendo el agua subterránea en los acuíferos y plantear el balance del agua subterránea.

ESTUDIOS PARA LA INTEGRACIÓN DEL PLAN DE MANEJO DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS VALLE DE ACÁMBARO, IRAPUATO-VALLE, PÉNJAMO-ABASOLO Y SILAO-ROMITA EN EL ESTADO DE GUANAJUATO Y EL ACUÍFERO VALLE DE AMAZCALA EN EL ESTADO DE QUERÉTARO. Elaborado por el Colegio de Postgraduados de la Universidad Autónoma de Chapingo., para la Comisión Nacional del Agua en 2003. Este estudio tuvo por objetivos: Proponer la explotación racional de los acuíferos, integrar las características básicas de disponibilidad, uso y aprovechamiento del agua, cuantificar el volumen de extracción por bombeo, estimar la situación actual de la relación costo-beneficio de la sobreexplotación, implementar una interfaz en el modelo de simulación de flujo subterráneo para evaluar diferentes escenarios, definir las componentes de recarga y descarga que intervienen en el balance hidráulico integral, así como formular y analizar la propuesta del Plan de Manejo y elaborar una propuesta de reglamento del acuífero.

ACTUALIZACIÓN DEL INVENTARIO DE APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS PARA LOS ACUÍFEROS DE SALVATIERRA-ACÁMBARO, VALLE DE ACÁMBARO, VALLE DE LA CUEVITA Y LAGO DE CUITZEO, GTO. Elaborado por Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente S.C., para la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato en 2006. Los principales objetivos fueron actualizar el censo e hidrometría de los aprovechamientos de aguas subterráneas, clasificar el volumen de extracción por usos, establecer los límites entre las zonas de abastecimiento público urbano, industrial, agrícola con riego de agua subterránea y superficial y rediseñar la red de pozos piloto.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LOS ACUÍFEROS, VALLE DE CELAYA, VALLE DE ACÁMBARO Y LAGO DE CUITZEO, EN EL ESTADO DE GUANAJUATO. Realizado en 2013 por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, Dirección Local en Guanajuato. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, definir el modelo conceptual de funcionamiento, 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, nivelación de brocales, interpretación de pruebas de bombeo y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar 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. Provincias fisiográficas

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas de Raisz (1964), el acuífero se localiza en la provincia fisiográfica “Eje Neovolcánico”; según la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la porción oriental del acuífero se ubica en la subprovincia “Mil Cumbres” y la porción occidental en la subprovincia “Sierras y Bajíos Michoacanos”.

El “Eje Neovolcánico” es una provincia cenozoica de origen volcánico formada en un ambiente tectónico de arco continental (Ortega-Gutiérrez et al., 1992), que se caracteriza por una secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica producto de coladas de lava, conos cineríticos, domos de lava, maars, volcanes escudo, volcanes compuestos y calderas, que se emplazaron en episodios sucesivos entre el Mioceno y Cuaternario. Está orientado en dirección este-oeste atravesando la porción central de la República Mexicana. Uno de los rasgos más característicos es la presencia de una franja de estratovolcanes que se extienden casi en línea recta alrededor del paralelo 19°. Además de estos estratovolcanes y volcanes tipo escudo, esta provincia también incluye sierras volcánicas, grandes coladas de lava, depósitos de ceniza, así como estructuras de calderas volcánicas. De oeste a este los volcanes más importantes son el volcán de Colima, Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Pico de Orizaba, Cofre de Perote y La Malinche.

Las subprovincias se caracterizan por predominar en ella derrames basálticos, numerosos volcanes y lagos, cuya morfología, orientación y distribución sugieren que representan fosas tectónicas, por lo que también se le conoce con el nombre de Zona de Fosas Tectónicas. Dentro de esta provincia fisiográfica “Sierras y Bajíos Michoacanos”, se encuentran lagos formados en depresiones tectónicas (grabens), causadas por fallas, así como por el vulcanismo de la región que propició el cierre de cuencas hidrográficas y la acumulación de aguas superficiales que dieron origen a numerosos lagos.

Los más sobresalientes corresponden a Chapala, Cuitzeo y Yuriria. También existe en ella un gran número de depresiones con orientación perpendicular al Eje Neovolcánico, es decir norte-sur.

En la cercanía de la zona en estudio se encuentran los conos volcánicos conocidos como Cerro de Cuevas de Moreno y Cerro de Los Agustinos.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, en el área cubierta por el acuífero predominan los climas templados subhúmedos, que por su cobertura espacial las más importantes son las variedades (A)C(w0)(w) y C(w1)(w) que cubren el 52 y 46 % de su territorio, respectivamente. El tipo (A)C(w0)(w) equivale a un clima semicálido, subhúmedo, de tipo menos húmedo.

La precipitación del mes más seco es menor de 40 mm y presenta una temperatura media anual mayor de 18°C. El tipo C(w1)(w), corresponde a clima templado, subhúmedo, con humedad media y temperatura media anual entre 12° y 18°C. En ambos tipos de clima el régimen de lluvias es en verano, con lluvias máximas que se registran en el periodo mayo-octubre, mientras que la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm; el porcentaje de lluvia invernal es menor de 5%. En el 2% restante de la superficie de acuífero se presentan climas C(w0)(w) templado subhúmedo y C(E)(w2)(w), semifrío subhúmedo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 10 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Acámbaro, Jerécuaro, Presa Solís, Salvatierra, Tarandacuao, El Dormido, Hacienda San Lucas, Parácuaro, El Gigante y Huingo, con varios periodos de registro, el más amplio comprende 1941-2012 y el más corto 1980-2012.

Con estos datos y utilizando el método de polígonos de Thiessen se determinaron los valores de precipitación y temperatura media anual de **723.4 mm/año** y **18.6 °C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial media, se obtuvo un valor de **1,850 mm/año**, el máximo valor medio se presenta en el mes de mayo.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia; uno de junio a septiembre correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los sistemas frontales que afectan la región.

Julio es el mes más lluvioso y mayo el más seco. Los valores medios máximos de temperatura se presentan en mayo, con un promedio de 22 °C.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica, cuencas Río Lerma-Salamanca y Río Lerma-Toluca, que cruzan el municipio de Acámbaro con dirección este-oeste y capta un gran número de escurrimientos provenientes de las zonas elevadas.

El río Lerma es la corriente superficial más importante de la región. Dentro del acuífero este río atraviesa su porción central, con dirección este hasta la ciudad de Acámbaro, desviándose después al noroeste, hacia Salvatierra.

Es el río interior más largo de México con una 708 km de longitud, se origina en los manantiales de Almoloya del Río, en el estado de México, a una altitud promedio de 2500 msnm, atraviesa hacia el noroeste del Valle de Toluca, y descarga en el lago de Chapala, a una altitud de 1524 msnm.

Entre los arroyos más importantes destacan: El Oyamel, Sanguijuela, Nacional, Tarandacua, La Luna, San José Cahuaro, San Antonio, Rancho Viejo y El Tigre. Existe un manantial de aguas alcalinas termales (32°C) llamado San Nicolás. En el territorio del acuífero se encuentra la Presa Solís, dos presas de menor tamaño (Santiaguillo y Santa Clara) así como algunos bordos para almacenamiento de agua para abrevadero: El Potrerito, Santo Niño y Piedras Azules.

3.4. Geomorfología

Los rasgos morfológicos de la zona están relacionados con estructuras volcánicas; los más abundantes son los cerros de forma cómica que están asociados a conos volcánicos que representan antiguos volcanes.

Existen zonas como la ubicada entre Salvatierra y La Cueva, donde estas estructuras son muy frecuentes y continuas, que dan lugar a sierras alargadas en sentido E-W, en las que se agrupan una gran cantidad de conos volcánicos cuyos puntos de emisión (cráteres) están orientados E-W y NW-SE. También existen montañas de forma cómica cuya topografía está asociada con estratovolcanes.

Adicionalmente en la zona de estudio se presentan estructuras volcánicas de forma amplia y suave; originadas por derrames de lava basáltica que fueron emitidas a través de zonas de debilidad con orientación NE-SW (fallas normales) o bien a través de volcanes de escudo. Otras geoformas típicas de la región son las depresiones topográficas que quedaron entre las sierras y cerros, las cuales alojan lagos.

4. GEOLOGÍA

En la región afloran rocas volcánicas y sedimentarias. Las rocas más antiguas corresponden a la secuencia volcánica constituida por rocas riolíticas y derrames de andesita cuya edad se ha asignado al Oligoceno-Mioceno por su posición estratigráfica, aunque es motivo de discusión, en esta unidad se encuentra emplazado un stock de composición diorítica, de color gris claro a gris verdoso y verde oscuro cuando está cloritizado (Figura 2).

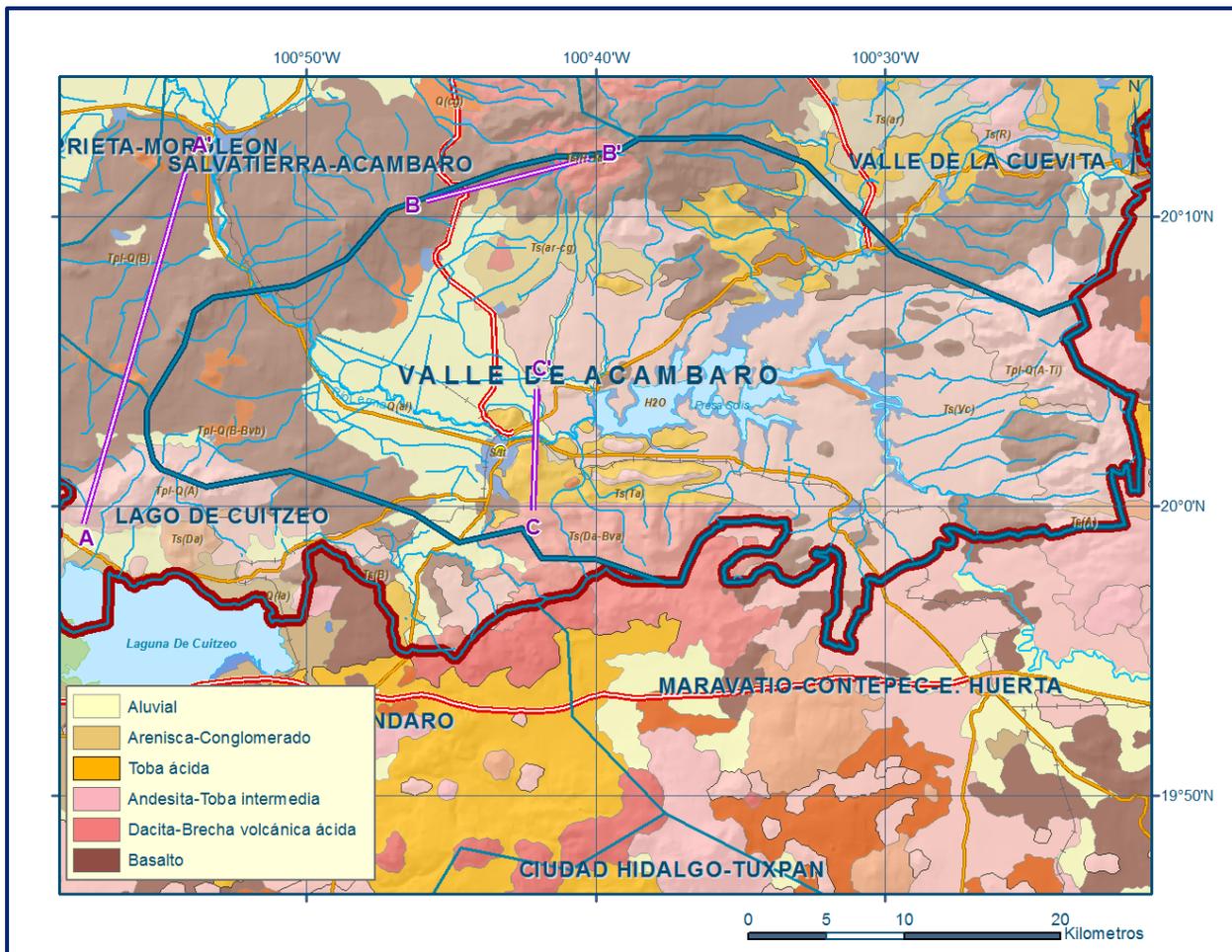


Figura 2. Geología general del acuífero

Del Mioceno aflora una secuencia de andesitas con granos de pirita diseminada a los que Aguirre *et al.*, (1998) llama Complejo Volcánico Los Agustinos, afloran también coladas de andesita basáltica que Pascuare *et al.*, (1991) las correlacionan con los basaltos Villa Morelos. En la sierra Los Agustinos se encuentran distribuidos flujos riolíticos con intercalaciones de tobas y brechas riolíticas. (Carta Geológico-Minera. “Acámbaro” F14-C84. Escala 1:50,000. SGM, 2002).

El Plioceno está representado por varios eventos volcánicos importantes; flujos riolíticos en forma de domos que afloran en las inmediaciones de Acámbaro, correlacionados con los domos riolíticos Zinapécuaro; extensas coladas andesíticas-basálticas que afloran en los cerros Cuevas de Moreno, Prieto, Tetillas y Curapeo; emisiones de piroclastos a través de conos cineríticos o compuestos; representando la última actividad volcánica se tienen flujos de ceniza de composición riolítica, con intercalaciones de fragmentos de pumicita y obsidiana, en las inmediaciones de Chupícuaro. Por último, del Holoceno existen depósitos no consolidados de gravas y arenas cubriendo parcial y discordantemente a las unidades anteriores, y aluvión en las márgenes del río Lerma, principalmente.

4.1. Estratigrafía

En el área del acuífero de Valle de Acámbaro afloran unidades litoestratigráficas volcánicas y sedimentarias cuya edad varía del Cenozoico al reciente.

CENOZOICO

Conglomerado Guanajuato

Unidad originalmente mencionada como Conglomerado Rojo por Villarello-Torres *et al.* (1906), y renombrada formalmente como Conglomerado Guanajuato por Quintero-Legorreta (1992), esta unidad presenta afloramientos restringidos en la porción centro-occidental, oeste, al norte del poblado Irámuco y fuera del límite del acuífero.

Litológicamente está caracterizado por un conglomerado polimíctico con matriz arenosa de color rojizo, mal clasificado, de clastos subangulosos a subredondeados de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, hasta de 40 cm de diámetro.

A partir del análisis paleontológico de vertebrados, Ferrusquía-Villafranca (1987) ubica a esta unidad en el Eoceno.

Secuencias Ignimbríticas del Oligoceno-Mioceno

Se agrupan con este nombre todas las secuencias ignimbríticas, correlacionables con la última fase eruptiva de la Sierra Madre Occidental, cuyos centros de emisión provienen del sur en esta región, como lo demuestran los afloramientos de esta unidad al sur de Acámbaro.

Esta unidad sólo aflora en la porción meridional del acuífero, debido a que el sistema de fallas de dirección E-W, desplaza estas rocas y su continuidad puede seguirse en el subsuelo por correlación del comportamiento resistivo en los TEM's, por lo que se interpretan como formadoras de la capa inferior del sistema hidrogeológico. Esta unidad aflora al sur de Acámbaro y las rocas observadas, son brechas, tobas e ignimbritas, que forman parte de una secuencia ignimbrítica. Esta secuencia se distribuye en el subsuelo de toda el área de estudio, por tanto, subyace a la unidad andesitas y basaltos del Mioceno. Se correlaciona con la parte superior de la Ignimbrita Cuatralba, con la riolita Chichíndaro y con otras ignimbritas del norte del estado de Guanajuato.

Se infiere que, en esta región, a su vez, cubren discordantemente a capas sedimentarias plegadas y a rocas metamórficas, aunque no se tienen evidencias locales. Las rocas de esta unidad forman el basamento de las secuencias basálticas del Mioceno Tardío. La edad de esta unidad se asignó por correlación estratigráfica con la parte superior de la Ignimbrita Cuatralba, la Riolita Chichíndaro y otras rocas ignimbríticas del norte del estado de Guanajuato, que se formaron en el período de 32 a 28 Ma, con espesor de aproximado de 800 m.

Basaltos del Mioceno Tardío

Se agrupan con este nombre las rocas basálticas que afloran en la porción oriental del área, específicamente en la ladera occidental de la Sierra Tierra Fría. Su origen está relacionado a los conductos generados por el fallamiento de fines del Mioceno, que dieron lugar a la formación del graben de San Miguel de Allende, a la falla El Salitre en la región de Los Apaseos, que continúa hasta esta región, y a la prolongación de la falla del Bajío, en la porción central del área.

Las características distintivas de estas rocas son la presencia de alteración hidrotermal en algunas zonas; su comportamiento como frontera, desde el punto de vista hidrogeológico; y el relleno de sus vesículas, principalmente por sílice. Su espesor promedio es de 600 m y su morfología es característica del Mioceno Tardío.

Secuencias basálticas del Mioceno Tardío

Se agrupan con este nombre informal a las secuencias volcánicas originadas mediante procesos eruptivos correspondientes a volcanes de escudo y mesetas lávicas, ubicados principalmente en la porción suroccidental del área de estudio.

El espesor máximo se infiere de las elevaciones máximas de esta unidad y su posible relación en el subsuelo con las unidades infrayacentes, por medio del contraste resistivo detectado mediante los sondeos transitorios electromagnéticos entre 300 y 400 m.

Esta roca cubre discordantemente a las secuencias ignimbríticas y a su vez descansa debajo de los volcanes escudo y también debajo de los volcanes pertenecientes a las secuencias del Pleistoceno. En algunos sitios subyace también al aluvión. Por fechamiento isotópico y correlación estratigráfica, se le asigna una edad del Mioceno Tardío (6 Ma).

Ignimbrita El Terrero

Esta unidad aflora solamente en la porción noreste, al pie de la Sierra Los Agustinos con un espesor aproximado de 130 m. Estas rocas pertenecen a las fases precursoras de la actividad de la Sierra Los Agustinos. Mediante fechamiento isotópico se le asigna una edad del Mioceno Tardío (6.1 Ma).

Secuencias Andesíticas del Cenozoico Tardío

Con este nombre se agrupan las secuencias volcánicas de la Sierra Puroagua y de la Sierra Tierra Fría que forman parte de la misma serranía. De acuerdo con las secuencias observadas en campo se considera que esta unidad está compuesta por el alineamiento de dos estratovolcanes pequeños, con orientación NW–SE. En campo se observan secuencias de piroclásticos y tobas coronadas por lavas masivas y fracturadas de composición andesítica.

En otros sitios, se presentan brechas volcánicas y lavas con foliación. El espesor máximo de esta unidad se infiere de las elevaciones máximas en que afloran estas rocas y su posible relación en el subsuelo con otras unidades en el rango de 200 a 300 m. Cubren discordantemente a las rocas de las mesetas de basaltos y subyacen a los volcanes de escudo pertenecientes a las secuencias basálticas del Plioceno, en algunos sitios subyacen también al aluvión. Mediante fechamiento isotópico y relaciones estratigráficas, se le asigna una edad Plioceno Temprano.

Secuencias Ignimbríticas del Cenozoico

Se agrupan en esta unidad las rocas que afloran en la porción septentrional del área en la Sierra Los Agustinos, donde afloran secuencias ignimbríticas, domos, brechas volcánicas y tobas que se encuentran coronadas por lavas basálticas del Plioceno-Pleistoceno.

Esta secuencia forma la Sierra Los Agustinos, que divide los Valles de Salvatierra y el de La Cueva; forma también la sierra meridional de la región de Los Apaseos, ubicada al norte del área y además constituye el límite norte del Valle de Acámbaro. Su espesor máximo de 400 m se infiere con base en su espesor aflorante y sus relaciones estratigráficas. La edad de esta unidad se asigna con base en sus relaciones estratigráficas y geomorfológicas, perteneciente al Plioceno Inferior, sin embargo, estudios previos (Pasquaré, 1991) le asignan una edad radiométrica del Mioceno al Plioceno (10-3 Ma).

Secuencias volcánicas y domos Zinapécuaro

Se agrupan dentro de esta unidad las secuencias volcánicas del Plioceno, en las que la composición félsica es predominante. Este magmatismo está relacionado con la formación de la caldera Los Azufres, Michoacán a 25 km al Sur de la Sierra de Acámbaro. Mediante fechamiento isotópico se les asigna una edad de 1.6 a 1.14 Ma.

Volcanes escudo del Plioceno-Pleistoceno

Se denomina así a las rocas pertenecientes a los extensos volcanes de escudo que forman estructuras volcánicas amplias que sólo se presentan en la región noroccidental, en el Cerro Cuevas de Moreno, Parácuaro.

Estos volcanes tienden a alinearse con la traza de las grandes fallas NW – SE del Cenozoico, que fueron reactivadas a fines del Cenozoico. Las características distintivas de estas rocas basálticas son las estructuras de escudo a partir de las cuales se formaron, interestratificadas con cenizas volcánicas, tobas y brechas volcánicas, que se alternan entre eventos eruptivos y que le dan un funcionamiento particular cuando se encuentran saturadas de agua.

CUATERNARIO

Volcanes monogenéticos y volcanes escudo del Pleistoceno

Con este nombre se denomina a las rocas extruidas de los volcanes monogenéticos existentes en la zona y alineados también con fracturas profundas de la corteza. Estas rocas se distribuyen en la porción meridional del área.

Su espesor máximo es del orden de 200 m y en el subsuelo su distribución está restringida a la cercanía de cada volcán. La edad de estas rocas se estima perteneciente al Pleistoceno, durante la última etapa de vulcanismo del Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana.

Depósitos aluviales

Están representados por todos los depósitos que rellenan el valle de Acámbaro, formados por los sedimentos depositados por el río Lerma en las cañadas que ahora se encuentran cubiertas por la Presa Solís y por el arrastre de detritos de las sierras que lo delimitan. Actualmente estos depósitos están cubiertos por el azolve de la Presa Solís, son heterogéneos, de variaciones en el tamaño de grano que varían desde arcillas hasta gravas. Por su naturaleza y posición estratigráfica, se consideran la unidad más reciente que aflora en la zona de estudio, cuyo depósito inició en el Pleistoceno y continúa actualmente.

Depósito de Piedemonte

Estos depósitos son los acarrees, que conforman el pie de las montañas abruptas de la Sierrita Irámuco, donde están constituidos por gravas, arenas y arcillas, mal clasificados, que en general presentan granulometría más gruesa que el aluvión circundante. En realidad, forman parte del aluvión, pero para fines hidrogeológicos es conveniente indicar esta distinción.

Depósitos lacustres

Constituidos por sedimentos finos de limos y arcillas depositados en ambiente lacustre, en la zona del Lago Cuitzeo.

De acuerdo con la escasa información del subsuelo en esta región donde se presentan, se considera que tienen poco espesor, aspecto que refleja una edad reciente para la formación del Lago de Cuitzeo. Constituye una capa de baja permeabilidad semiconfinante hacia estratos inferiores

4.2. Geología estructural

Tanto las rocas que afloran como las que le subyacen, según su edad han estado sometidas a diferentes etapas de compresión y/o extensión creando un modelo tectónico-estructural complejo. En el caso de las rocas pre-cenozoicas existen evidencias que señalan una etapa de deformación en forma de plegamientos y dislocamientos causados por esfuerzos compresivos de carácter orogénico (deformación mesozoica).

La última de estas fue la Orogenia Laramide que ocurrió al final del Mesozoico.

Estas rocas y otras más jóvenes fueron afectadas por esfuerzos distensivos, durante varios eventos ocurridos en el Cenozoico (deformación cenozoica).

Desde el punto de vista hidrogeológico, las fracturas son importantes en rocas como las que conforman el relieve de la zona, ya que a través de los arreglos de estas fracturas y fallas de origen tectónico ocurre el flujo subterráneo preferencial en las rocas fracturadas (Larson, 1985). Las estructuras más notables se atribuyen a un régimen distensivo de esfuerzos, que generó estructuras de fallamiento normal con importantes componentes laterales. De manera general se han interpretado tres fases de deformación de este tipo en la región.

En lo referente a los rasgos estructurales, existe gran cantidad de fracturas y fallas asociadas al vulcanismo del Cenozoico que han dado lugar a fosas y pilares tectónicos, relacionadas con eventos de distensión que son peculiares en esta provincia geológica.

Por debajo de la cubierta volcánica cenozoica se tienen rocas mesozoicas deformadas por esfuerzos compresivos orogénicos, como lo demuestran los afloramientos de rocas en otras localidades cercanas a esta región.

Con el fin de distinguir los arreglos de fracturas principales, sobre todo los de origen tectónico, se realizó una fotointerpretación de una impresión de un grupo de imágenes de satélite LANDSAT escala 1: 250,000 (espaciograma) a partir de la cual se interpretaron los lineamientos tectónicos principales. Los arreglos principales tienen, por orden de importancia, rumbos: NE-SW, SSE-NNW y N-S, que pueden relacionarse al relajamiento de los esfuerzos producidos posteriormente a los dos eventos compresivos que actuaron en la región.

Mientras que el arreglo ENE corresponde con el sistema de fallas del sistema denominado por algunos autores Sistema de Fallas Chapala-Cuitzeo-Acambay. El conjunto de estos arreglos estructurales que datan del Cenozoico y se han complementado con los de orientación E-W del Cuaternario, han desplazado el subsuelo en forma de bloques, que forman una región en la que se conjugan distintos eventos tectónicos, aunque el predominante es el debido al tectonismo asociado al Eje Neovolcánico.

Como se mencionó antes, el área de estudio ha sido afectada por dos sistemas principales de fallamiento normal de edades distintas, que ha dado lugar a fosas tectónicas que alojan sedimentos aluviales y rocas volcánicas. Estas fallas siguen en términos generales dos arreglos: uno con fallas ENE-WSW, y otro que presenta direcciones SSE-NNE.

El primero se asocia al “Sistema de Fallas de la Faja Volcánica Transmexicana” cuya edad se infiere del Mioceno y el segundo se relaciona con el sistema de fallamiento normal de la región centro-occidental de México, sistema que actualmente está activo. Se considera que este segundo sistema actuó en la zona a fines del Cenozoico y principio del Cuaternario.

Del primer arreglo estructural se deduce la formación de las fosas tectónicas de la región, cuya geometría es fundamental para definir la posición del basamento hidrogeológico del sistema.

Dentro del área de estudio confluyen productos volcánicos de distintos centros de emisión, razón por la cual se consideró necesario establecer el origen de dichas estructuras. Considerando las direcciones de flujo de lavas y derrames piroclásticos, y la interpretación de fotografías aéreas, es que se determinó que hacia el área confluyen los productos de dos sierras formadas por volcanes compuestos: la oriental de composición intermedia que representa la Sierra Puroagua; y la central-septentrional, de composición félsica, sobrepuesta a basaltos fisurales del Mioceno. Se presentan también volcanes de escudo y mesetas de basalto sepultadas. Existen otras estructuras como domos félsicos del Cuaternario y volcanes monogenéticos alineados a lo largo de estructuras sepultadas y algunos volcanes de lava.

4.3. Geología del subsuelo

Con base en información geológica superficial, cortes litológicos de pozos y resultados de la interpretación de sondeos geofísicos, se puede definir que el agua subterránea se presenta en un ambiente hidrogeológico constituido por un sistema distensivo de bloques tectónicos escalonados (formados en rocas volcánicas y piroclásticas), rellenas de material terrígeno de origen lacustre-continental, que presenta granulometría y compactación variables, lo que ocasiona heterogeneidad y anisotropía importantes, como lo han demostrado los resultados de conductividad hidráulica obtenidos mediante pruebas de bombeo.

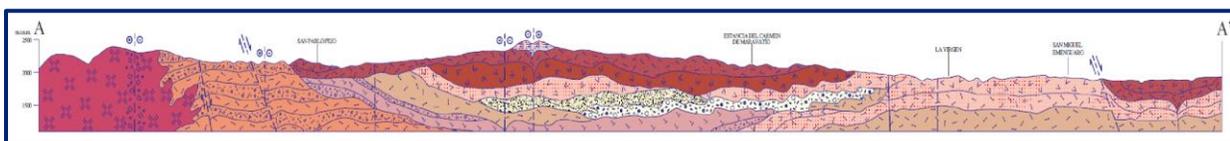
El sistema-acuífero está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, areniscas y conglomerados; y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición basáltica y en menor proporción riolítica.

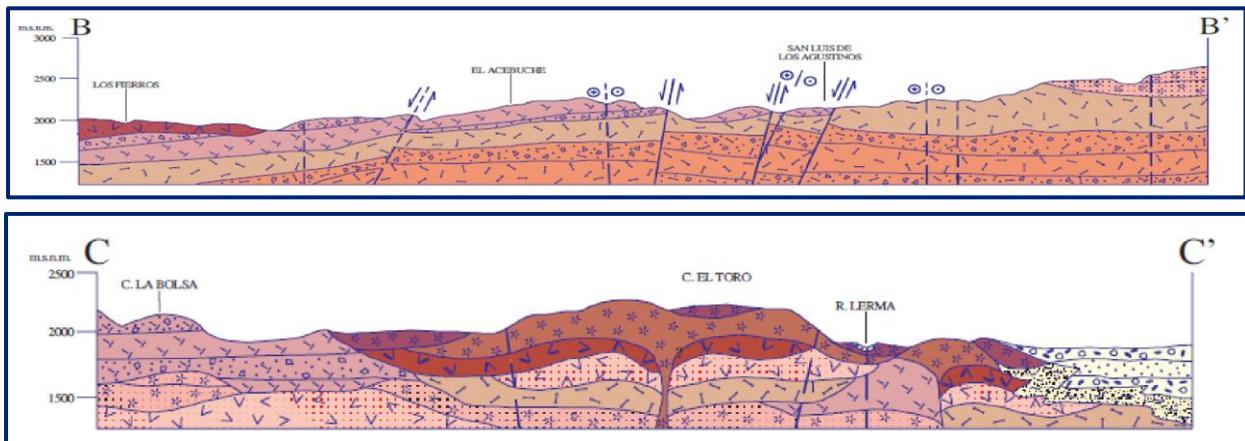
La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcilla a grava y su espesor oscila entre algunos metros hasta 100 m, de acuerdo con la distribución y forma de las fosas tectónicas que los contienen.

Por su parte, el medio volcánico fracturado presenta un gran espesor, con marcadas propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea. Las fronteras son convencionales y están definidas por los parteaguas de las elevaciones topográficas que lo delimitan. Al norte está definida por la Sierra Los Agustinos y el Cerro Cuevas de Moreno; al sur por los cerros San Andrés, San Antonio y Gordo, en los límites entre los estados de Guanajuato y Michoacán; al oriente por las Sierras Tierra Fría y Puroagua, que limitan los estados de Guanajuato y Michoacán; y al occidente por los lomeríos que se ubican entre las poblaciones Las Cruces, San Pablo Pejo y San José Las Pilas. Con excepción de la Sierra Los Agustinos, las demás sierras están constituidas por rocas basálticas y andesíticas que presentan permeabilidad primaria y secundaria por fracturamiento (doble porosidad).

El basamento está representado por las rocas riolíticas, a profundidades mayores de 800 m, cuando desaparece el fracturamiento. Estas rocas son correlacionables con la Ignimbrita Cuatralba, La riolita Chichíndaro y otras rocas ignimbríticas del norte del estado de Guanajuato. A mayores profundidades se considera que las rocas del Complejo Vulcanosedimentario de la Sierra de Guanajuato y el Conglomerado Guanajuato constituyen el basamento hidrogeológico regional.

La disposición de las unidades de interés hidrogeológico en el subsuelo, así como las estructuras que las afectan, ocasionaron su desplazamiento debido a la presencia de la prolongación de la Falla del Bajío. En las secciones geológicas esquemáticas mostradas en la figura 3, se puede observar que las unidades más importantes en su distribución en el subsuelo son las basálticas y los depósitos aluviales.





Fuente: Carta Geológico-Minera F14-C84 "Acámbaro". Esc. 1: 50 000 (SGM, 2002)

Figura 3. Secciones geológicas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, hidrogeológicas y geofísicas permiten establecer que la dinámica del agua subterránea se presenta en un sistema-acuífero **libre a semiconfinado**, tipo granular-fracturado-con doble porosidad, heterogéneo y anisótropo de continuidad hidráulica regional, entre unidades volcánicas, piroclásticas, vulcanosedimentarias y depósitos terrígenos de compacidad y granulometría variables. Está constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, areniscas y conglomerados; y en su porción inferior por rocas volcánicas fracturadas, principalmente de composición basáltica y en menor proporción riolítica. La granulometría de los materiales aluviales varía desde arcillas a gravas y su espesor alcanza 100 m, de acuerdo con la distribución y forma de las fosas tectónicas que los contienen. El medio volcánico fracturado presenta un gran espesor, con marcadas propiedades heterogéneas-anisótropas debido al patrón de fracturamiento que determina la ocurrencia y distribución del agua subterránea.

El paquete en su conjunto está afectado por tectonismo, generando un sistema de fosas y pilares tectónicos.

El funcionamiento hidrogeológico en la región es muy variado, debido a la heterogeneidad de las diferentes emisiones de basalto y demás derrames volcánicos que afloran y a su grado o intensidad de fracturamiento; es por ello que sólo algunos de estos materiales son capaces de constituir buenos acuíferos.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2013, se realizaron 7 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, en el estudio llevado a cabo en 1999 se ejecutaron 20 pruebas de bombeo de larga duración.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **5.0×10^{-5} a $9.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . De acuerdo con el espesor saturado, la conductividad hidráulica varía de **2.5×10^{-6} a $2.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.2 a 20.7 m/d)**. Los valores más bajos se asocian a sedimentos de granulometría fina, en tanto que los valores mayores corresponden a sedimentos de mayor tamaño asociados al cauce de arroyos o rocas volcánicas con mayor grado de fracturamiento.

Ninguna de las pruebas contó con pozos de observación, por lo que no fue posible obtener valores de coeficiente de almacenamiento. De acuerdo con la litología, se asignó un valor promedio de rendimiento específico de 0.1.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información para los años 1991, 1999, 2007, 2008, 2009 y 2013. A partir de 1999 la CEAG realizó mediciones piezométricas semestrales.

Debido a que para los últimos años se cuenta con mayor apoyo piezométrico, con el objetivo de evaluar una condición actual del acuífero, para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2011-2013

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el año 2013 presentó valores que variaron de 5 a 90 m, que se incrementan gradualmente conforme se asciende topográficamente. Los valores más profundos, de 60 a 90 m, se registran en la zona norte del acuífero, hacia las localidades Parácuaro, Los Coss, Santa Fe, Las Cruces, Tres Marías, La Curva, Guadalupe Soto, San Felipe y San José de Las Pilas. Niveles menos profundos, con valores de 30 a 50 m, se ubican al oeste del acuífero, entre las localidades de Puroagua, Jerécuaro, El Zapatero, Zatemaye, Tejocote de Puriantzícuaro, La Mora, Estanzuela de Razo y Puroagüita.

Los valores más someros, de 5 a 10 m, se presentan en la zona agrícola ubicada al oeste del acuífero y a lo largo del cauce del Río Lerma. De 10 a 20 m se presentan al sureste de Tarandacuao y en torno de la Presa Solís, respectivamente (figura 4).

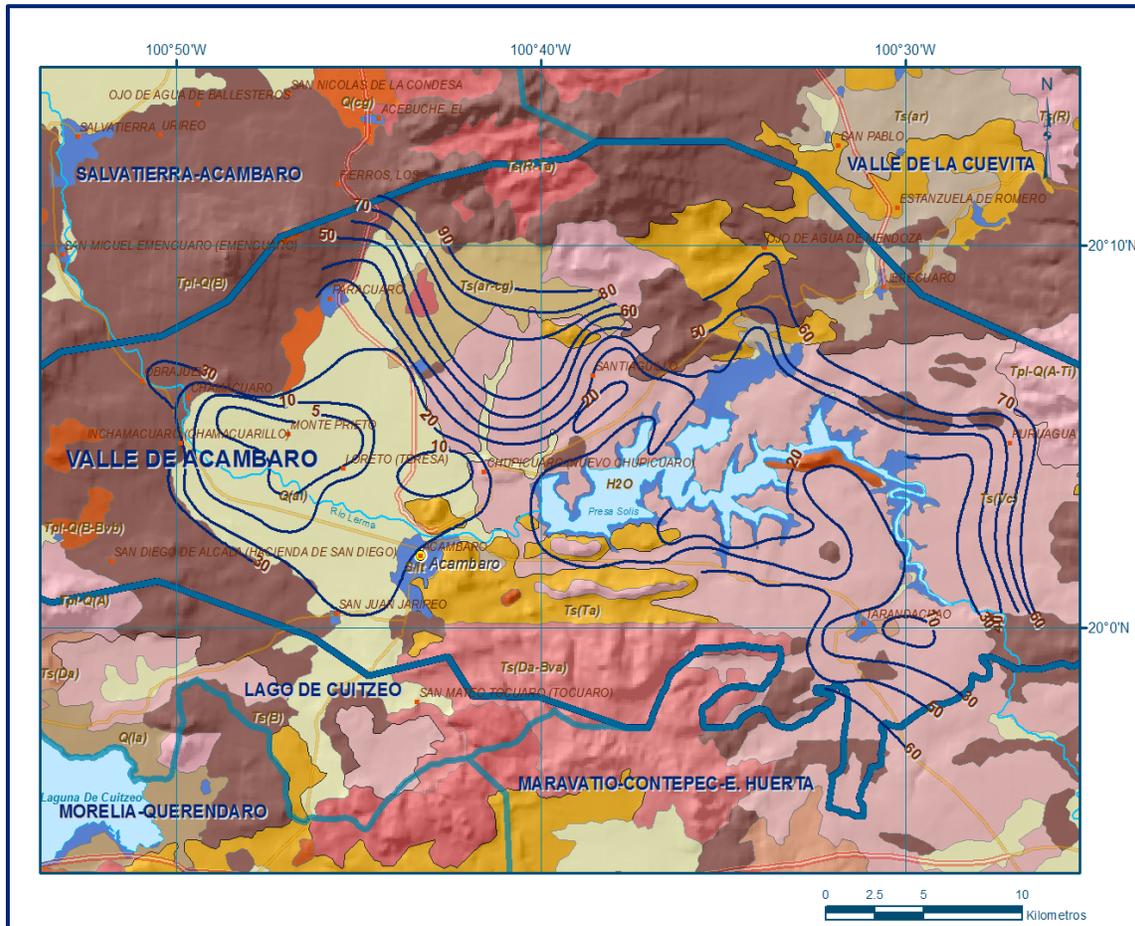


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2. Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático para el año 2013, se presentaron valores de 1,940 msnm, que se registran en las porciones oriental y norte del acuífero, hasta 1,830 msnm que definen dos conos de abatimiento; el más extenso localizado en la zona contigua al cauce del río Lerma y el otro en la zona ubicada entre Parácuaro y La Concepción. En la zona de Acámbaro los valores de elevación varían de 1,840 a 1,850 msnm.

La dirección del flujo subterráneo muestra una red concéntrica hacia la porción central del valle, con dirección preferencial SE-NW, con alimentaciones provenientes de los flancos sur y noroeste.

El flujo tiende a descargar hacia la Presa Solís y hacia el cauce del río Lerma; en esta última zona la concentración del bombeo ha provocado un extenso cono de abatimiento, que ha interceptado el flujo que en condiciones naturales seguía el curso del Río Lerma a través del cañón que formó en las rocas basálticas, hacia el acuífero vecino Salvatierra-Acámbaro (figura 5).

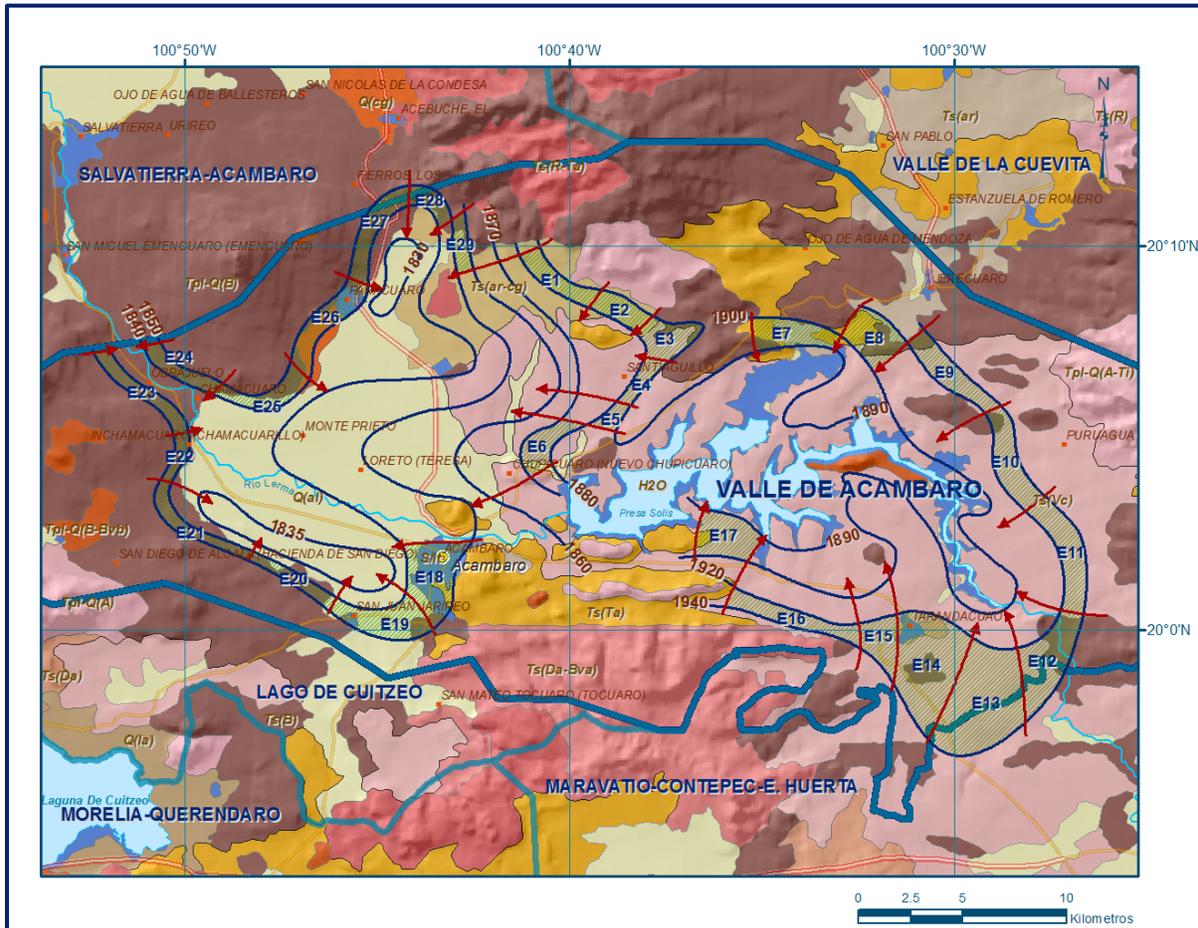


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3. Evolución del nivel estático

De acuerdo con la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2013, se registraron los valores de abatimiento que variaron de 0.5 a 3.0 m, con un ritmo anual promedio de 0.5 m.

Los mayores abatimientos se registran en la porción central del valle, al occidente de Acámbaro, entre las localidades Monte Prieto, Severiano Tovar Martínez, San Juan Bosco, Paredón Chiquito, Las Maravillas, Los Ángeles y San Ramón.

Al suroeste del acuífero se registran abatimientos que oscilan entre 0.4 y 0.7 m anuales entre las poblaciones Loreto (Teresa), Hacienda de San Diego y Parácuaro (figura 6).

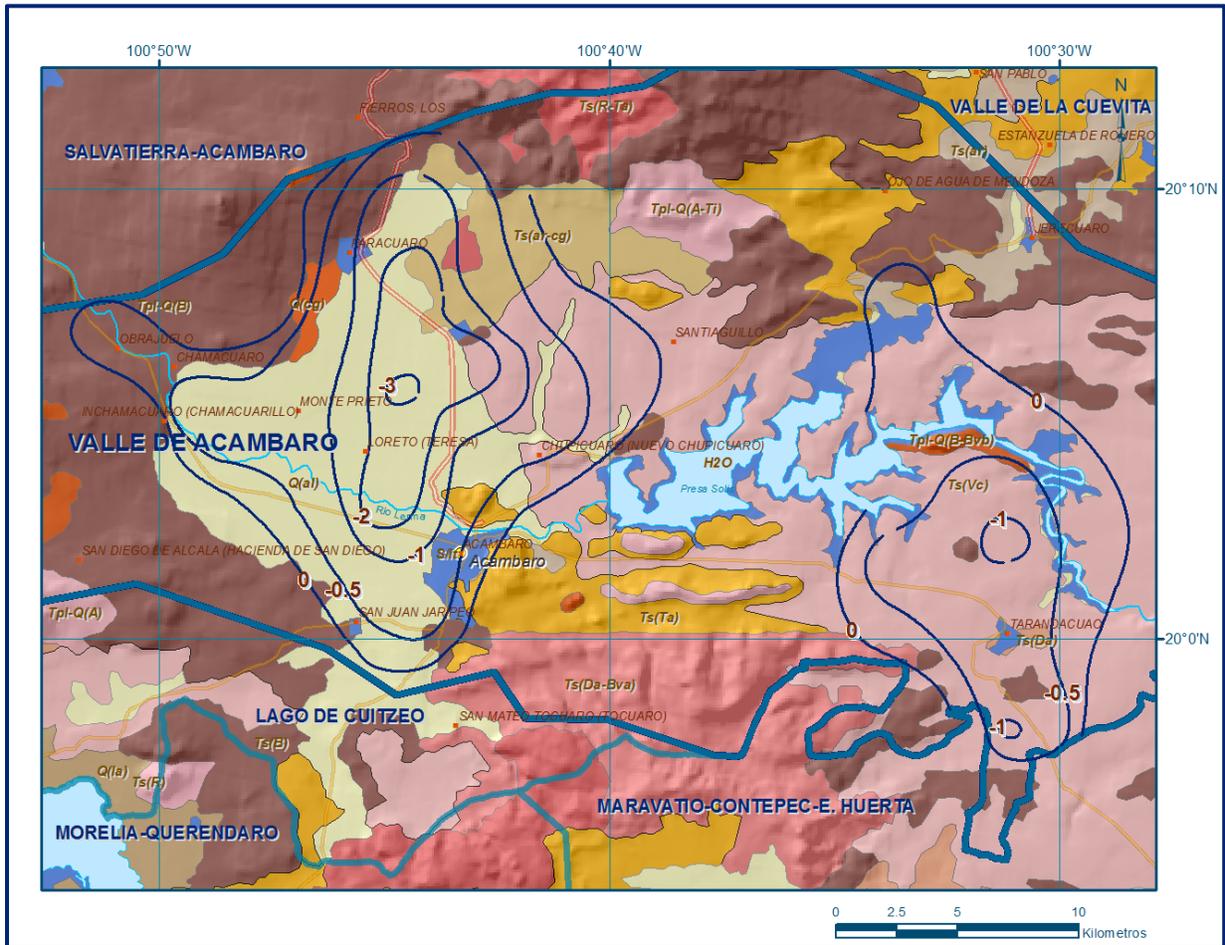


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2011-2013)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2013, se tomaron 10 muestras de agua para su análisis fisicoquímico correspondiente en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, de los cuales 8 corresponden a pozos y 2 a manantiales. Adicionalmente, en el estudio llevado a cabo en 1999 se recolectaron 40 muestras de agua. En ambos casos, las determinaciones incluyeron: temperatura, potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, iones principales, nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos (STD), para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece 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 202, y por lo tanto para otros usos.

La concentración de STD presenta valores que varían de 198 a 546 ppm, los cuales no superan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido por la norma mencionada para el agua potable. Los valores de conductividad eléctrica variaron de 628 a 1365 $\mu\text{S}/\text{cm.}$, que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. Se registraron valores de pH de 6.5 a 7.5 y de temperatura entre 20.0 y 33.8 °C.

La familia de agua predominante es bicarbonatada-sódica que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha estado en contacto con rocas volcánicas que contienen plagioclasas sódicas.

Se clasificó el agua para su uso en riego utilizando la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS); las muestras analizadas se clasifican como C_1-S_1 y C_2-S_1 , que corresponde a agua de salinidad baja a media con bajo contenido de sodio intercambiable, aptas para la agricultura sin ninguna restricción.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2013, se identificaron de 737 aprovechamientos del agua, de los cuales 596 son pozos (80.9%), 98 norias (13.3%), 33 manantiales (4.5%), 1 barreno (0.1%) y en 9 más (1.2%) no se pudo obtener información.

Del total de aprovechamientos, 637 se encuentran activos y 100 inactivos; de los aprovechamientos activos 314 (49.3%) se destinan al uso agrícola, 111 (17.4%) son para abastecimiento de agua potable, 79 (12.4%) para uso doméstico, 5 (0.8%) para uso pecuario y 2 (0.3%) para uso recreativo. De 126 (19.8%) aprovechamientos no se obtuvo información. El volumen total de extracción estimado de **132.3 hm³/año**, de los cuales, 110.3 hm³/año (83.4 %) son para uso agrícola, 19.3 hm³/año (14.6%) es para uso público-urbano, 2.3 hm³/año (1.7 %) para uso doméstico y 0.4 hm³/año (0.3 %) para uso pecuario.

Adicionalmente, a través de los **33 manantiales** se descarga un caudal de 35 lps, que representa un volumen anual de **1.1 hm³**, destinado al uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2011-2013, en una superficie aproximada de **380 km²** de la zona en la que están dispersos los aprovechamientos y en la que se cuenta con información piezométrica.

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

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

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

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

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

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

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

Dónde:

R_v= Recarga vertical;

R_i= Recarga incidental;

E_h= Entradas por flujo subterráneo horizontal;

B= Bombeo;

D_m= Descarga a través de manantiales

ΔV(S)=Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

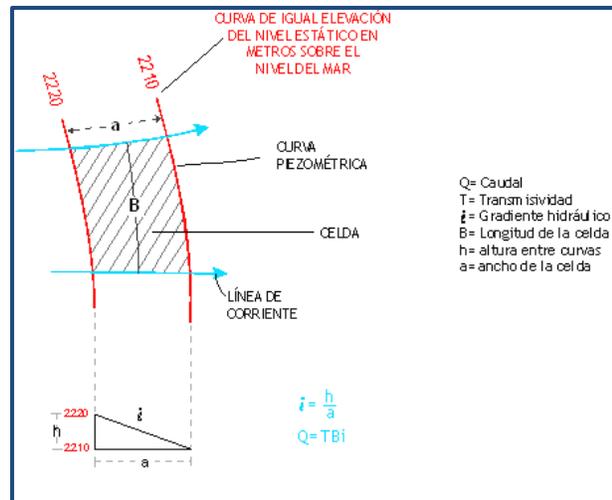
$$Q = B * i * T$$

Dónde:

B= Largo del canal de flujo;

i= Gradiente hidráulico (i);

T= Transmisividad en el canal de flujo;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **68.7 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2013 y otros previos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo en el acuífero

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	5065	1210	10	0.00826	0.0030	0.1256	4.0
E2	3865	770	10	0.01299	0.0010	0.0502	1.6
E3	2205	1650	10	0.00606	0.0010	0.0134	0.4
E4	2755	660	10	0.01515	0.0015	0.0626	2.0
E5	1985	2205	10	0.00454	0.0010	0.0090	0.3
E6	2645	990	10	0.01010	0.0010	0.0267	0.8
E7	3525	1760	10	0.00568	0.0020	0.0401	1.3
E8	3305	2425	20	0.00825	0.0010	0.0273	0.9
E9	4625	1100	20	0.01818	0.0010	0.0841	2.7
E10	5510	1320	20	0.01515	0.0010	0.0835	2.6
E11	5730	1430	20	0.01399	0.0010	0.0801	2.5
E12	4625	1760	20	0.01136	0.0020	0.1051	3.3
E13	3525	4405	20	0.00454	0.0005	0.0080	0.3
E14	2205	4185	20	0.00478	0.0005	0.0053	0.2
E15	2205	2645	20	0.00756	0.0005	0.0083	0.3
E16	7270	1210	20	0.01653	0.0020	0.2403	7.6
E17	2865	1760	10	0.00568	0.0060	0.0977	3.1
E18	3305	1985	10	0.00504	0.0050	0.0832	2.6
E19	5065	990	10	0.01010	0.0020	0.1023	3.2
E20	3965	770	10	0.01299	0.0015	0.0772	2.4
E21	6390	880	10	0.01136	0.0015	0.1089	3.4
E22	2200	1100	10	0.00909	0.0015	0.0300	0.9
E23	5950	880	10	0.01136	0.0015	0.1014	3.2
E24	3965	770	10	0.01299	0.0015	0.0772	2.4
E25	4625	1100	10	0.00909	0.0015	0.0631	2.0
E26	5510	990	10	0.01010	0.0030	0.1670	5.3
E27	5065	770	10	0.01299	0.0030	0.1973	6.2
E28	2865	990	10	0.01010	0.0020	0.0579	1.8
E29	1870	800	10	0.01250	0.0020	0.0468	1.5
Total entradas							68.7

7.1.3. Recarga incidental (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación, dependiendo de la profundidad al nivel estático, de las características del suelo y de las condiciones climáticas.

Debido a la falta de información de superficies y láminas de riego por cultivo, se consideró un coeficiente de infiltración de 10 % debido a la profundidad a la que se localiza del agua subterránea en la zona agrícola y a la permeabilidad de los sedimentos del subsuelo. El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 110.3 hm³ anuales; si consideramos que el 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero como recarga efectiva, obtenemos un volumen de 11.0 hm³/año de los excedentes del riego.

Por otra parte, el volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 19.3 hm³, tomando en cuenta que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y que un 20 % de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado; el volumen de recarga de este tipo es de 3.9 hm³ anuales. Por lo tanto, **Ri = 3.9 hm³ anuales**

7.2. Salidas

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

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **132.3 hm³/año**.

7.2.2. Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 33 manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 35 lps, que representan un volumen anual de **1.1 hm³**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2011-2013 mostrada en la figura 6.

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.1 se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 380 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h= Valor de la variación piezométrica en el período (m);

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

Como consecuencia de la explotación intensiva del recurso para abastecimiento de agua agrícola, la posición del nivel piezométrico ha descendido, propiciado una variación negativa del almacenamiento. Los valores obtenidos para cada variación piezométrica se pueden observar en la tabla 3. El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de -30.0 hm³, que representa un promedio anual de **-14.9 hm³/año**

Tabla 3. Evolución del nivel estático en m (2011-2013)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-3	-3	1.2	0.1	-0.4
-2 a -3	-2.5	31.8	0.1	-8.0
-0.5 a -1.0	-0.75	149.1	0.1	-11.2
0 a -0.5	-0.25	151.2	0.1	-3.8
-1 a -2	-1.5	41.9	0.1	-6.3
-1	-1	3.2	0.1	-0.3
	TOTAL	378.4	TOTAL	-29.9
		Promedio anual		-14.9

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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + D_m \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 132.3 + 1.1 - 14.9 - 68.7 - 14.9 \\ R_v &= 34.9 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i + R_r \\ R &= 34.9 + 68.7 + 3.9 + 11 \\ R &= 118.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

Donde:

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

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso, su valor es de **118.5 hm³ anuales**, de los cuales 103.5 hm³ corresponden a la recarga natural y 14.9 hm³ a recarga incidental.

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 del acuífero Valle de Acámbaro, su valor es de **1.1 hm³ anuales**, que corresponden a la descarga de los manantiales que está comprometida para uso doméstico. Por lo tanto, **DNC = 1.1 hm³/año**.

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **96,473,185 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 118.5 - 1.1 - 96.473185 \\ \text{DMA} &= 20.926815 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones **20,926,815 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2003. Estudio para la Integración del Plan de Manejo del Agua en los Acuíferos Valle de Acámbaro, Irapuato Valle, Pénjamo–Abasolo y Silao-Romita, en el estado de Guanajuato. Realizado por el Colegio de Postgraduados de la Universidad Autónoma de Chapingo.

Comisión Nacional del Agua, 2011. Determinación de la Disponibilidad de Agua Subterránea en el Acuífero Valle de Acámbaro (1117), estado de Guanajuato.