CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO GARCÍA DE LA CADENA (3207), ESTADO DE ZACATECAS

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1 Localización del acuífero 2
1.2 Situacion administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 4
3. FISIOGRAFÍA 5
3.1 Provincia fisiográfica 5
3.2 Clima 6
3.3 Hidrografía 6
3.4 Geomorfología 7
4. GEOLOGÍA 7
4.1 Estratigrafía 10
4.2 Geología estructural 12
4.3 Geología del subsuelo 13
5. HIDROGEOLOGÍA 14
5.1 Tipo de acuífero 14
5.2 Parámetros hidráulicos 14
5.3 Piezometría 15
5.4 Comportamiento hidráulico 15
5.4.1 Profundidad al nivel estático 15
5.4.2. Elevación del nivel estático 16
5.4.3 Evolución del nivel estático 17
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 20
7.1 Entradas 20
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 21
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 21
7.2 Salidas 23
7.2.1 Bombeo (B) 23
7.2.2 Descarga de manantiales (Dm) 23
7.2.3 Evapotranspiración (ETR) 23
7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb) 25
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 25
8. DISPONIBILIDAD 26
8.1 Recarga total media anual (R) 26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 27
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 27
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA) 27
9. BIBLIOGRAFÍA 29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la "NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización del acuífero

El acuífero García de la Cadena, definido con la clave 3207 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo sur del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de Jalisco, entre los paralelos 21°02'29" y 21°26'08" de latitud norte y entre los meridianos 103°16'42" y 103°43'20 de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,033 km^2.

Limita al norte con el acuífero Tlaltenango-Tepechitlán, al este con el acuífero Jalpa-Juchipila, ambos pertenecientes al estado de Zacatecas; al sureste limita con el acuífero Los Puentes, y al sur y oeste con el acuífero San Martín de Bolaños,

pertenecientes al estado de Jalisco (figura 1). Geopolíticamente, el territorio que cubre el acuífero comprende totalmente el municipio Trinidad García de la Cadena y la mayor parte de los municipios Teúl de González Ortega y Mezquital del Oro.

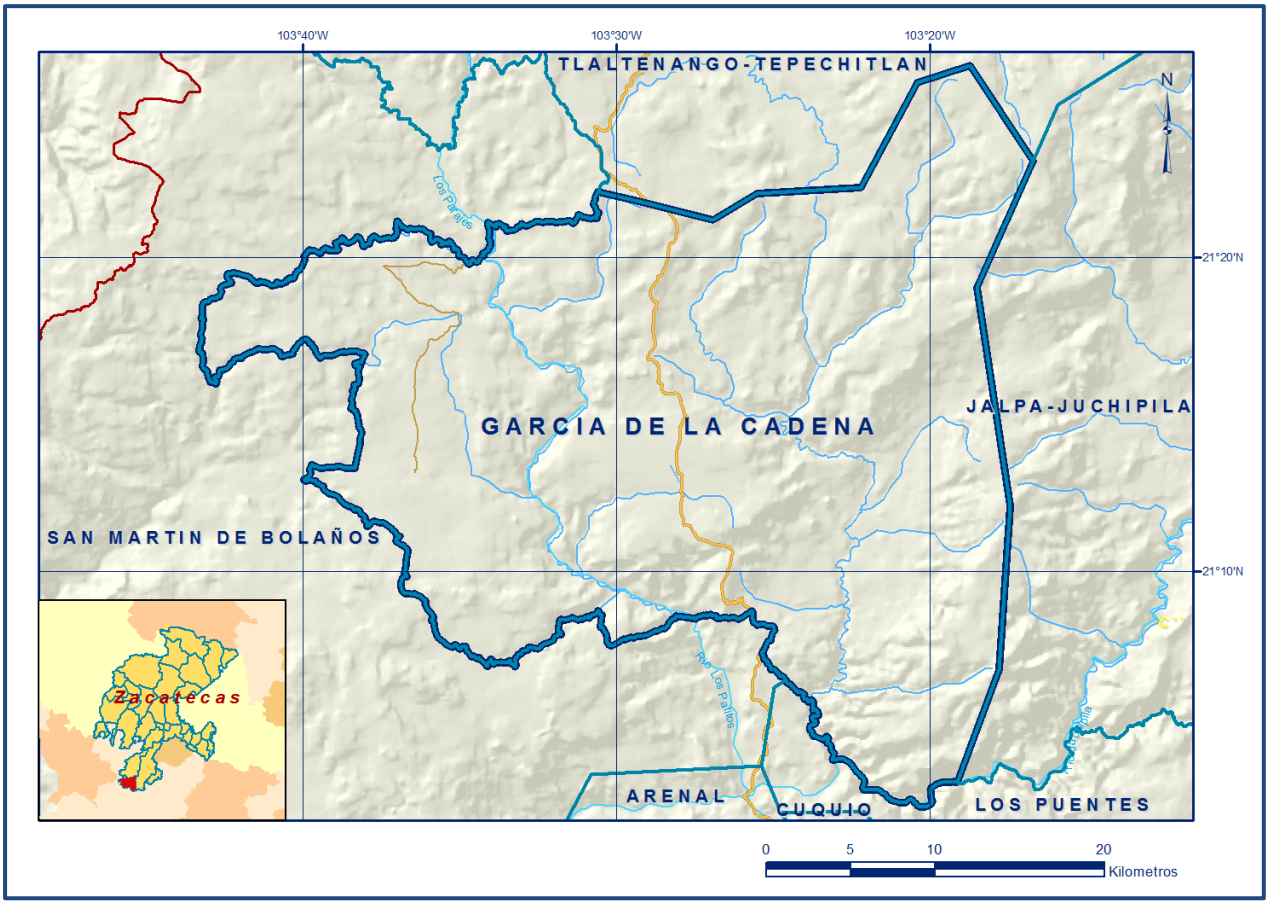


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

ACUIFERO 3207 GARCIA DE LA CADENA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	29	10.9	21	21	46.1	
2	103	26	56.2	21	21	11.4	
3	103	25	30.9	21	22	3.4	
4	103	22	11.9	21	22	15.0	
5	103	20	24.7	21	25	34.3	
6	103	18	43.8	21	26	8.0	
7	103	16	42.2	21	23	4.5	
8	103	18	29.6	21	19	3.6	
9	103	17	27.1	21	12	6.2	
10	103	17	47.1	21	6	51.7	
11	103	19	8.2	21	3	16.4	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	103	24	36.1	21	6	33.3	DEL 12 AL 13 POR EL LIMITE ESTATAL
13	103	30	35.8	21	22	6.3	
1	103	29	10.9	21	21	46.1	

1.2 Situacion administrativa del acuífero

El acuífero García de la Cadena pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa u Organismo de Cuenca VIII "Lerma-Santiago-Pacifico", al Consejo de Cuenca "Río Santiago", instalado el 14 de julio de 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del *"Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas, así como en el resto de los Municipios del Estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en los municipios señalados"*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de agosto de 1988. Este decreto es de tipo III, en el que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero sólo se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de cobertura regional, los cuales se citan a continuación:

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS VILLA GARCÍA, EL SALVADOR, GUADALUPE GARZARÓN, CAMACHO Y EL CARDITO, ESTADO DE ZACATECAS Y EVALUACIÓN

GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS GARCÍA DE LA CADENA, PINO SUÁREZ Y CORRALES, ZAC., elaborado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C., para la Comisión Nacional del Agua, en 2007. El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento del flujo subterráneo, profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea, mediante la obtención de información procedente de las redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua de acuíferos del estado de Zacatecas, entre los cuales se incluye García de la Cadena, para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, determinar la recarga media anual del agua subterránea y las componentes de balance de agua subterránea.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO GARCÍA DE LA CADENA, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático y la hidrometría para cuantificar el volumen de extracción. El estudio geohidrológico y la piezometría obtenida por la Dirección Local Zacatecas, son la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se ubica completamente dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en la provincia Sierra Madre Occidental, subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos.

La Sierra Madre Occidental se extiende en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco. Es un gran sistema montañoso que tiene su origen en el Cenozoico Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1500 y 1800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias. Por su parte, la subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos se caracteriza por sus sierras altas, de 2,300 a 2,700 msnm, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección. Los pisos de los valles son de pendientes suaves, con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos. El drenaje se dirige a través de los valles

hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Santiago.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero (85%) domina el clima semicálido templado (A)C(wo) del grupo C, con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frio menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. En la superficie restante, principalmente de la zona norte, el clima es C(w1) templado, subhúmedo, con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frio entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Ambos climas presentan precipitación de 700 a 1000 mm anuales, del mes más seco menor de 40 mm, régimen de lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 8 estaciones climatológicas que se ubican cercanas y dentro del área del acuífero: Teúl de González Ortega, Florencia de Benito Juárez, Juchipila, Moyahua de Estrada, Mezquital del Oro, García de la Cadena, Huitzila y Milpillas de Allende.Con los registros obtenidos para diferentes periodos, el más grande 1963-2017 y el más corto 1990-2017, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **759.5 mm, 19.0 °C y 1,590.3 mm**, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia: uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que se registran de noviembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. La temporada de estiaje total ocurre de marzo a mayo, la región presenta de 0 a 20 heladas por año y granizadas de 2 a 6 días anuales.

3.3 Hidrografía

La zona en la que se ubica el acuífero se localiza en la Región Hidrológica No. 12 “Lerma-Santiago”, subregión hidrológica Alto Santiago, dentro de las cuencas hidrológicas Río Santiago-Guadalajara, Río Juchipila y una pequeña fracción de la cuenca Río Bolaños; subcuencas de los ríos Cuixtla, Mezquital y Tlaltenango. La cuenca Río Juchipila 2 tiene una superficie de aportación de 2,599 km^2, y se ubica en la región centro-oeste del país, que se encuentra delimitada al norte por las cuencas hidrológica Río Juchipila 1 y Río Tlaltenango, al sur por la cuenca hidrológica Río Santiago 2, al este por la cuenca

hidrológica Río Verde 1 y al oeste por las cuencas hidrológicas Presa Santa Rosa y Río Tlaltenango.

El río colector más importante de la zona es el Río Cuixtla, nace en el estado de Zacatecas con el nombre Río Los Patitos a 20 km al oeste de la localidad Teúl de González Ortega, a una elevación de 1800 msnm. Su cauce sigue un rumbo sureste hasta su confluencia al colector general por margen derecha, a 800 msnm, en el sitio conocido como San Cristóbal de la Barranca. Sus principales afluentes son: por margen derecha el arroyo Huitzila a 1,450 msnm; y por la izquierda, el arroyo Estanzuela, a 1,250 msnm.

En la superficie que cubre el acuífero la infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial es escasa. Está representada por las presas: Los Cardos, ubicada en la porción oriente de la zona, entre las comunidades Palo Verde y Los Cardos, con capacidad de almacenamiento es de 0.29 hm^3, aprovecha las aguas del arroyo El Platanar; y la presa El Ocote, localizada en la porción sureste, en la comunidad del mismo nombre, que aprovecha las aguas del arroyo Grande y tiene una capacidad de almacenamiento de 0.02 hm^3.

3.4 Geomorfología

El paisaje de relieve dentro del área se caracteriza por la presencia de los siguientes sistemas de topoformas: Sierras, que se extienden en la mayor parte del territorio del acuífero, hacia el sur y oeste, en los límites con el estado de Jalisco, en este sistema se ubican las comunidades Huitzila y Milpillas de Allende. Los lomeríos se presentan en las regiones centro y sureste de la zona. Mesetas que sólo se observan en la región central del acuífero, en las cercanías de la localidad Trinidad García de la Cadena; por último, los cañones, están distribuidos en las porciones este y sureste del acuífero, la localidad que se encuentra en este sistema es Mezquital del Oro. En la zona se presentan elevaciones que varían de 840 msnm (porciones sur y sureste del área) a 2,520 msnm (porción noreste); es decir, existe un desnivel de 1,680 m en una distancia muy corta, lo que provoca escurrimientos torrenciales.

4. GEOLOGÍA

La litología del área está representada por rocas ígneas extrusivas e intrusivas, así como sedimentarias continentales y lacustres. Las ígneas son de composición ácida, intermedia y básica. Las ácidas son de tipo explosivo, emitidas principalmente a través de aparatos volcánicos tipo caldera que corresponden principalmente a flujos de ignimbritas. Las de composición intermedia están representadas por andesitas,

extravasadas como derrames a través de aparatos volcánicos ya erosionados y en algunos casos asociadas a las calderas. Las rocas de composición basáltica se presentan en forma de derrames que fueron emitidos a través de fracturas. También se observan cuerpos intrusivos como diques de composición diorítica. Los afloramientos más extensos son los de las ignimbritas y en algunas áreas están profundamente erosionadas, formando grandes depresiones que originaron lagos, donde se depositaron calizas y lutitas; además de arcillas, areniscas y conglomerados, éstas dos últimas con alto contenido de sedimentos finos.

Durante el Cenozoico el Occidente de México estuvo sujeto a la influencia de un arco magmático generado por la tectónica convergente que afecto la región (Mc Dowell y Clabaugh, 1979), dando lugar al paquete volcánico que conforma la Sierra Madre Occidental (SMO), que inició durante el Eoceno Medio con derrames riolíticos y eventos ignimbríticos. El Oligoceno-Mioceno de la SMO según Damon et al, 1981, se generó en dos eventos, al principio del Oligoceno (Mc Dowell y Keizer, 1977) se depositan rocas de composición intermedia constituidas por andesitas y andesitas basálticas, que conforman la serie andesítica inferior. El segundo evento aportó las rocas de mayor distribución con espesores mayores a 800 m, de una secuencia continua en la que predominan las tobas riolíticas, riolitas-ignimbritas y dacitas con edades del Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (Mc Dowell y Keizer, 1977; Roesler et al., 1994); dentro de este paquete se presentan de manera local brechas riolíticas y basálticas.

A partir del Mioceno Medio se llevó a cabo un nuevo evento volcánico bimodal que corresponde a la manifestación del Eje Neovolcánico, las rocas más antiguas de este evento están representadas por rocas de composición andesítica. El Mioceno Superior se manifiesta por la presencia de tobas riolíticas y basaltos que están representados por una serie de coladas. Durante el Neógeno se depositaron una serie de areniscas arcillosas, capas conglomeráticas y tobas líticas que rellenaron las fosas tectónicas de Aguascalientes y Tlaltenango. Los horizontes de gravas están empacados por arenas gruesas y medianas que presentan materiales disgregados y transportados, así como cenizas, cuyo espesor se estima que sea superior a 200 m. Entre Moyahua de Estrada y Tabasco, Zac., existe un paquete sedimentario continental depositado como rellenos de fosa de edad Plioceno que consta de calizas, lutitas, areniscas y lentes de conglomerados de hasta 200 m de espesor; las calizas que afloran en el camino Palmarejo-Atecajete al sur Moyahua y en el arroyo del Laurel, antes de desembocar al río Juchipila, contienen gasterópodos. Al suroeste de Huanusco, en las cercanías del poblado Guatemala, se encontró fauna en las areniscas de esta unidad.

Posteriormente a esta secuencia se tiene una unidad de conglomerados oligomícticos y polimícticos del Plioceno Medio, sobre los que descansan derrames basálticos del Plioceno, que a su vez son cubiertos por tobas basálticas. Los Eventos volcánicos se manifestaron hasta el Plio-Cuaternario, definida por medio de dataciones radiométricas realizadas por Nieto et al., 1985 y Moore et al., 1994, que reportan edades entre 3.19 a 3.77 Ma.

Durante el Pleistoceno-Holoceno se depositaron cenizas riolíticas y lapilli, de estratificación masiva y arena fina con estratificación cruzada, que presentan restos de vertebrados datados con paleontología por D.H. Láscares (1979), quien las denomina Toba Aguascalientes. Rellenando las depresiones topográficas se encuentra material de aluvión que fue transportado por los ríos y arroyos, constituido principalmente por gravas, arenas y limos. Por último, las rocas ígneas intrusivas que cortan la secuencia volcánica cenozoica afloran en localidades restringidas en forma de granitos, granodioritas y dioritas. En algunos lugares se observa la presencia de cuerpos intrusivos de tipo pórfido andesítico y pórfido dacítico, a los que se le atribuye la mineralización en Mezquital del Oro, Las Caballerías al sureste de Jalpa y Aréchiga (Carta Geológico-Minera Aguascalientes F13.9. Escala 1:250,000. SGM, 1998) (figura 2).

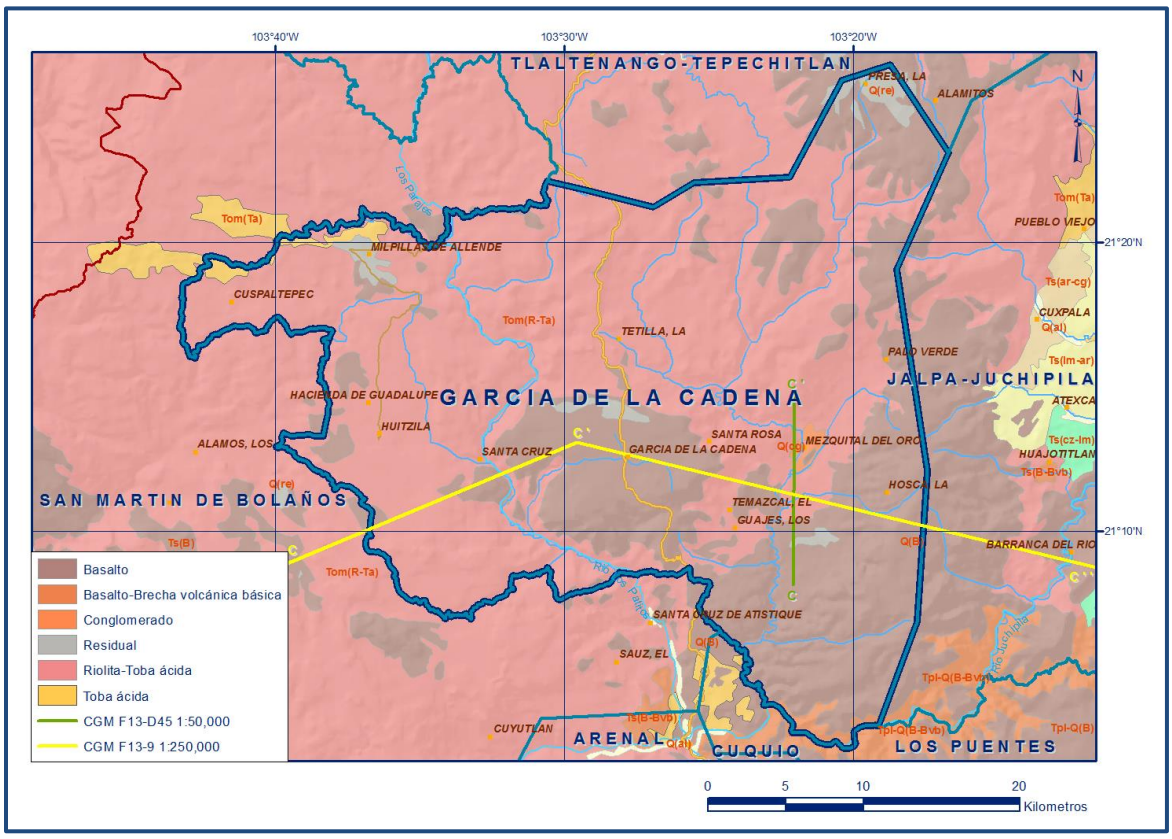


Figura 1. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica comprende un registro que va del Cenozoico al Cuaternario y está conformada principalmente por rocas ígneas y sedimentarias, que se describen a continuación:

CENOZOICO

Andesitas

Son derrames de andesitas de color gris a gris oscuro, con algunas intercalaciones de brechas y aglomerados, que presentan textura tanto porfídica como afanítica y estructura compacta, con escaso fracturamiento. La datación radiométrica practicada en una muestra obtenida en la Sierra Morones, cerca del Rancho Aréchiga, ubicado a unos 10 km al poniente del poblado de Jalpa, le asignan una edad Eoceno-Oligoceno (48.1± 2.6 Ma). Sus mayores afloramientos se ubican principalmente en la base de los altos de falla o pilares tectónicos de la Sierra Morones, que limita al acuífero y al cañón en su porción occidental. Los más septentrionales se observan al nor-oeste y oeste del poblado Tabasco y oeste de Huanusco. Al noroeste de Tabasco y otras dos localidades los afloramientos de estas rocas están asociados a un volcán y dos calderas; otros afloramientos de extensión considerable, se localizan en las cercanías de Mezquital del Oro, asociados también a pilares tectónicos y aparatos volcánicos; como es el caso del graben en el que el Río Mezquital ha labrado su cauce. Estas rocas constituyen el basamento geohidrológico de los acuíferos alojados en las ignimbritas.

Riolitas e ignimbritas

Son depósitos derivados de flujos piroclásticos del tipo de nubes ardientes, presentan diferentes estructuras, texturas y composición, que permiten ser diferenciadas en las 3 unidades en que se agruparon. La unidad de tobas riolíticas que conforma la base de la secuencia; la unidad de ignimbritas y riolitas, así como rocas de composición principalmente dacítica, con algunos derrames de composición riolítica, que presentan estructura compacta por solidificación de las partículas de lava que arrastró la explosión y se soldaron con los demás elementos; y por último, la unidad de derrames riolíticos e ignimbritas compactas, entre cuyos pseudoestratos se encuentran esporádicos derrames de basaltos.

Las rocas muestran en conjunto una coloración rojiza, con tonos amarillentos y presentan un aspecto fisiográfico en forma de extensas mesas profundamente disectadas y afectadas por diversos sistemas de fracturas y fallas. La edad que se les ha asignado varía del Oligoceno Superior al Mioceno, de acuerdo a las determinaciones radiométricas realizadas que arrojaron edades absolutas de 25.2±2.2

Ma., 24.9±2.7 Ma., y 23.7±1.4 Ma. Las muestras fueron tomadas en el extremo sur de la Sierra Fría, unos 5 km al noreste de Juchipila. Los principales afloramientos constituyen la sierra Morones, ubicada al noreste de García de la Cadena, las rocas son principalmente de la unidad de tobas riolíticas, sobre las cuales yacen las otras unidades. Los afloramientos de estas rocas están cubiertas por los derrames de basaltos del Mioceno. Los derrames riolíticos e ignimbritas se restringen a la porción norte de la Sierra de Morones.

Derrames de basaltos

Representan los derrames emitidos durante el Mioceno Superior y corresponden a las primeras manifestaciones de la provincia geológica Eje Neovolcánico, cuyo extremo nor-central limita con el área del acuífero. En esta zona el vulcanismo se manifestó tanto a través de aparatos volcánicos como por fracturas. Sus afloramientos tienen áreas de varios kilómetros de extensión y constituyen una secuencia de brechas de color gris oscuro y rojizo, de estructura compacta y fracturada, que se observan en la porción centro, noreste y sureste del área, en el límite con la provincia geológica mencionada. Existen varios aparatos volcánicos que derramaron grandes cantidades de lava, rellenando depresiones y formando extensas mesas que después fueron disectadas por las corrientes superficiales, originando profundos y estrechos cañones.

Conglomerado

De finales del Cenozoico se tienen depósitos clásticos continentales de relleno de fosa, constituidos por un conglomerado oligomíctico y arenisca con estratificación cruzada y paleocanales. Esta unidad se presenta en afloramientos de forma alargada, de mediana extensión, que se observan principalmente en las cercanías de la localidad Mezquital del Oro, conformando pequeñas lomas de cimas aplanadas. Esta porción está afectada por el fallamiento NE-SW que formó el Graben Mezquital del Oro; se estima que en esta zona los depósitos lacustres alcanzan su mayor espesor debido a que no se han erosionado. De acuerdo a su posición estratigráfica se le asigna una edad del Plioceno medio.

CUATERNARIO

Depósitos de Aluvión

Unidad detrítica no consolida de origen aluvial y fluvial, constituida por depósitos recientes formados por sedimentos de formas subredondeadas a redondeadas que son producto de erosión de las rocas existentes y que rellenan los valles y márgenes de ríos y arroyos; así como como por los depósitos residuales y de piedemonte. Está representado por depósitos de gravas, arenas y limos mezclados en todas

proporciones; que se acumularon en las regiones topográficamente más bajas, principalmente en las márgenes y lecho del Río Juchipila y arroyos. Su espesor máximo es de 10 m. Entre sus componentes destacan los líticos de calizas, conglomerados, areniscas y rocas volcánicas, producto de la erosión de las rocas existentes. Los fragmentos o clastos gruesos se localizan en las cercanías de las sierras mientras que los finos en el centro de los valles, en donde localmente se desarrollan suelos arcillosos.

4.2 Geología estructural

Estructuralmente, el tipo de deformación en el área corresponde al régimen frágil, representado por fallamiento de tipo normal y lateral, producto de esfuerzos distensivos. Entre las estructuras interpretadas se tiene el graben Mezquital del Oro ubicado en la porción centro oriental del área, conformado por el mismo fallamiento que dio forma al graben del cañón de Jalpa-Juchipila situado al este. El graben de la zona está delimitado por las fallas normales Mezquital del Oro y El Avión; otra estructura es el semigraben Huitzila, ubicado al poniente del área, delimitado en su flanco oriental por la falla normal El Muro de orientación casi N-S, y al sur por la falla normal La Cascada con orientación general E-W. El fallamiento de tipo normal está representado por estructuras de diversas dimensiones orientadas al NW y NE. Entre las fallas de mayor longitud se tienen El Tepozán y El Avión, orientadas al NW y NE respectivamente. El fallamiento lateral se ubica principalmente en la porción centro norte y corresponde a fallas interpretadas con componente dextral. Se documentaron las estructuras dómicas Los Pericos, Los Tlacuaches y Charco del Perro, en rocas riolíticas del Mioceno-Plioceno, las dos primeras asociadas con los lineamientos curvos Tlacuache y Perico (carta Geológico-Minera García de la Cadena F13-D45, Esc. 1: 50,000, SGM, 2016).

El sistema de pilares y fosas tectónicas que se extiende desde el NW de Estados Unidos hasta el centro de México, ha afectado prácticamente a toda la Sierra Madre Occidental. Es el caso de la región de García de la Cadena, que pertenece al fallamiento regional “Cuencas y Sierras”, asociado con el movimiento de placas litosféricas actuales. Bajo este fallamiento regional también se encuentran las fosas tectónicas de Jalpa, Calvillo y Tabasco, Zac., asociadas a la Mega Falla Aguascalientes –León (Mitre-Salazar et al., 1989), estudio basado en la observación de imágenes de satélite, así como cartas geológicas de diferentes escalas de INEGI.

Estructuralmente se han reconocido fallas normales y fracturas, así como aparatos volcánicos con derrames asociados y extensas mesetas piroclásticas. Las fallas normales se presentan con una orientación norte-sur y conforman fosas tectónicas y

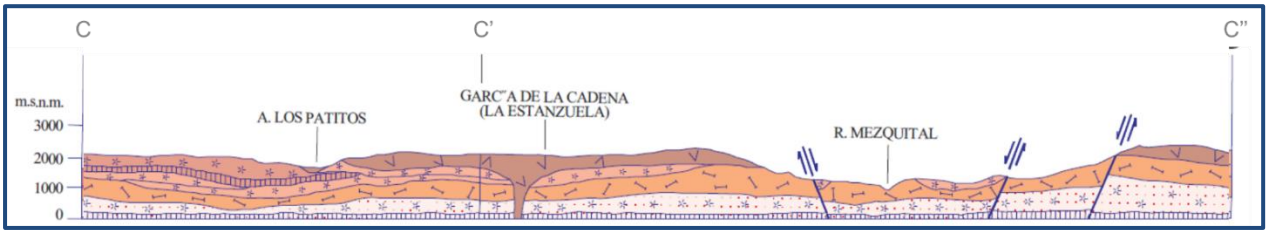
escalonamientos estructurales. Las fracturas están dispuestas en dos orientaciones preferenciales de NW-SE y NE-SW y asume que son originadas por eventos distensivos comunes a toda la región.

Los principales lineamientos estructurales de primer orden representan un fallamiento normal en forma escalonada, produciendo así el modelo de fosas y pilares que caracteriza la región. Las fosas presentan un rumbo general NE-SW, con un ancho promedio de 12 km, como son las fosas de Bolaños, Tlaltenango, Jalpa y Juchipila. Los lineamientos de segundo orden corresponden a un fallamiento de rumbo N-S, y los de tercer orden presentan un rumbo NW-SE. En el pilar tectónico de Sierra de Morones existen conos volcánicos que originaron curvilineamientos de 15 a 20 km de diámetro; existen además otros curvilineamientos paralelos que pueden deberse a calderas sepultadas, que muestran fallamiento radial de rumbo NE. Las fases de deformación de la región se relacionan con eventos compresivos ocurridos durante el Mesozoico y Cenozoico, y fases distensivas evidenciadas por el fallamiento normal y el emplazamiento plutónico Cretácico-Cenozoico así como el vulcanismo Cenozoico (Carta Geológico-Minera Aguascalientes F13-9, Escala 1: 250,000. SGM, 1998).

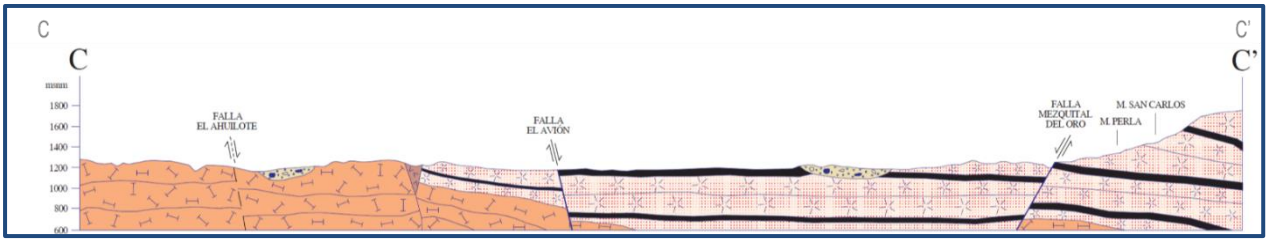
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica del acuífero, cortes litológicos de pozos y por correlación con acuíferos vecinos, es posible afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada, desde gravas hasta arcillas, y los conglomerados oligomícticos y polimícticos que rellenan los valles, cuyo espesor varía desde algunos metros hacia los flancos de las sierras, hasta 200 m en la porción central delos valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que predominan riolitas e ignimbritas y menor proporción tobas ácidas y basaltos, cuyo espesor conjunto alcanza 400 m, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas volcánicas cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento a profundidad, y localmente por rocas intrusivas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera "Aguascalientes" F13-9, Esc. 1: 250,000 (SGM, 1998)



Fuente: Carta Geológico-Minera "García de la Cadena" F13-D45, Esc. 1: 50,000 (SGM, 2016)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado. La porción superior está conformada por sedimentos aluviales, de granulometría que varía de gravas a arcillas y conglomerados polimícticos y oligomícticos, cuyo espesor puede alcanzar hasta 200 m en el centro delos valles, que fueron depositados en fosas de origen tectónico, ocasionadas posiblemente por el fallamiento escalonado en forma de horts y grabens, provocado por la tectónica distensiva desarrollada durante el Oligoceno. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica y en menor proporción basáltica, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El espesor conjunto de las rocas volcánicas es superior a 400 m, ya que los pozos perforados en ellas a dicha profundidad no han atravesado toda la unidad. De acuerdo con la información geofísica, la última capa detectada está formada por material arcillo-arenoso de baja resistividad sin interés geohidrológico, por lo que es posible que esta unidad constituya el basamento del acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2007, se ejecutaron 2 pruebas de bombeo, de corta duración tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se obtuvieron valores de transmisividad que varían entre **1.8 x 10^{-2} m^2/s** y **6.5 x 10^{-4} m^2/s.**

Tomando en cuenta un espesor saturado promedio de 50 m, los valores de conductividad hidráulica varían entre **3.6 x 10^{-4}** y **1.3 x 10^{-5} m/s (31.2** a **1.1 m/d).**

Adicionalmente, se adoptaron por correlación hidrogeológica los resultados de la interpretación de 12 prueba de bombeo de corta duración realizadas en 2005 y 2008 como parte de los estudios hidrogeológicos llevados a cabo en los acuíferos vecinos Jalpa-Juchipila y Tlaltenango-Tepechitlán, respectivamente, que tienen el mismo origen y constitución geológica. Los valores de transmisividad variaron de **1.3 x 10^{-4}** a **5.4 x 10^{-3} m^2/s** y de conductividad hidráulica de **6.5 x 0^{-8}** a **2.75 x10^{-5} m/s (0.056** a **2.37 m/día).**

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, para fines del balance de aguas subterráneas, considerando el tipo y características de los materiales que constituyen el subsuelo de la región, se adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.05**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2007 así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2007-2019, que es el que tiene mayor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2019 muestra que los valores varían, de manera general, de 10 a 70 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro delos valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan. Los niveles estáticos someros, menores de 20 m, se registran en algunas regiones a lo largo del cauce delos ríos y centro de los valles, al sur-sureste de las poblaciones Milpillas de Allende, Hutzila y García de la Cadena; en tanto que los más profundos, de 50 a 70 m, se presentan hacia las zonas topográficamente más altas que rodean la porción oriental de los valles de dichas poblaciones y al noreste de García de la Cadena (figura 4).

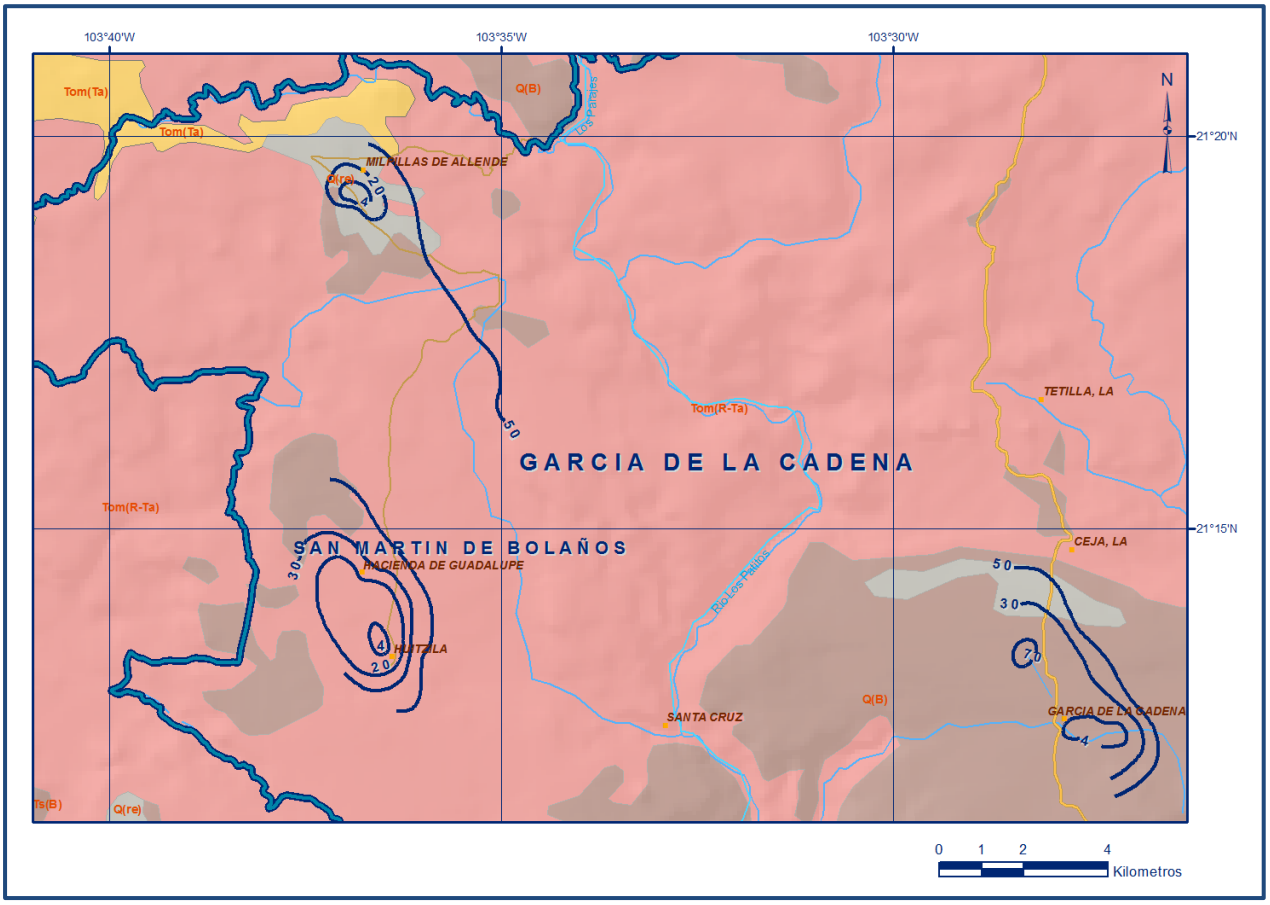


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2019 registró valores que varían de 1,940 a 1,620 msnm. Las menores elevaciones, de 1,620 a 1,680 msnm, se registran en el valle de Huitzila, y las mayores, de 1,890 a 1,940 msnm, se presentan en el valle de Milpillas de Allende. Las direcciones preferenciales del flujo subterráneo son este-oeste en los valles de García de la Cadena y Huitzila, y oeste-este en el valle de Milpillas de Allende; en todos ellos, con alimentaciones provenientes de los flancos norte y sur (figura 5).

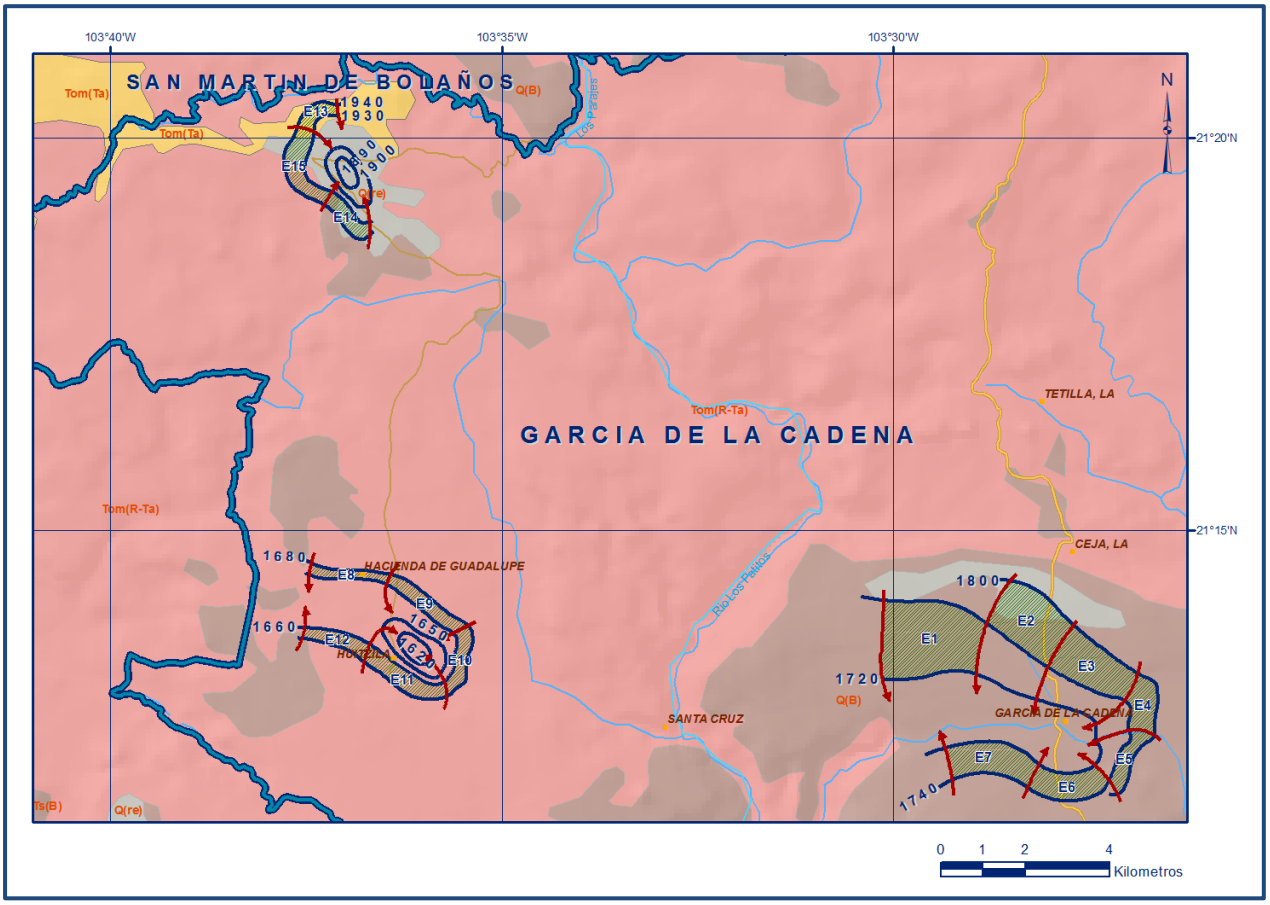


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2007-2019 registra valores pequeños de abatimiento que varían de 1 a 2 m en los valles de García de la Cadena y Huitzila, que representan 0.08 a 0.16 m anuales; y de 0.5 m en el valle de Milpillas de Allende, es decir, 0.04 m anuales. En la mayor parte de las zonas de explotación de los valles mencionados, no se registran variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea, por lo que se puede afirmar que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo (figura 6).

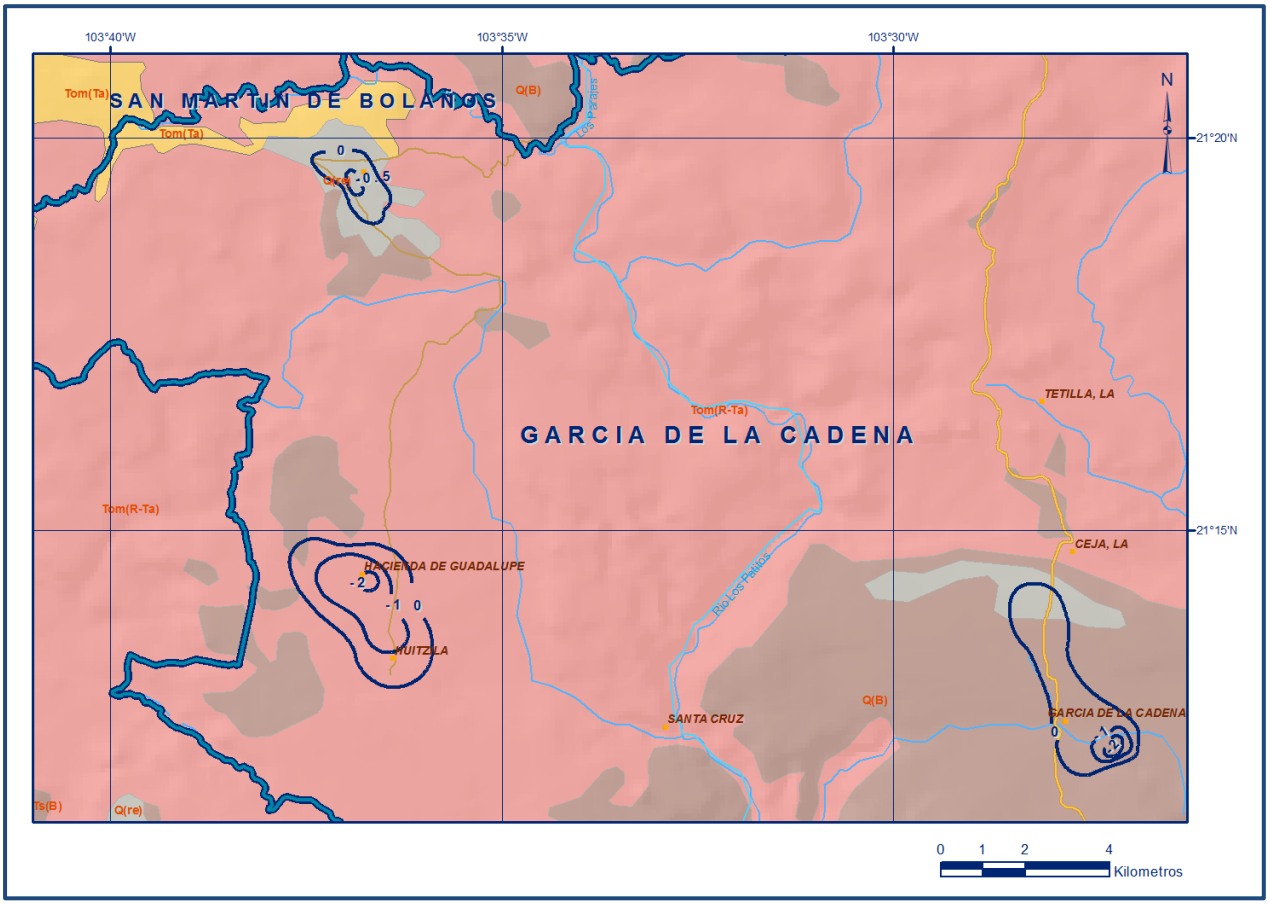


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2007-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizado en 2007, se tomaron 17 muestras de agua subterránea, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, así como iones principales.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de STD variaron de 135 a 518 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad

eléctrica son inferiores a 2000 µS/cm y presentan valores extremos de 191 a 693 µS/cm. Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran en las zonas topográficamente más altas de las porciones centro y poniente del acuífero, regiones de Trinidad García de la Cadena y Huitzila; y se incrementan hacia zonas topográficamente bajas de la región de Mezquital del Oro, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo.

Las temperaturas registradas variaron de 16.2 a 25.8 °C, en tanto que el pH medido fluctuó entre 6.19 y 8.23; en cuatro pozos ubicados en la porción poniente del acuífero se reportaron valores por debajo del límite mínimo permisible que establece la norma mencionada. De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que las dos familias del agua que predominan son la bicarbonatada-sódica y bicarbonatada-magnésica, que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia que han circulado a través de rocas volcánicas; la primera principalmente en rocas de composición basáltica y andesítica, y la segunda en rocas ácidas como Ignimbritas, tobas y riolitas, que constituyen las principales zonas de recarga ubicadas en las sierras que limitan el acuífero.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), predominan 2 tipos de agua: 9 muestras de agua se clasifican como C_1S_1, que representa agua de baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable; y las restantes 8 muestras de agua se clasifican como C_2S_1, que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable; ambas se consideran aptas para el uso agrícola, sin restricción alguna en el tipo de cultivos y suelos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2007 y complementada con datos actuales del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA, 2019), se tienen registrados un total de 316aprovechamientosde aguas subterráneas, todos ellos activos; de estos 180son pozos, 32 norias y 104 manantiales. Del total de obras, 54 se destinan al uso agrícola, 113 para uso público-urbano, 11 para uso pecuario, 5para la industria, 1 para uso doméstico y 28 más tienen uso múltiple; se incluye en el censo los 104 manantiales identificados, de los cuales 93 son para uso público-urbano y los 11 restantes para usos múltiples.

El volumen de extracción calculado es de **4.6 hm³ anuales**, de los cuales 3.1 hm^3 (67.4 %) se destinan al uso agrícola, 0.4 hm^3 (8.7%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 0.1 hm^3 (2.2 %) para uso pecuario, 0.1 hm^3 (2.2 %) para uso industrial y 0.9 hm^3 (19.5%) son de uso múltiple.

Adicionalmente, a través de los **104 manantiales** identificados se descarga un caudal conjunto estimado de 12.7 lps, que equivalen a **0.4 hm³ anuales**, la mayor parte destinada al uso público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2007-2019, en una superficie de **47.8 km²**, que corresponde a la superficie del valle donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

Entradas (E) – Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido

a que el volumen de extracción es pequeño, se considera para fines del balance de agua subterránea que no existe recarga incidental.

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 (ΔVS), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

$$\mathbf{Rv + Eh - B - Dm - ETR - Dfb = \pm \Delta V(S)} \qquad \mathbf{(1)}$$

Donde:

Rv = Recarga vertical
Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal
B = Bombeo
Dm = Descarga de manantiales
ETR = Evapotranspiración
Dfb = Descarga por flujo base de ríos
ΔV(S)= Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

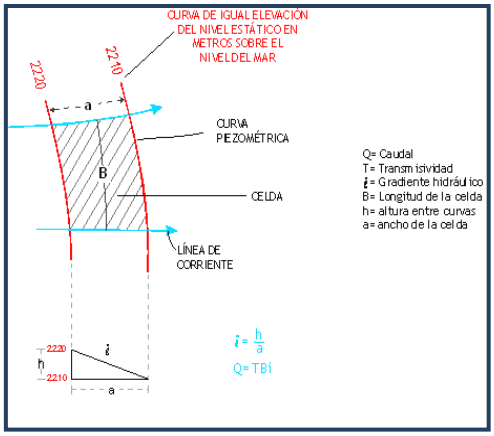
$$\mathbf{Rv = B + Dm + ETR + Dfb \pm \Delta V(S) - Eh} \qquad \mathbf{(2)}$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2016 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$



Donde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

i = Gradiente hidráulico;

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **16.3 hm³ anuales.**

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

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	2200	1740	20	0.0115	0.0005	0.0126	0.4
E2	1745	1260	60	0.0476	0.0003	0.0249	0.8
E3	1895	970	60	0.0619	0.0005	0.0586	1.8
E4	1080	550	60	0.1091	0.0007	0.0825	2.6
E5	1490	350	60	0.1714	0.0005	0.1277	4.0
E6	1660	650	20	0.0308	0.0005	0.0255	0.8
E7	1960	750	20	0.0267	0.0005	0.0261	0.8
E8	1760	215	20	0.0930	0.0002	0.0327	1.0
E9	1970	330	20	0.0606	0.0002	0.0239	0.8
E10	1455	270	20	0.0741	0.0002	0.0216	0.7
E11	2050	440	20	0.0455	0.0003	0.0280	0.9
E12	1430	350	20	0.0571	0.0003	0.0245	0.8
E13	960	345	10	0.0290	0.0002	0.0056	0.2
E14	1280	350	10	0.0286	0.0002	0.0073	0.2
E15	2040	425	10	0.0235	0.0003	0.0144	0.5
						TOTAL	**16.3**

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en el estudio previo del año 2007 y de otras pruebas llevadas a cabo en acuíferos vecinos que tienen la misma constitución y origen geológico, adaptados al espesor saturado de las celdas de flujo.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural a través de manantiales (Dm) y por flujo base de ríos (Dfb).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **4.6 hm³ anuales**.

7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 104 pequeños manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 12.7 lps, que representan un volumen anual de **0.4 hm³.**

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas, Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real.

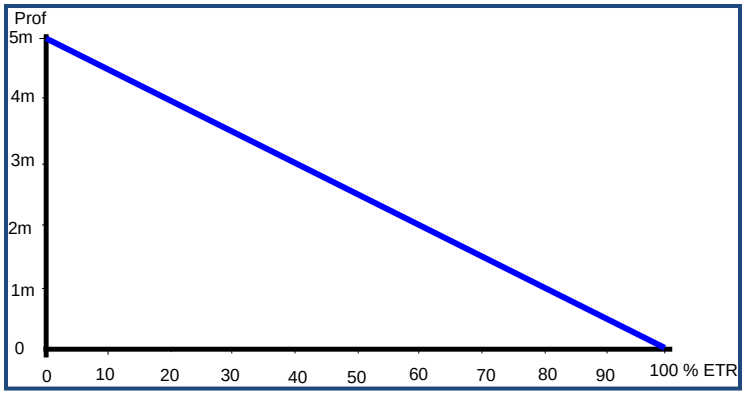
Existe una zona del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 5 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 19.0 °C y precipitación = 759.5 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de **650.9 mm.**

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	19		
P(mm) =	759.5	P^2 =	576840.25
L =	1117.95	L^2 =	1249812.2
ETR (mm)=	650.9		

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



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 3. El volumen de evapotranspiración **ETR = 0.2 hm^3 anuales.**

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración real

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km^2)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm^3/año)
4	4	1.2	0.6509	0.2	0.2
	TOTAL	**1.2**		**TOTAL**	**0.2**

7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb)

De acuerdo con los registros promedio de aforos para el periodo 2007-2019 de las estaciones "Cuixtla" y "Boquilla", ubicadas sobre los ríos Cuixtla y Mezquital, durante el periodo de estiaje tienen un caudal base de 365 y 171 lps, respectivamente, que representan un volumen medio 11.5 y 5.4 hm^3 anuales. Por lo tanto, el volumen conjunto del flujo base es **16.9 hm^3 anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2007-2019 (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 mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS = Cambio de almacenamiento en el período analizado
S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2)
h = Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El cambio en el volumen de agua almacenado para el intervalo 2007–2019 fue de -0.5 hm^3, es decir, -0.04 m^3 anuales, que para fines del balance es despreciable (tabla 4).

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2007-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
-0.5	-0.5	0.1	0.05	0.0
-2.0	-2.0	0.2	0.05	0.0
-1 a -2	-1.5	3.2	0.05	-0.2
0 a -1	-0.5	12.3	0.05	-0.3
0 a -0.5	-0.25	1.6	0.05	0.0
	TOTAL	**0.3**	**TOTAL**	**-0.5**
	Promedio anual			**0.0**

Solución de la ecuación de balance

De esta manera el único parámetro, de los que intervienen en la ecuación de balance que falta por determinar es la infiltración por lluvia (Rv), por lo que, despejando este término en la ecuación de balance, se tiene:

$$\mathbf{Rv = B + Dm + ETR + Dfb \pm \Delta V(S) - Eh}$$
$$\mathbf{Rv = 4.6 + 0.4 + 0.2 + 16.9 + 0.0 - 16.3}$$
$$\mathbf{Rv = 5.8}$$

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

$$\mathbf{R = Rv + Eh}$$
$$\mathbf{R = 5.8 + 16.3}$$
$$\mathbf{R = 22.1\ hm^3\ anuales}$$

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:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego. Para este caso su valor es **22.1 hm³ anuales** de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso de este acuífero, la descarga natural comprometida es **17.3 hm^3 anuales**, de los cuales 16.9 hm^3 corresponden a las descargas por flujo base de los ríos Cuixtla y Mezquital, y 0.4 hm^3 a la descarga a través de manantiales. Por lo tanto, **DNC = 17.3 hm^3 anuales.**

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 **7’975,154 m^3 anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos del 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 aguas subterráneas (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.

DMA = R – DNC – VEAS

DMA = 22.1 – 17.3 – 7.975154

DMA = – 3.175154 hm^3 anuales

El resultado indica que no existe un volumen anual disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su déficit es de **3’175,154 m^3.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2007. Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico y de Calidad del Agua en los Acuíferos Villa García, El Salvador, Guadalupe Garzarón, Camacho y El Cardito, Estado de Zacatecas y Evaluación Geohidrológica de los Acuíferos García de la Cadena, Pino Suárez y Corrales, Zac. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C.

Comisión Nacional del Agua. 2008. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero García de la Cadena (3207), estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2019. Información Piezométrica e Hidrométrica del acuífero García de la Cadena, Zacatecas.

Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera Aguascalientes F13.9. Escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2016. Carta Geológico-Minera García de la Cadena F13-D45, Escala 1:50,000.