



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE LA CUEVITA (1116),
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	4
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1.Provincias fisiográficas.....	6
3.2.Clima.....	7
3.3.Hidrografía.....	8
3.4.Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1.Estratigrafía.....	10
4.2.Geología estructural.....	13
4.3.Geología del subsuelo.....	14
5. HIDROGEOLOGÍA.....	16
5.1.Tipo de acuífero.....	16
5.2.Parámetros hidráulicos.....	16
5.3.Piezometría.....	17
5.4.Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	19
5.5.Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1.Entradas.....	22
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3 Recarga incidental (Ri).....	25
7.2.Salidas.....	26
7.1.1 Bombeo (B).....	26
7.1.2 Descarga a través de manantiales (Dm).....	26
7.3.Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	26
8. DISPONIBILIDAD.....	27
8.1.Recarga total media anual (R).....	28
8.2.Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3.Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	28
8.4.Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	29
9. BIBLIOGRAFÍA.....	30

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 la Cuevita, definido con la clave 1116 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo suroriental del estado de Guanajuato, en el límite con los estados de Michoacán y Querétaro, entre los paralelos 20° 06' y 20° 27' de latitud norte y los meridianos 100° 19' y 100° 43' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 783 km². Limita al norte con el acuífero Valle de Celaya, al sur con Valle de Acámbaro, al oeste con Salvatierra-Acámbaro, todos ellos pertenecientes al estado de Guanajuato; noreste y este con el acuífero Valle de Huichapan del estado de Querétaro y al sureste con Maravatío-Contepec-E. Huerta, perteneciente al estado de Michoacán (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero cubre en su totalidad el municipio de Coroneo, la mayor parte de Jerécuaro y parcialmente los municipios de Apaseo El Alto, 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 1116 VALLE DE LA CUEVITA							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	38	30.2	20	12	40.9	
2	100	40	28.8	20	13	38.2	
3	100	40	44.0	20	15	35.1	
4	100	42	48.9	20	18	5.6	
5	100	42	10.7	20	19	18.8	
6	100	39	5.3	20	21	10	
7	100	33	50.9	20	22	36.8	
8	100	32	18.5	20	24	28.4	
9	100	30	27.3	20	25	42.0	
10	100	29	211	20	26	40.0	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	100	21	0.0	20	17	16.1	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	100	23	25.6	20	7	7.1	
13	100	24	42.2	20	6	37.9	
14	100	29	32.4	20	8	40.6	
15	100	32	46.9	20	11	52.1	
16	100	34	58.5	20	12	42.9	
1	100	38	30.2	20	12	40.9	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “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 del decreto de veda. “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.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El principal usuario del agua subterránea es el agrícola. Dentro del territorio del acuífero no se localiza distrito ni unidad de Riego alguna. Los usuarios se encuentran organizados y constituidos en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Salvatierra-La Cueva, instalado el 7 de enero 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:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN EL VALLE DE LA CUEVITA, EN LA PORCIÓN SUR-ORIENTAL DEL ESTADO DE GUANAJUATO. Realizado en 1981 por Geohidrológica Mexicana, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Los objetivos de este estudio fueron identificar las zonas más favorables para la perforación de nuevos pozos, el volumen adicional que podía explotarse y determinar la calidad química del agua subterránea. Recomienda perforar en las rocas riolíticas que afloran en las zonas topográficamente más altas y en los valles sobre las márgenes de las presas Solís y Tepuxtepec, en los depósitos conglomeráticos y en las rocas basálticas.

DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES GEOHIDROLÓGICAS ACTUALES Y LAS ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE LA CUEVITA, ESTADO DE GUANAJUATO. Realizado en 1992 por Consultores en Geología S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua.

Este trabajo tuvo como objetivos determinar las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, implementar un modelo matemático de simplificado de simulación del flujo subterráneo y definir alternativas de aprovechamiento del agua subterránea en las zonas de mayor extracción.

Como resultado plantea a los usuarios la problemática del agua subterránea y las mejores alternativas para la explotación óptima del recurso.

ESTUDIO HIDROGEOLOGICO Y MODELO MATEMATICO DE LOS ACUÍFEROS DE SALVATIERRA Y LA CUEVITA, ESTADO DE GUANAJUATO. Realizado en 1998 por Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V., para la Comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG). Es un estudio de actualización hidrogeológica que tuvo como objetivos principales determinar las condición de explotación de los acuíferos, conocer las estructuras geológicas que controlan el almacenamiento y flujo del agua subterránea, definir el modelo conceptual de funcionamiento, realizar el censo de aprovechamientos e hidrometría de las extracciones; todo ello para construir un modelo matemático del flujo subterráneo mediante el cual se propongan políticas de operación y administración del recurso hídrico subterráneo, evaluar los efectos, riesgos potenciales de contaminación, sobreexplotación así como establecer las bases técnicas para la reglamentación 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.

PIEZOMETRÍA E HIDROMETRÍA DE LAS EXTRACCIONES DEL ACUÍFERO VALLE DE LA CUEVITA, 2015. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG). Presenta piezometría histórica y actualizada del acuífero y la estimación de los volúmenes de extracción.

La información piezométrica de este trabajo fue la base para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, que sirvieron para actualizar el balance de aguas subterráneas.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Raisz (1964), la superficie completa del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico. Según la clasificación del Instituto de Geografía Estadística e Informática (INEGI, 1997), el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, en las Subprovincias Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, Mil Cumbres y 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, Popocatépetl, Pico de Orizaba, Cofre de Perote y La Malinche.

Las subprovincias se caracterizan por predominar los 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.

La Subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo es una zona de terrenos accidentados en la que dominan los sistemas de topofomas pequeña sierra compleja y lomerío de colinas redondeadas, constituidas principalmente por rocas basálticas.

La Subprovincia Mil Cumbre es una región accidentada y complicada por la diversidad de sus geoformas que descienden hacia el sur, abarca sierras volcánicas complejas debido a la variedad de sus antiguos aparatos volcánicos, mesetas lávicas escalonadas y lomeríos basálticos.

En la Subprovincia 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). El tipo (A)C(w0)(w) es 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; con porcentaje de lluvia invernal menor de 5%.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Hacienda San Lucas, Tarímoro, EL Sabino, Salvatierra y El Cubo, cuyo periodo de registro comprende 1979-2013. Con estos datos y utilizando el método de polígonos de isoyetas e isotermas, se determinaron los valores de precipitación y temperatura media anual de **544 mm/año** y **15.9 °C**, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial media, se obtuvo un valor de **1,850 mm/año**, con el máximo valor medio se presenta en el mes de mayo.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica Alto Lerma, cuenca Río Lerma-Salamanca. El río Lerma representa en la zona el límite entre los estados de Querétaro y Michoacán, y descarga sus aguas en la presa Tepuxtepec, en la cual se aprovecha una caída del gradiente topográfico para generar energía eléctrica. Aguas abajo de la presa, el río sale del área de estudio para volver a entrar por el límite sur en las cercanías de Tarandacua, descargando sus aguas en la presa Solís, de donde sale fluyendo hacia el noreste irrigando la Región del Bajío; después el Río Lerma descarga sus aguas al Lago de Chapala, de donde sale con el nombre de Río Santiago hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, al norte de San Blas, en el estado de Nayarit.

Al norte de Jerécuaro no existen ríos o corrientes superficiales; la porción nororiental es drenada a través de números arroyos, reuniendo primero sus aguas en el Río San Juan, el cual las vierte al Río Moctezuma. Los bordos, en cambio, son abundantes, especialmente en la zona llamada Los Bordos de Tacambarillo, localizada entre los poblados El Fresno, Rancho Nuevo y Tacambarillo.

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 Cuevita, 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. Geomorfológicamente, el área presenta características muy bien definidas. En la porción occidental predominan rocas volcánicas intermedias y básicas en aparatos volcánicos de diversa altura que aún conservan su estructura cómica, formando un paisaje montañoso con zonas de lomeríos y escasas zonas planas intercaladas.

La porción oriental se caracteriza por la presencia de mesetas altas formadas por el depósito de conglomerados y tobas riolíticas, en las cuales han sido labradas profundas barrancas.

Se considera que la zona se encuentra en una etapa geomorfológica de juventud, en las que todas sus corrientes superficiales son de tipo torrencial debido a su fuerte pendiente.

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).

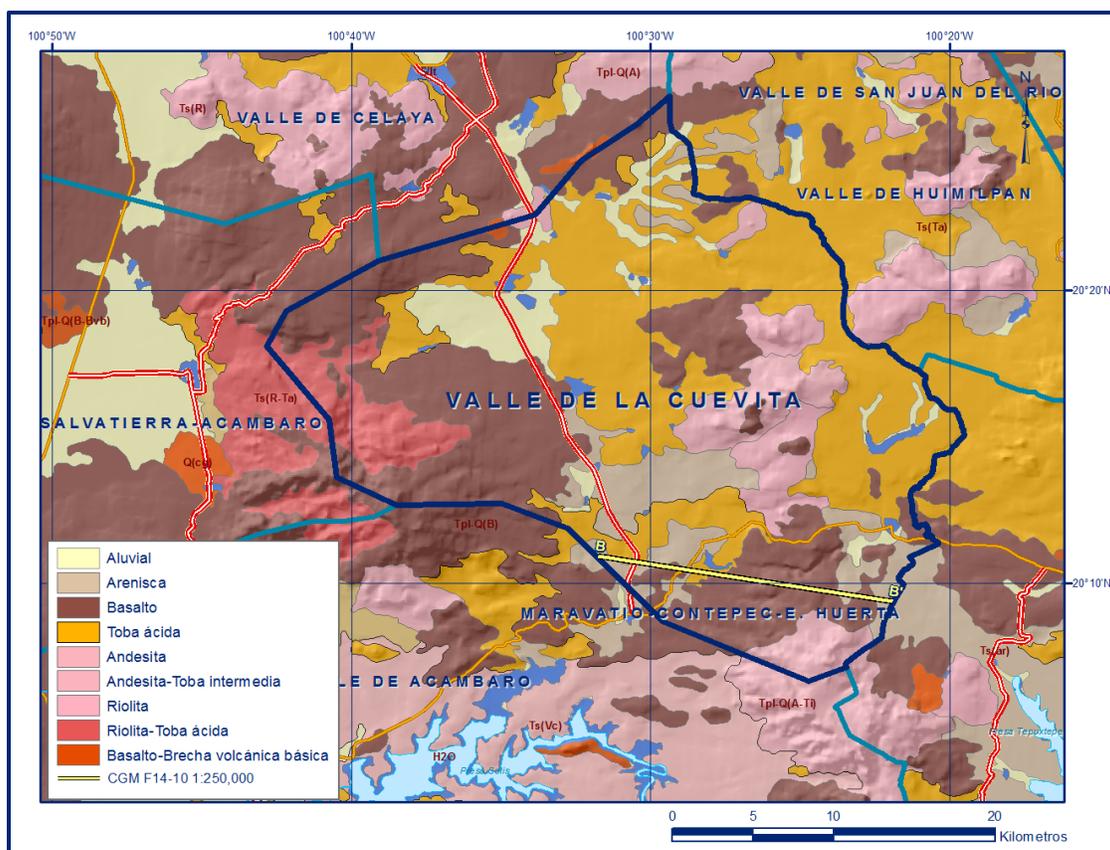


Figura 2. Geología general del acuífero

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 Pasquare *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 la Cueva afloran unidades litoestratigráficas volcánicas y sedimentarias cuya edad varía del Cenozoico al Reciente.

CENOZOICO

Secuencias Ignimbríticas del Oligoceno-Mioceno

Se agrupa con este nombre a todas las secuencias ignimbríticas correlacionables con la última fase eruptiva de la Sierra Madre Occidental, cuyos centros de emisión provienen del sureste. Esta unidad no aflora en el área de estudio; sin embargo, por correlación del comportamiento resistivo en los TEM realizados en Acámbaro, en donde afloran estas rocas, se interpreta que forman la capa inferior del sistema hidrogeológico.

En esta zona se desconoce el espesor de esta unidad, pero al norte presenta espesores de 200 a 400 m. Subyacen a las rocas basálticas y se infiere que, en esta región, a su vez, cubren con discordancia a rocas 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, distribuyéndose en el subsuelo de toda la región.

Su edad se asigna 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.

Basaltos del Mioceno Tardío

Se agrupan con este nombre a las rocas basálticas que afloran en la porción noreste del área, específicamente en la ladera septentrional de la Sierra Tierras Frías. Estas rocas deben su origen a los conductos generados por el fallamiento a fines del Mioceno, que dieron lugar a la formación del Graben de San Miguel de Allende y a la falla El Salitre en la región de Los Apaseos, y a la prolongación de la falla del Bajío, en el valle de Salvatierra.

Las características distintivas de estas rocas basálticas, son la presencia de cierta 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 morfología, es característica y su emplazamiento a través de fallas profundas asociadas a la distensión del Mioceno Tardío. Se le asigna la edad con base en su origen y por correlación estratigráfica con los basaltos de Querétaro que tienen una edad de 8 Ma (Pasquaré, et.al., 1991, en SARH Geohidrológica Mexicana, 1981).

Secuencias Andesíticas del Cenozoico Tardío

Con este nombre se identifican las secuencias volcánicas de La Sierra de Puroagua y de la Sierra Tierras Frías, que forman parte de la misma serranía. De acuerdo con las secuencias observadas en campo, se considera que esta unidad está formada por el alineamiento de dos estratovolcanes pequeños, con orientación NW-SE.

Está representada por secuencias de piroclásticos y tobas coronadas por lavas masivas fracturadas de composición andesítica; en otros sitios, se presentan brechas volcánicas y lavas con foliación. Estas rocas cubren discordantemente a la unidad de las mesetas de basalto y subyace a los volcanes de escudo, pertenecientes a las secuencias basálticas del Plioceno. En algunos sitios subyace también al aluvión.

Su espesor máximo, de 200 a 300 m, se infiere de las elevaciones máximas de estas rocas y su posible relación en el subsuelo con otras unidades. Mediante fechamientos isotópicos y relaciones estratigráficas, se le asigna una edad del Plioceno Temprano.

Secuencias Ignimbríticas del Cenozoico

Esta unidad incluye a las rocas que afloran en la porción occidental del área de estudio, en la Sierra de Los Agustinos, en donde afloran secuencias ignimbríticas, domos, brechas volcánicas y tobas, que se encuentran coronadas por lavas basálticas.

Forman la Sierra Los Agustinos, que divide los Valles de Salvatierra y La Cueva; a su vez, forma la sierra meridional del acuífero de Los Apaseos, ubicada al norte del área de estudio.

En la zona está representada por una secuencia de rocas ignimbríticas que conforman las sierras, cubriendo a tobas de composición similar. Su espesor máximo de 400 m se infiere con base en su espesor aflorante y sus relaciones estratigráficas.

La edad de esta unidad, Plioceno Temprano, se asigna con base en sus relaciones estratigráficas y geomorfología. Sin embargo, estudios previos (Pasquaré, 1991; op cit.), le asignan una edad radiométrica del Mioceno al Plioceno (10-3 Ma).

Volcanes Escudo del Plioceno-Pleistoceno

Con este nombre se identifican a las rocas pertenecientes a los extensos volcanes de escudo que tienden a alinearse con la traza de las grandes fallas NW-SE del Cenozoico Medio, que fueron reactivadas a fines del Cenozoico.

Las características distintivas de estas rocas basálticas, son en sí mismas, las estructuras de escudo a partir de las que se formaron; se encuentran 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.

Estudios paleomagnéticos le asignan una edad del Plio-Cuaternario (1.3 a 0.83 Ma). El espesor de estos basaltos, de 200 a 600 m, se pudo determinar a partir de las secciones geológicas efectuadas, corroboradas por la reinterpretación de los sondeos transitorios electromagnéticos.

CUATERNARIO

Volcanes monogenéticos y volcanes escudo del Pleistoceno

Esta unidad agrupa a las rocas extrusivas monogenéticas existentes en la zona y alineados también con fracturas profundas de la corteza, que afloran en la porción septentrional del área del acuífero.

Son basaltos que se presentan en forma de coladas acordonadas y en bloques, con algunos estratos intercalados de ceniza. Su espesor máximo es del orden de 200 m, aunque en el subsuelo su distribución se acuña hacia las cercanías de cada volcán. Su edad se asigna al Pleistoceno, durante la última etapa de vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana.

Depósitos aluviales

Estos depósitos, son escasos y de poco espesor en la región de La Cueva; están constituidos por detritos provenientes de las sierras que circundan el valle, heterogéneos, con variaciones en el tamaño de grano que varía desde arcilla hasta arena. Por su naturaleza y posición estratigráfica, se consideran como la unidad más reciente que aflora en el área. Su espesor máximo puede alcanzar 30 o 40 m. Por sus relaciones estratigráficas, se considera que su depósito inició en el Pleistoceno y continúa en la actualidad.

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).

La región ha sido afectada por dos sistemas principales de fallamiento normal de edades distintas, que han 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, 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. 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.

La región se caracteriza por la existencia de sierras alineadas en sentido NW-SE, como la sierra Los Agustinos, formada por la sobreposición de dos eventos volcánicos: el emplazamiento de una secuencia ignimbrítica con abundantes domos, que fue cubierta parcialmente por mesetas basálticas a fines del Cenozoico, y la sierra Jerécuaro-Puroaga, que está formada por el alineamiento de rocas andesíticas y riolíticas, cubiertas por derrames basálticos fisurales. Ambas sierras son de edad Mioceno Tardío y se relacionan con la actividad félsica precursora de la Caldera de Amealco, que se ubica a 20 km al SE. Como ocurre en la mayor parte del estado de Guanajuato, existen en el subsuelo secuencias ignimbríticas correlacionables con el segundo periodo efusivo de la Sierra Madre Occidental.

4.3. Geología del subsuelo

El marco geológico dentro del cual se encuentra la región tiene una marcada influencia de vulcanismo, episodio geológico cuyos productos configuraron un paisaje dominado por geoformas características de este medio magmático. La geología del subsuelo se caracteriza por la heterogeneidad de facies volcánicas asociadas a distintos episodios magmáticos, principalmente de composición basáltica y riolítica.

El sistema-acuífero constituye un valle intermontano que de acuerdo con la teoría de sistemas de flujo y de sus rasgos indicadores, especialmente topografía y piezometría, representa una zona de recarga y su porción más baja constituye una zona intermedia de un sistema de flujo regional, que se dirige hacia la región de Los Apaseos.

Se aloja en rocas volcánicas basálticas con permeabilidad primaria y secundaria por fracturamiento. Los niveles del agua subterránea se localizan a profundidades mayores de 100 m y la elevación promedio del valle es mayor que la de sus unidades hidrogeológicas vecinas Salvatierra-Acámbaro y Valle de Acámbaro.

Este sistema se formó por la sobreposición de derrames volcánicos basálticos del Cenozoico sobre el basamento riolítico, cubierto a su vez por piroclastos del Plioceno, que descienden de las laderas de las sierras ubicadas al oriente y poniente.

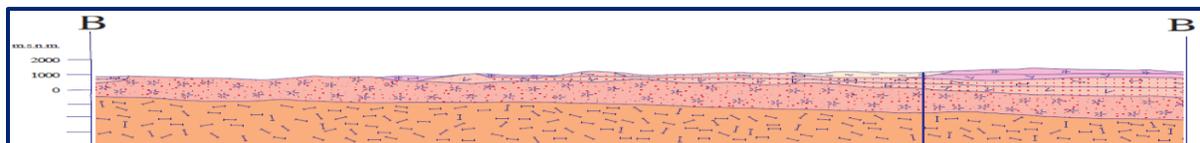
Está constituido, en su porción superior, conformado en su porción superior por un medio granular de depósitos aluviales de escaso espesor, y su porción inferior está constituido por rocas volcánicas, principalmente de composición basáltica, que afloran en la mayor parte del área.

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.

Toda la secuencia de rocas basálticas, independientemente de su edad, constituye el medio fracturado en el que su porosidad efectiva depende de la densidad de fracturamiento, así como de los sistemas de juntas o diaclasas asociadas y del grado de intersección de estas estructuras secundarias en las rocas.

Las fronteras del sistema son las sierras que lo delimitan y que conforman sus zonas de recarga, tanto hacia el este, que es la Sierra de Amealco, como al oeste, que es la Sierra Los Agustinos. En el extremo norte, su límite es arbitrario ya que este valle forma parte de la zona de recarga hacia la zona de Los Apaseos. Al sur las sierras de baja elevación conformadas por rocas volcánicas, constituyen el límite con el acuífero Valle de Acámbaro. El basamento está conformado por la secuencia de rocas ignimbríticas, o las de composición basáltica cuando a profundidad desaparece el fracturamiento.

En la sección geológica esquemática mostrada en la figura 3, se puede observar la disposición en el subsuelo de las rocas volcánicas que constituyen el acuífero.



Fuente: Carta Geológico-Minera. "Querétaro" F14-10. Esc. 1: 250,000 (SGM, 1999)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas y geofísicas permiten establecer que la dinámica del agua subterránea se presenta en un sistema-acuífero **libre**, 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 un medio granular de depósitos aluviales de escaso espesor, y su porción inferior está constituido por rocas volcánicas, principalmente de composición basáltica.

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 espesor del medio fracturado varía de 400 a 700 m en las zonas de recarga y de 200 a 300 m en la de descarga ubicada en el valle.

El paquete en su conjunto está afectado por tectonismo, generando un sistema de fosas tectónicas. El funcionamiento hidrogeológico es muy heterogéneo debido a la naturaleza de las diferentes emisiones de basalto y demás derrames volcánicos, así como al grado o intensidad de fracturamiento.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para el análisis de los parámetros hidráulicos se utilizó la información procedente de 31 pruebas de bombeo de larga duración realizadas en estudios previos, concentrada en CEASG (1998) y de 7 pruebas más realizadas en 2013 en el acuífero vecino Valle de Acámbaro que tiene el mismo origen, constitución y evolución geológica; tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De los resultados de la interpretación de estas pruebas por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad en el rango comprendido entre **$8.0 \cdot 10^{-5}$ y $13.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (6.9 y 1140.5 m^2/d)**.

Si consideramos un espesor saturado promedio de 250 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **$3.2 \cdot 10^{-7}$ a $5.28 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (0.03 a 4.6 m/d)**.

Los valores más altos corresponden a los sedimentos granulares de mayor granulometría. Para el caso del medio fracturado, las rocas basálticas presentan valores más altos de transmisividad respecto de las rocas de composición intermedia y ácida, debido a que presentan mayor 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, y por correlación hidrogeológica en acuíferos vecinos, se adoptaron valores de 0.003 a 0.05 para el coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico, respectivamente.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información histórica para diferentes años ya que la Dirección Local de la CONAGUA y la CEAG realizan mediciones piezométricas semestrales.

Debido a que para los últimos años se cuenta con mayor apoyo piezométrico, con el objetivo de evaluar una condición geohidrológica actual del acuífero, apoyada en la mejor distribución espacial de la información, se elaboraron las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático para el año 2013 y para la evolución el periodo 2006-2013.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para el 2013 presentó valores que varían de 40 a 220 m, que de manera general se incrementan a partir de la zona más baja de los valles, conforme se asciende topográficamente. Los niveles más someros, con valores de 40 a 60 m, se presentan en la región sur y suroriental del acuífero, hacia la presa Las Adjuntas y en torno del poblado Coroneo, respectivamente, incrementándose rápidamente hacia las sierras volcánicas que delimitan el acuífero.

Los valores más profundos, de 180 a 220 m, se registran en la porción sur y central del acuífero, hacia las estribaciones de la Sierra Los Agustinos y las sierras que se localizan entre los poblados Las Moras de Tacambarillo y Candelas. En el valle aluvial de La Cueva, la profundidad varía de 80 a 120 m (figura 4).

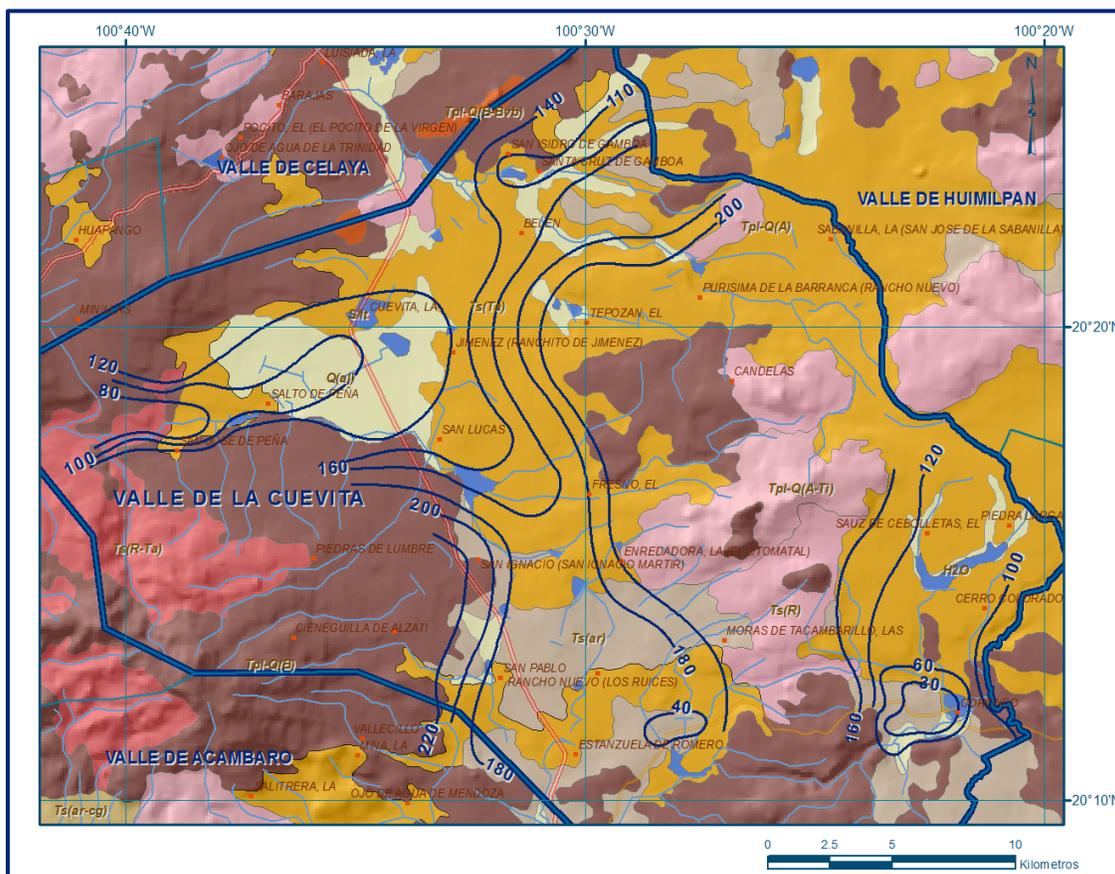


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2. Elevación del nivel estático

En el año 2013 la configuración de elevación del nivel estático presentó valores que variaron de 2,260 a 1,880 msnm, los cuales se incrementan, al igual que los de profundidad, hacia las elevaciones topográficas que delimitan los valles, mostrando una red de flujo con dirección preferencial sur-norte, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental. No se observan conos de abatimiento debido a que, por elevación de los niveles del agua subterránea y los rasgos indicadores del sistema de flujo, esta zona parece ser una zona de recarga hacia la región de Los Apaseos en el Valle de Celaya y hacia el Acuífero Valle de Huimilpan, en el estado de Querétaro.

Los valores más altos, de 2,240 a 2,260 msnm, se registran en el valle de Coroneo,

ubicando en la región suroriental del acuífero, y los más bajos, de 1,890 a 1,880 msnm, se presentan en el extremo norte, en las inmediaciones del poblado Santa Cruz de Gamboa, hacia el límite con el acuífero Valle de Huimilpan, del estado de Querétaro (figura 5).

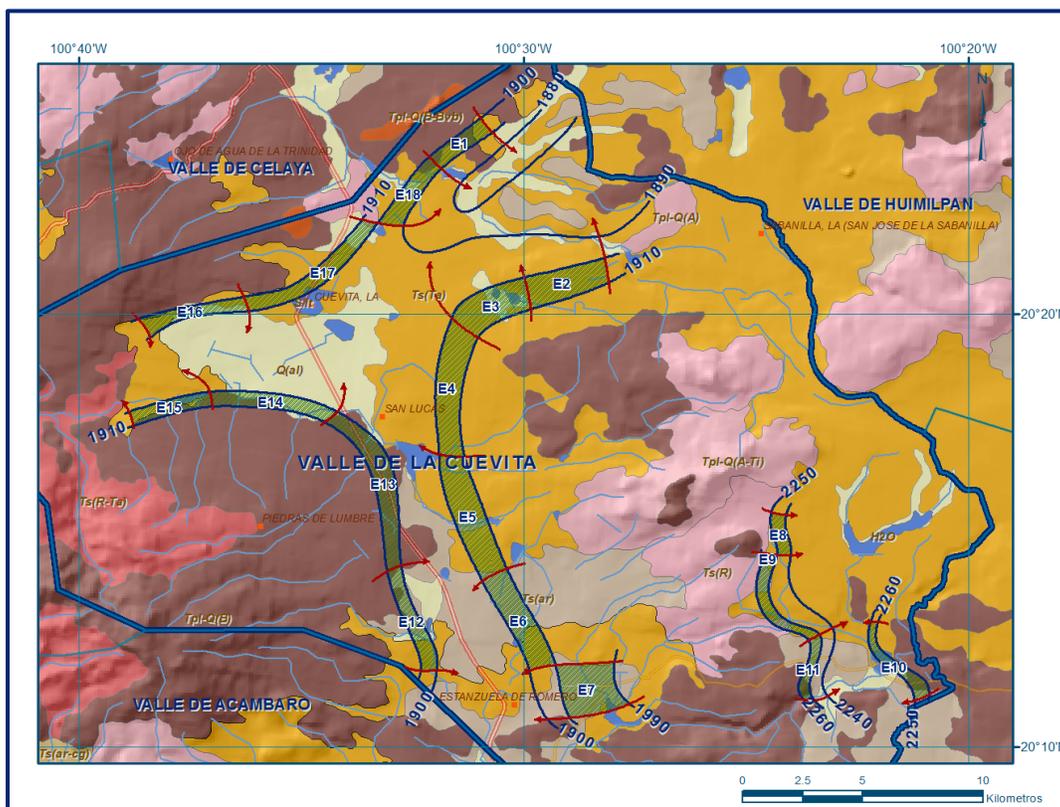


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3. Evolución del nivel estático

De acuerdo con la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2006-2013, se registraron valores tanto de recuperación como de abatimiento.

Las recuperaciones se registraron en la mayor parte de la zona de explotación, en toda la porción central del acuífero y en el valle de Coroneo, que varían de 0.5 a 1.0 m, con valores puntuales de 2 y 3 m, para el periodo analizado; es decir, de 0.1 a 0.15 m anuales.

Los abatimientos son de 0.5 a 1.0 m, que representan un ritmo anual de 0.10 m, y se presentan en la región norte y noroccidental del acuífero, en una franja orientada NE-SW, entre las poblaciones Belén, La Cueva y Salto de Peña (figura 6).

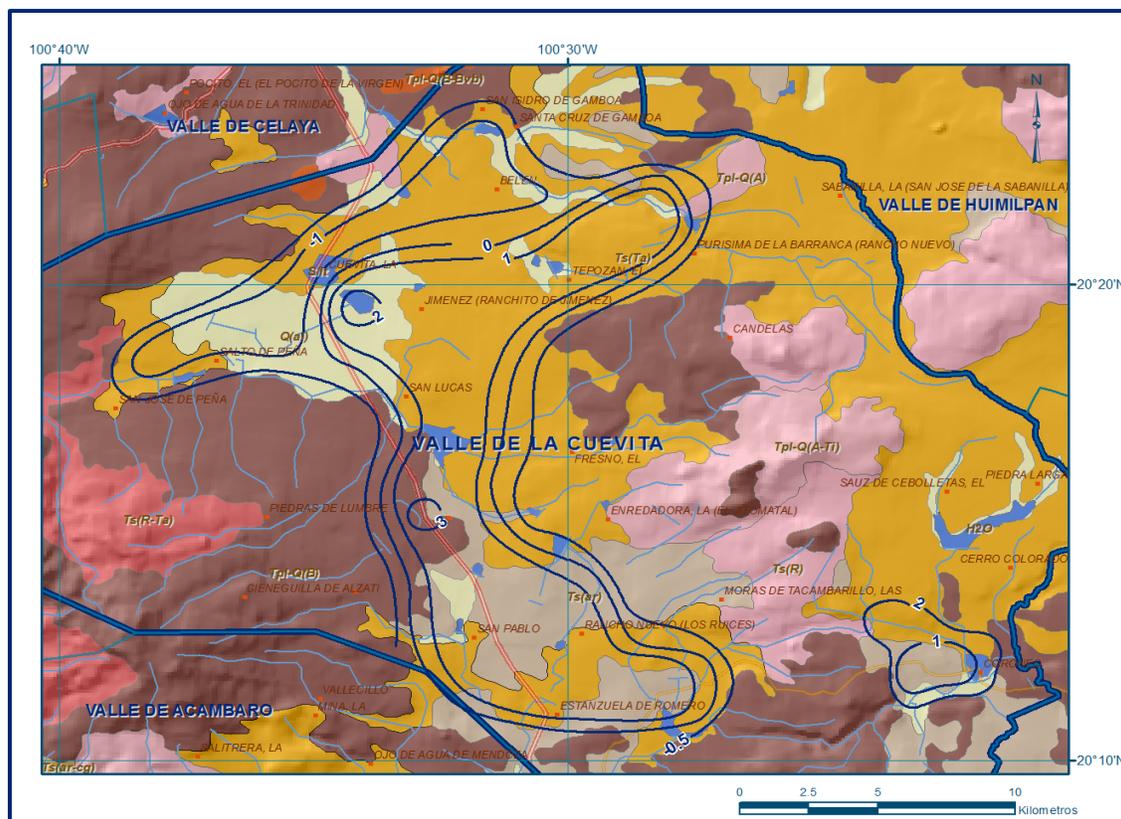


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2006-2013)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

No existe información hidrogeoquímica actual, la más reciente corresponde al estudio realizado en 1998 (CEAG) en el cual como parte de los trabajos de campo se tomaron 10 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona del acuífero para su análisis fisicoquímico. Las determinaciones incluyeron: temperatura, potencial de Hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, iones principales y sólidos totales disueltos, para la caracterización y el funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

Las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece 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, para el agua destinada al consumo humano.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 149 a 545 ppm, los cuales no sobrepasan el límite máximo permisible de 1,000 ppm establecido por la norma mencionada para el agua potable.

Los valores de conductividad eléctrica variaron de 219 a 859 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. Los valores de pH variaron de 6.0 a 7.9 y de temperatura entre 18.0 y 38.0 °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 de composición intermedia a básica, 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); la mayor parte de 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, que es apta para la agricultura sin ninguna restricción.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2015 (CEAG, 2016) se identificaron un total de 98 captaciones del agua subterránea: 90 pozos, 5 norias y 3 manantiales; de los cuales 94 se consideran activos y 4 inactivos de manera temporal.

Del total de obras 36 son para uso agrícola, 60 para abastecimiento de agua potable y 2 para otros usos.

El volumen total de extracción estimado es de **8.6 $\text{hm}^3/\text{año}$** , de los cuales, 5.7 $\text{hm}^3/\text{año}$ (66.3 %) son para uso agrícola y 2.9 $\text{hm}^3/\text{año}$ (33.7%) es para uso público-urbano. El volumen para otros usos es muy pequeño. Adicionalmente, a través de los **3 manantiales** se descarga un caudal de 9.5 lps, que representa un volumen anual de **0.3 hm^3** , destinado al uso público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.

El balance de aguas subterráneas se planteó para año el periodo 2006-2013, que es el que presenta mayor cantidad de información, con la mejor distribución espacial; en una superficie aproximada de **231 km^2** de la zona en la que están dispersos la gran mayoría de 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 otras fuentes 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.

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

Donde:

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:

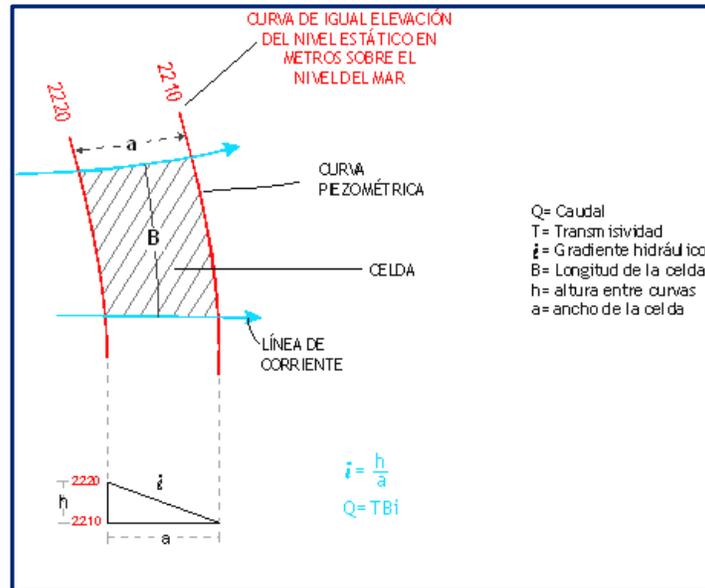
$$Q = B * i * T$$

Donde:

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 **4.9 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo en el acuífero (2013)

CELDA	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	2885	650	10	0.0154	0.0003	0.0133	0.4
E2	4040	865	10	0.0116	0.0001	0.0047	0.1
E3	3170	1155	10	0.0087	0.0001	0.0027	0.1
E4	5190	865	10	0.0116	0.0001	0.0060	0.2
E5	5480	795	10	0.0126	0.0001	0.0045	0.1
E6	4325	935	10	0.0107	0.0002	0.0093	0.3
E7	1875	2740	80	0.0292	0.0001	0.0055	0.2
E8	1975	505	10	0.0198	0.0001	0.0039	0.1
E9	4180	575	10	0.0174	0.0001	0.0073	0.2
E10	3965	650	10	0.0154	0.0002	0.0122	0.4
E11	3030	430	10	0.0233	0.0002	0.0141	0.4
E12	4545	720	10	0.0139	0.0001	0.0063	0.2
E13	7355	650	10	0.0154	0.0002	0.0226	0.7
E14	5770	720	10	0.0139	0.0002	0.0160	0.5
E15	3030	795	10	0.0126	0.0002	0.0076	0.2
E16	4180	650	10	0.0154	0.0001	0.0064	0.2
E17	6635	795	10	0.0126	0.0001	0.0083	0.3
E18	3315	935	10	0.0107	0.0001	0.0035	0.1
TOTAL							4.9

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 que la profundidad media a la que se localiza del agua subterránea en la zona agrícola varía de 50 a 100 m y a la permeabilidad media a baja de los sedimentos del subsuelo.

El volumen de agua que se destina al uso agrícola es de 5.7 hm³ anuales; si consideramos que el 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero como recarga efectiva, obtenemos un volumen de 0.6 hm³/año de los excedentes del riego.

Por otra parte, el volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 2.9 hm³, tomando en cuenta que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y que un 10 % 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 0.3 hm³ anuales.

Por lo tanto, **Ri = 0.3 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 **8.6 hm³/año**.

7.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 3 manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 9.5 lps, que representan un volumen de **0.3 hm³ anuales**.

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 2006-2013 mostrada en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.05 se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 231 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;

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica, tanto de abatimiento como de recuperación, se pueden observar en la tabla 3. El volumen anual del cambio de almacenamiento para este periodo es de 7.0 hm³, que representa un promedio de **1.0 hm³ anuales**.

Tabla 3. Evolución del nivel estático en m (2006-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
3	3	1.1	0.05	0.2
2	2	1.4	0.05	0.1
1	1	4.1	0.05	0.2
0 a 1	0.5	36.1	0.05	0.9
0 a -0.5	-0.25	58.0	0.05	-0.7
-1.0	-1.0	27.8	0.05	-1.4
1 a 2	1.5	102.5	0.05	7.7
Área de balance		231.0	TOTAL	7.0
			Promedio anual	1.0

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:

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

$$R_v = 8.6 + 0.3 + 1.0 - 4.9 - 0.3$$

$$R_v = 4.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_r + R_i$$

$$R = 4.2 + 4.9 + 0.5 + 0.3$$

$$R = 9.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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 **9.9 hm³ anuales**, de los cuales 9.0 hm³ corresponden a la recarga natural y 0.9 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 la Cueva, su valor es de **0.3 hm³ anuales**, que corresponden a la descarga de los manantiales que está comprometida para usos público-urbano.

Por lo tanto, **DNC = 0.3 hm³/año**

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **10,823,916 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 9.9 - 0.3 - 10.823916 \\ \text{DMA} &= -1.223916 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es **1,223,916 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en el Valle de La Cueva, en la Porción Suroriental del estado de Guanajuato. Realizado por Geohidrológica Mexicana, S.A.