



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL
DE AGUA EN EL ACUÍFERO TLALTENANGO-TEPECHITLÁN
(3206), ESTADO DE ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización del acuífero.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural.....	14
4.3 Geología del subsuelo.....	16
5. HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1 Tipo de acuífero.....	17
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría.....	18
5.4 Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	21
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	22
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
7.1 Entradas.....	23
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	24
7.2 Salidas.....	25
7.2.1 Bombeo (B).....	25
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	25
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	26
7.2.4 Descarga de manantiales (Dm).....	27
7.2.5. Descarga por flujo base de ríos (Dfb).....	27
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	28
8. DISPONIBILIDAD.....	29
8.1 Recarga total media anual (R).....	29
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
9. BIBLIOGRAFÍA.....	31

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 Tlaltenango-Tepechitlán, definido con la clave 3206 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción sur del estado de Zacatecas, en el límite con el estado de Jalisco, entre los paralelos 21°21'12" y 22°05'29" de latitud norte y entre los meridianos 102°59'42" y 103°42'03" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,452 km².

Limita al noreste con los acuíferos Villanueva y Jalpa-Juchipila; al este con Jalpa-Juchipila, al sur con García de la Cadena; todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; al suroeste y oeste con San Martín de Bolaños, y al noroeste con los

acuíferos Villa Guerrero y Colotlán, que pertenecen al estado de Jalisco (figura 1). Geopolíticamente, el territorio que cubre el acuífero comprende totalmente los municipios Mómox, Atolinga y Benito Juárez; de manera parcial los municipios Tlaltenango de Sánchez Román, Plateado de Joaquín Amaro, Tepechitlán, Teúl de González de Ortega, así como una pequeña porción de Villanueva.

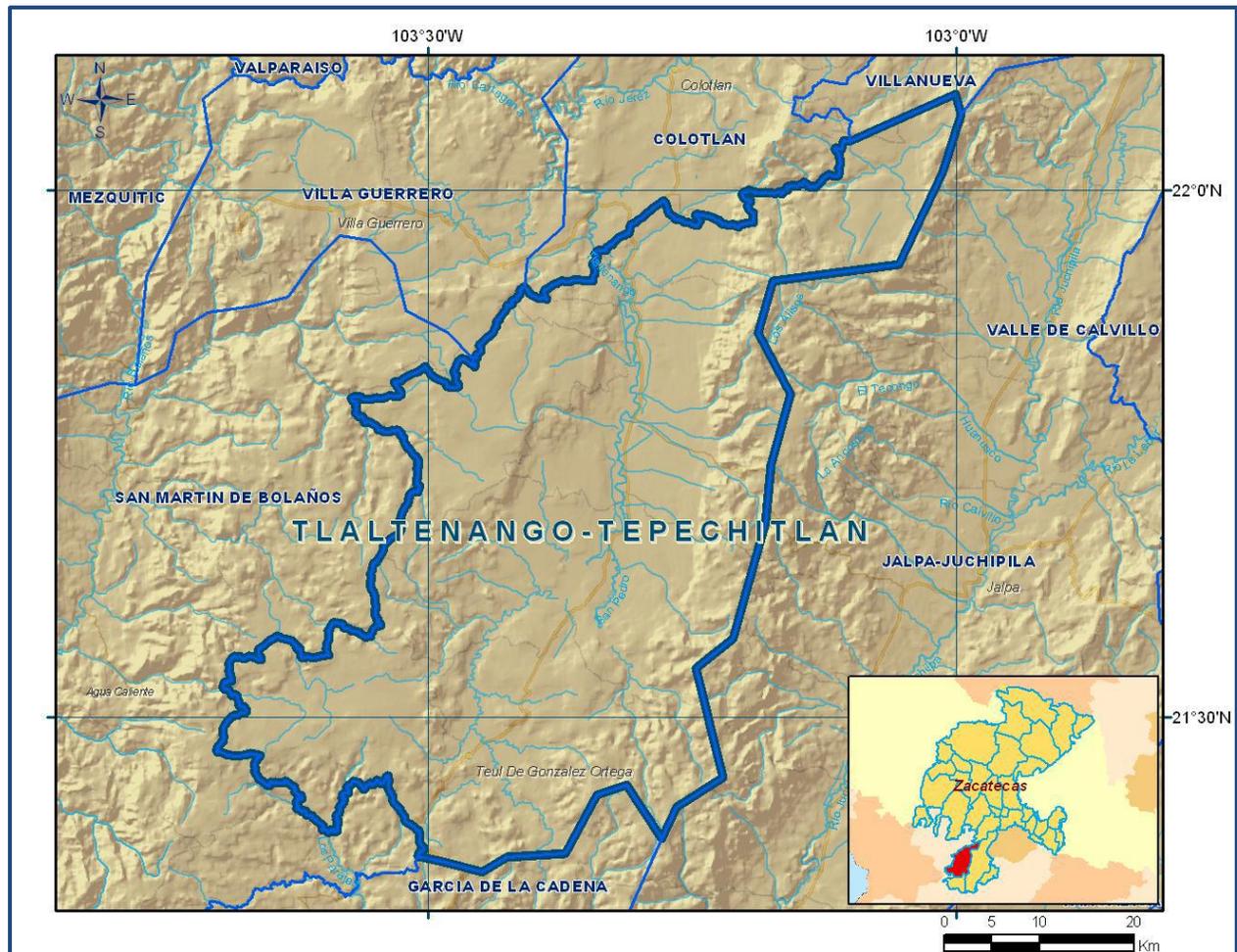


Figura 1. Localización del acuífero

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 3206 TLALTENANGO-TEPECHITLAN

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	25	30.9	21	22	3.4	
2	103	26	56.2	21	21	11.4	
3	103	29	10.9	21	21	46.1	
4	103	30	35.8	21	22	6.3	DEL 4 AL 5 POR EL LIMITE ESTATAL
5	103	27	26.1	21	50	18.7	DEL 5 AL 6 POR EL LIMITE ESTATAL
6	103	24	32.0	21	54	26.5	DEL 6 AL 7 POR EL LIMITE ESTATAL
7	103	6	0.2	22	2	46.1	
8	103	0	1.4	22	5	27.3	
9	102	59	41.8	22	4	19.1	
10	103	0	45.7	22	0	58.4	
11	103	3	13.4	21	55	44.7	
12	103	10	23.9	21	54	47.3	
13	103	11	14.2	21	51	51.3	
14	103	9	24.0	21	48	23.8	
15	103	10	30.1	21	44	23.3	
16	103	10	49.4	21	41	2.6	
17	103	12	38.7	21	34	28.6	
18	103	14	45.3	21	32	45.5	
19	103	13	15.4	21	26	32.8	
20	103	15	54.3	21	24	52.0	
21	103	16	42.2	21	23	4.5	
22	103	18	43.8	21	26	8.0	
23	103	20	24.7	21	25	34.3	
24	103	22	11.9	21	22	15.0	
1	103	25	30.9	21	22	3.4	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tlaltenango-Tepechitlán pertenece al Organismo de Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico, 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 3. El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. En la superficie del acuífero se localiza parte del Distrito de Riego 034 “Estado de Zacatecas”. No se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos de exploración y evaluación; a continuación, se citan los más importantes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LAS ZONAS DE TLALTENANGO-JUCHIPILA ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1980. El objetivo del estudio fue conocer el marco geológico, definir la calidad y distribución del agua subterránea y definir la condición geohidrológica del acuífero. Consistió en un reconocimiento de la zona, un inventario de aprovechamientos de agua subterránea, así como verificaciones geológicas e hidrológicas y recolección de muestras de agua para su análisis químico.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO JALPA-JUCHIPILA EN ZACATECAS. Realizado por Consultoría BETSCO S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2005. El objetivo general del estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea. Consistió en actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas, llevar a cabo el censo de captaciones de agua subterránea, obtener los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales que rigen el movimiento del agua en el subsuelo, actualizar el modelo hidrogeológico y la caracterización hidrogeoquímica, determinar el volumen de extracción de aguas subterráneas para los diferentes usos, así como cuantificar la magnitud de los componentes de la recarga natural, inducida y artificial, así como elaborar el balance hidrometeorológico de la subcuenca y de aguas subterráneas del acuífero. El estudio concluye que el acuífero no presentaba una condición de sobreexplotación.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS DE: NOCHISTLÁN Y TLALTENANGO-TEPECHTLÁN, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por GEOPSA, S.A. de C.V, para la Comisión Nacional del Agua, en 2008. El objetivo general del estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea. Entre sus actividades de campo más relevantes destacan el censo e hidrometría, nivelación de brocales y ejecución de pruebas de bombeo. Establece también una red de monitoreo

simplificada y confiable para la obtención de información piezométrica, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, que permiten conocer la condición actual y la evolución en el tiempo de los niveles del agua subterránea. El estudio concluye que el acuífero se encuentra en condición de subexplotación.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO TLALTENANGO-TEPECHITLÁN, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El estudio realizado en 2008 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, subprovincias Sierras y Valles Zacatecanos, y Mesetas y Cañadas del Sur.

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 1,500 y 1,800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias.

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 Grande de Santiago. La subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur está formada por mesetas altas interrumpidas de manera abrupta por profundos cañones y cañadas, que son el resultado del tectonismo y de la erosión fluvial sobre los diversos tipos de rocas volcánicas y vulcanoclásticas que conforman la sierra. Presenta superficies de meseta en promedio más altas que las del resto de la provincia; cañones paralelos y alternos a las superficies de meseta, interrumpidos en ocasiones por valles de laderas tendidas que, río abajo, vuelven a encañonarse; y está drenada por corrientes fluviales que corren hacia el sur y vierten sus aguas en el Río Grande de Santiago o desembocan en la Llanura Costera del Pacífico.

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 domina el clima semiseco (A)C(wo)semicálido subhúmedo del grupo C, que se caracteriza por presentar temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Hacia los extremos montañosos oriental y occidental, el clima es templado subhúmedo en sus variantes C(wo) y C(w1), que presentan temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más cálido menor de 22°C.

En todos los casos la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm; régimen de lluvias en verano con índice P/T menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. En el clima C(w1) el índice P/T varía entre 43.2 y 55

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 11 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: General Joaquín Amaro (El Plateado), Los Fresnos, Mómax, Tlaltenango de Sánchez Román, Excame, La Villita, Teúl de González Ortega, Florencia de Benito Juárez, Totatiche, San Juan de los Potreros y El Zapote. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1951-2010 y el más corto 2001-2017, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anuales de **765.8 mm, 17.8°C y 1828.8 mm**, respectivamente.

La precipitación media anual varía de 600 a 800 mm; la temporada de lluvias se presenta de junio a octubre. Las menores precipitaciones ocurren durante los meses de febrero, marzo y abril. El mes más caluroso es mayo con un promedio de 21 °C y el más frío es enero con un promedio de 10 °C. La región presenta heladas en un rango de 0 a 40 días por año.

3.3 Hidrografía

La zona en la que se ubica el acuífero se localiza en la porción norte de la Región Hidrológica No. 12 “Lerma-Santiago”, Subregión Hidrológica Bajo Santiago, cuenca del Río Bolaños, subcuenca Río Tlaltenango. La cuenca del río Bolaños está integrada por el sistema Chapala-Río Grande Santiago, en este último desembocan los ríos del sureste de Zacatecas. Los principales ríos que desembocan en el Pacífico a través de otros estados y que pertenecen a esta cuenca son: San Pedro, Juchipila, Jerez, Tlaltenango, San Andrés, Atengo y Valparaíso.

El río Bolaños se origina en el estado de Zacatecas, unos 60 km al oeste de la ciudad de Fresnillo, en el parteaguas de este río y el río Aguanaval. Tiene una longitud de 320 km, después de recorrer 85 km, entra en el estado de Jalisco para desembocar en el río Santiago, aproximadamente a unos 40 km al noroeste de la ciudad de Tequila. Sus últimos 32 km sirven de límite entre los estados de Jalisco y Nayarit. La infraestructura hidráulica está representada por la presa Miguel Alemán y varios bordos y represas diseminados que son utilizados para almacenar agua para abrevadero

3.4 Geomorfología

La región forma parte del sistema volcánico de la Sierra Madre Occidental y se localiza en una depresión tectónica, que se caracteriza por ser una región montañosa, que presenta una morfología de sierras con cimas aplanadas y barrancas y cañones de hasta 1,000 m de profundidad, que en conjunto presentan una orientación NE-SW. La región muestra relieve abrupto, representado por mesetas volcánicas de piroclastos, intensamente disectadas y drenadas por corrientes dispuestas en patrones de drenaje sub-paralelos, originados por el control estructural que ejercen las fallas y fracturas plio-cuaternarias; la apariencia general del relieve es interrumpida por valles de origen tectónico en los cuales se depositaron sedimentos lacustres y conglomeráticos, y en los que se reconoce un rejuvenecimiento evidenciado por la intensa erosión a que están sujetos dichos depósitos.

Las geoformas son el producto de la composición litológica de las rocas y de los procesos endógenos y exógenos que han ocurrido en la región a través del tiempo geológico. Se distinguen las siguientes geoformas: Sierras, Valles y Mesetas.

Las sierras están formadas por rocas sedimentarias, principalmente lutitas, areniscas y calizas de edad cretácica. Presentan formas alargadas y plegadas con dirección NE-SW, cuyo levantamiento se originó por el empuje de intrusivos graníticos; alcanzando una máxima elevación de 3,100 msnm en la zona. Las mesetas están conformadas por

rocas ígneas de tipo tobáceo y riolítico que fueron emitidas por erupciones volcánicas explosivas y derrames lávicos de tipo ácido. Presentan un basculamiento hacia el suroeste y son disectadas por la acción erosiva de los ríos y arroyos. Los valles representan cuencas tectónicas causadas por esfuerzos distensivos, que han sido rellenadas con depósitos de sedimentos clásticos. Están flanqueados por lomeríos bajos de conglomerados del Paleógeno-Neógeno y por rocas volcánicas. Son angostos y alargados, orientados en dirección NE-SW.

Las lutitas y areniscas desarrollan un drenaje de tipo dendrítico con enrejado denso, controlado por la disposición que guardan los estratos y las fracturas. Esta característica del drenaje indica baja permeabilidad de las rocas sedimentarias y baja posibilidad de conformar acuíferos. Considerando el grado de integración del drenaje y la extensión de sus valles, se establece que la zona se encuentra en la etapa de madurez temprana, de acuerdo al ciclo geomorfológico de Davis.

4. GEOLOGÍA

El área se ubica en la porción centro-sur de la Provincia Geológica Faja Ignimbrítica mexicana que se originó por el vulcanismo propiciado por la Subducción de la Placa Farallón debajo de la corteza Laurentiana; de allí la orientación adoptada similar a la traza de la subducción. Durante el Cenozoico el Occidente de México estuvo sujeto a la influencia de un arco magmático generado por la tectónica convergente que afectó 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 depositaron rocas de composición intermedia constituidas por andesitas y andesitas basálticas, que conforman la secuencia 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 una roca 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 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 de 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, definidos 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. Láscars (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).

Las rocas 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 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 (figura 2).

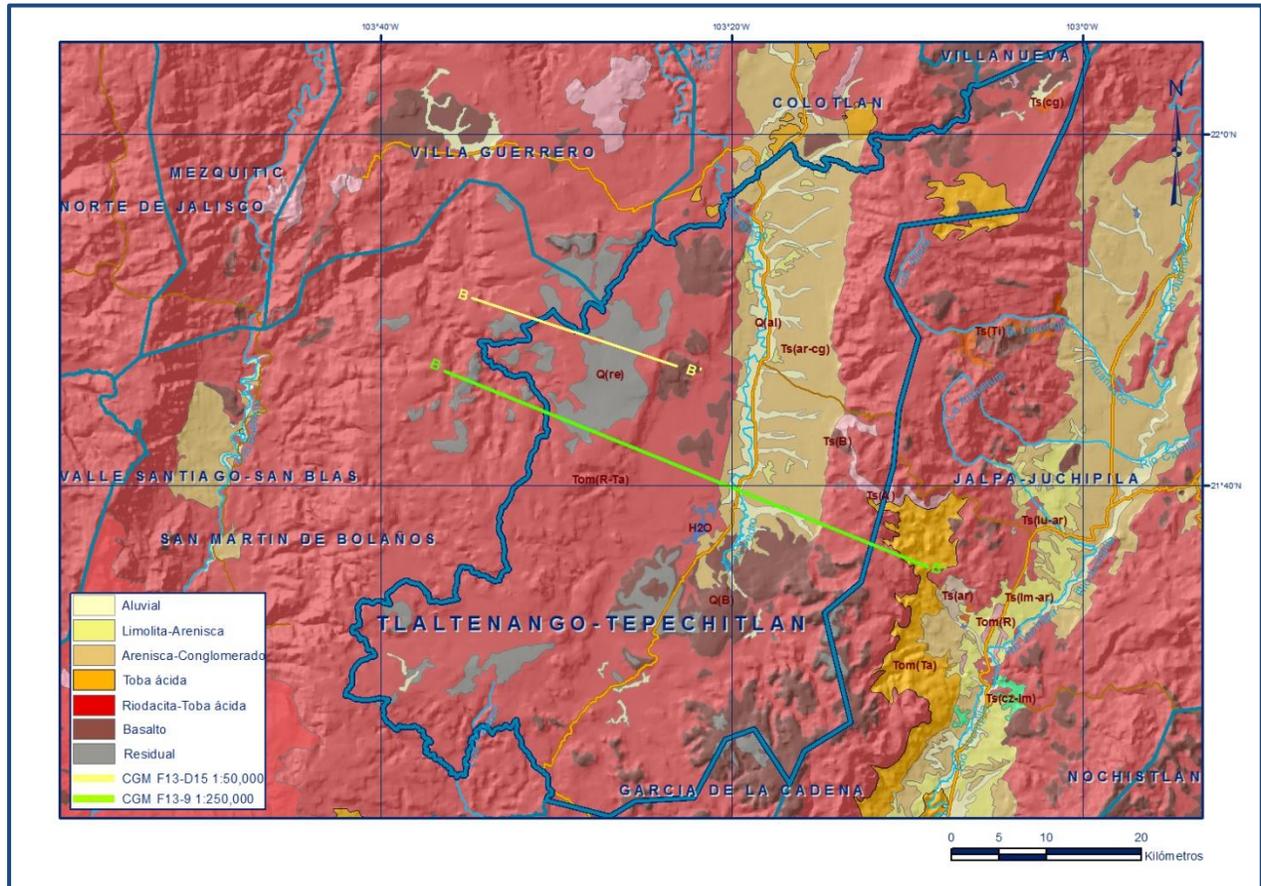


Figura 1. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica está integrada por una secuencia volcánica continental que forma parte de la Sierra Madre Occidental, particularmente del denominado Supergrupo Volcánico Superior, así como unidades sedimentarias, cuyas edades varían del Oligoceno al Reciente.

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 escasos sistemas de fracturas. 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 oriental. En algunas localidades los afloramientos de estas rocas están asociados volcanes y calderas; otros afloramientos se localizan en la porción suroeste de la misma sierra, asociados también a pilares tectónicos y aparatos volcánicos. 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 que presentan estructura compacta por solidificación de las partículas de lava que arrastró la explosión y se soldaron con los demás elementos; tienen composición principalmente dacítica, con algunos derrames de composición riolítica. 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 las sierras Morones al oeste y, Fría y Nochistlán al este. En conjunto estas rocas presentan un aspecto fisiográfico en forma de extensas mesas profundamente disectadas, afectadas por diversos sistemas de fracturas y fallas. En la sierra de Nochistlán, aflora principalmente la unidad de riolitas-ignimbritas, cubiertas por los derrames de basaltos del Mioceno, principalmente al sur de la sierra.

Derrames de basaltos

Son derrames emitidos durante el Mioceno Superior y corresponden a las primeras manifestaciones de la provincia geológica Eje Neovolcánico, cuyo borde nor-central representa el acuífero. En esta zona el vulcanismo se manifestó tanto a través de

aparatos volcánicos como por fracturas. Sus afloramientos constituyen una secuencia de brechas color gris oscuro y rojizo, de estructura compacta y fracturada; ocurren principalmente al sur y centro del área en su colindancia con la provincia geológica mencionada, donde se encuentran varios aparatos volcánicos que derramaron grandes cantidades de lava que rellenaron depresiones, dando lugar a extensas mesas y estrechos cañones. A medida que se adentra en el área que cubre el acuífero sus afloramientos se hacen menos frecuentes y de menor superficie. Esta unidad basáltica es de origen fisural, emplazándose en las zonas de debilidad, controlada estructuralmente por las fallas profundas. Por su posición estratigráfica con las demás unidades expuestas, se le asignó una edad tentativa del Mioceno, correlacionable con la Serie Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental.

Conglomerado oligomíctico

Roca sedimentaria clástica continental, conformada por conglomerados con clastos de calizas, basaltos, riolitas, tobas riolíticas, Ignimbritas, vidrio y areniscas, que varían en tamaño desde arenas hasta gravas, embebidos en una matriz limo-arcillosa. Los clastos son depositados en forma de abanicos aluviales, de composición y espesor variables. Estratigráficamente se encuentra en discordancia con las rocas sedimentarias cretácicas y rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno; su grado de compactación varía de semicompacto a semisuelto y presenta condiciones geohidrológicas favorables para constituir acuíferos de potencial moderado.

El conglomerado cubre en discordancia a las calizas-lutitas del Cretácico Inferior y a las rocas ígneas extrusivas e intrusivas en la localidad Ojo de Agua, subyacen a los aluviones del Holoceno que se encuentran sólo en los cauces de los arroyos. Por su posición se consideran de edad Mioceno. Los conglomerados afloran entre las poblaciones de Tabasco y Jalpa, constituyendo pequeñas lomas de cimas aplanadas.

Conglomerado polimíctico

Roca sedimentaria clástica continental, depositada en forma de abanicos aluviales, de composición y espesor variables. Estratigráficamente, se encuentra en discordancia con las rocas sedimentarias cretácicas y rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno. Sus clastos muestran disposición caótica, subangulosos a subredondeados y representan fragmentos de calizas, basaltos, riolitas, tobas riolíticas, ignimbritas, vidrio y areniscas, que varían desde arenas hasta gravas, con diámetros que varían de 3 a 70 cm, embebidos en una matriz compuesta de limos, arcillas y en menor proporción arenas, mal consolidadas y clasificadas.

Tienen una orientación controlada por los esfuerzos tensionales que provocaron fallas normales y dieron origen a la formación de cuencas. El espesor en el poblado de San José de Félix es de 200 m, superficialmente presenta una costra de tipo calichosa. Esta unidad presenta una coloración que varía de gris a café amarillento, de estructura masiva; su grado de compactación varía de semicompacto a semisuelto, condiciones que le confieren buenas propiedades geohidrológicas para constituir acuíferos.

Afloran cubriendo en discordancia a las calizas-lutitas del Cretácico Inferior y las rocas ígneas extrusivas e intrusivas en la localidad Ojo de Agua, y subyacen a los aluviones del Holoceno, que se localizan solo en los cauces de los arroyos. De acuerdo a su posición estratigráfica se consideran del Mioceno. Estos conglomerados se pueden correlacionar las rocas de este tipo que afloran ampliamente en el sur del estado de Zacatecas.

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 representada 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 lechos de ríos y arroyos. Su espesor máximo es de 10 m. Entre sus componentes destacan los líticos de calizas, conglomerados, areniscas y rocas volcánicas. 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 desarrollan suelos arcillosos.

4.2 Geología estructural

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 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 entre 15 a 20 km de diámetro; existen además otros curvilineamientos paralelos que pueden deberse a calderas sepultadas, que muestran un 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).

La Sierra Madre Occidental (SMO) es el resultado de diferentes episodios magmáticos y tectónicos ocurridos durante el Cretácico Superior-Cenozoico, asociados a la subducción de la placa Farallón debajo de la placa de Norteamérica. Se ha evidenciado que la SMO ha sido afectada por una tectónica extensional durante diversos periodos de tiempo que posiblemente van desde finales del Eoceno y el Oligoceno. En el sector sur de la SMO, hacia el sur del estado de Zacatecas y norte de Jalisco se originaron una serie de grabens. En la región estos eventos distensivos dieron origen a los grabens de Bolaños, Tlaltenango y Villa Guerrero, posiblemente en el Mioceno, afectando a las rocas volcánicas preexistentes. Se identificaron estructuras correspondientes al régimen de deformación frágil, representada principalmente por fallamiento normal y en menor proporción con componente lateral.

Las estructuras medidas e interpretadas presentan rumbos NE, NWE, N-S y E-W. Al fallamiento de tipo normal dio origen al graben de Tlaltenango, del cual se manifiesta parte de su hombro occidental, controlado por las fallas Cartagena y Encinillas, y en el sector occidental conformó al graben de Villa Guerrero, con orientación general NNE-SSW. Las estructuras con rumbo NW se distribuyen en la mayor parte de la zona, una de las más representativas es Santa Cruz 1, de tipo normal, con traza de 5 km de longitud y afecta a rocas básicas del Oligoceno. Las estructuras de dirección E-W se concentran en los sectores noreste y sur, resalta falla La Candelaria, que tiene una longitud interpretada de 12.5 km y afecta a la riolitas-ignimbritas del Oligoceno-Mioceno. Las estructuras orientadas al NE son abundantes y se tienen en los sectores occidental y central-norte. Entre las más representativas destacan Totatiche, que tiene una traza interpretada de 28 km y afecta a varias unidades volcánicas del Oligoceno-Mioceno. Las fallas orientadas al N-S se presentan en los sectores oriental y occidental y delimitan en parte a los grabens de Tlaltenango y Villa Guerrero de este sistema, por su longitud, mayor de 23 km, destaca la falla Cartagena que afecta a rocas del Oligoceno-Mioceno y Mioceno (Carta Geológico-Minera Villa Guerrero F13-D15. Escala 1:50,000. SGM, 2017).

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, originadas por eventos distensivos comunes a toda la región, debido a los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide.

Están representados varios eventos distensivos que se manifestaron en el Cenozoico, como consecuencia del movimiento tectónico que afectó a las rocas mesozoicas y cenozoicas, produciendo anticlinales y, sinclinales, orientados al NW-SE y N-S, afectados por fallas laterales y normales, fracturas y cabalgaduras con dirección al noreste, en las que varias fases de intrusión fueron controladas al N y S por dos zonas de fallas W-NW, que se sobreponen y que representan las fallas del basamento anterior a la Orogenia Laramide, reactivadas a partir del Eoceno. Los eventos geológicos más importantes en la región, presentes en la Sierra Madre Occidental, son vulcanismo y fallamiento.

4.3 Geología del subsuelo

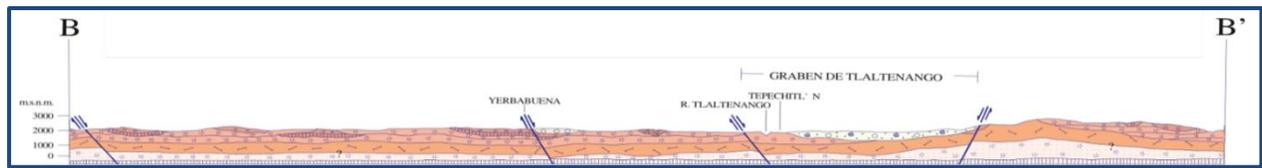
Con base en los resultados de la geología del subsuelo: sondeos geofísicos realizados en estudios previos, descripción de cortes litológicos y la interpretación de la información hidrogeológica, es posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento; conformado por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente. El medio granular está constituido por materiales aluviales de granulometría variada y los conglomerados que constituyen los depósitos de talud. El medio fracturado está conformado por rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno (riolitas e ignimbritas), y a mayor profundidad por la secuencia de calizas y lutitas del Cretácico.

Existe interconexión hidráulica entre ambos medios, de tal manera que el espesor del acuífero puede alcanzar varias centenas de metros en el centro de los valles, dependiendo de la profundidad del fracturamiento, y disminuir gradualmente hacia los flancos de las sierras que los rodean.

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



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



Fuente: Carta Geológico-Minera F13-D15, "Villa Guerrero". Esc. 1:50,000 (SGM, 1998)

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, cuyo espesor puede alcanzar hasta 200 m en el centro del valle, 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, así como lutitas y calizas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Localmente, la presencia de calizas lacustres y horizontes arcillosos, le confieren al acuífero condiciones de **semiconfinamiento**.

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 2008, se ejecutaron 6 pruebas de bombeo. Adicionalmente, en el año 2005 se ejecutaron 6 pruebas más en el acuífero vecino Jalpa-Juchipila que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica; todas las pruebas fueron de corta duración, en etapas de abatimiento y recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se obtuvieron valores de transmisividad que varían entre **0.13** y **5.5 x**

$10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (11.2 a 475.2 m^2/d). Tomando en cuenta un espesor saturado promedio de 200 m, los valores de conductividad hidráulica varían entre **6.5×10^{-7} y $2.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (0.056 a 2.3 m/d).** Los valores de transmisividad y conductividad hidráulica son en general bajos, debido a la compactación y granulometría fina de las rocas que conforman el acuífero, como lo confirman los caudales bajos específicos de algunos pozos.

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 obtenida como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2008 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 2008-2017, que tiene mayor y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2017 muestra que los valores variaron, de manera general, de 3 a 140 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro del valle del río Tlaltenango hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan y hacia el sur. Los niveles estáticos someros, de 3 a 10 m, se presentan a lo largo del cauce del río, desde Mómax en su norte, hasta Tepechitlán en el sur; en tanto que los más profundos, de 100 a 140 m, se registraron hacia las zonas topográficamente más altas que rodean el valle, ubicadas en sus extremos sur y suroccidental. En la zona de Atolinga, el nivel del agua se localiza de 10 a 100 m de profundidad (figura 4).

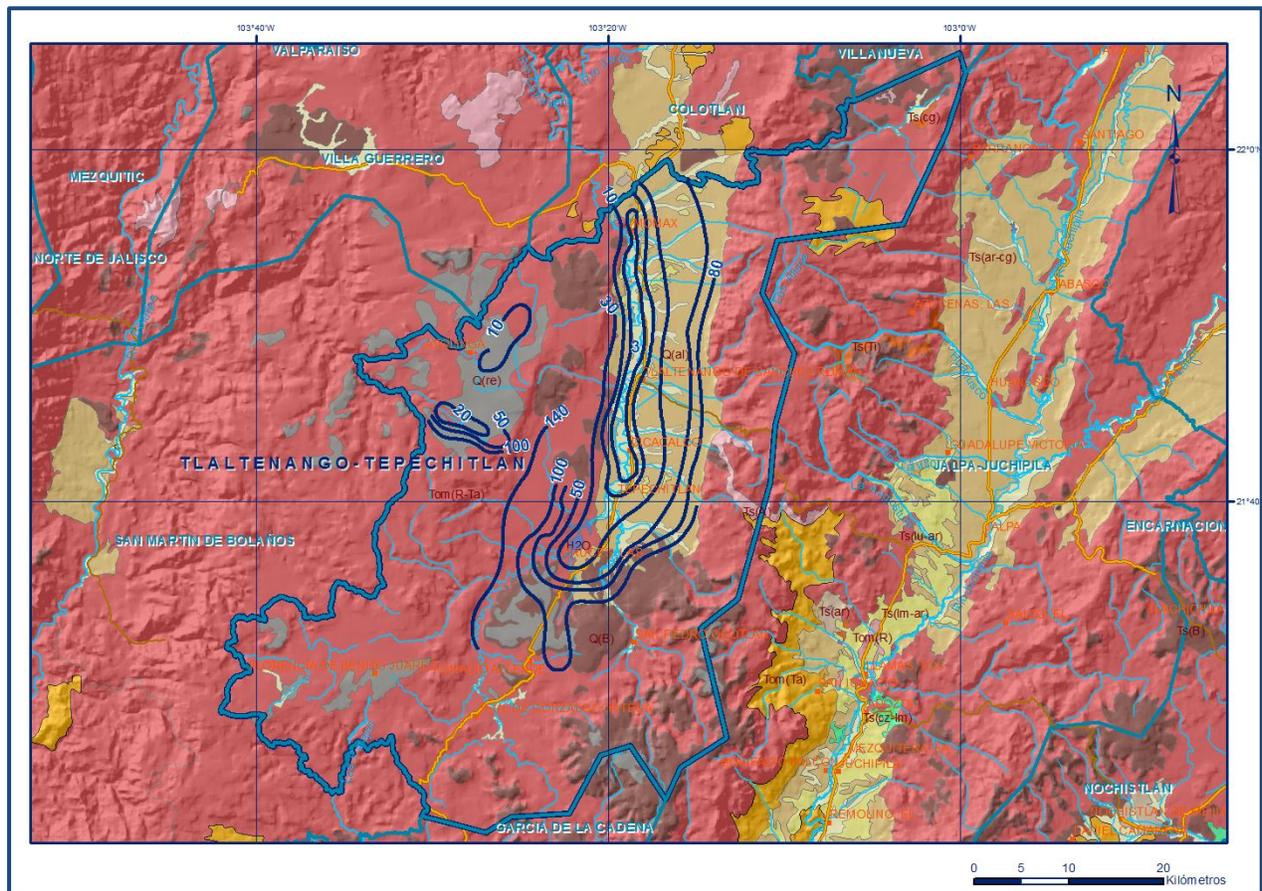


Figura 4. Profundidad del nivel estático en m (2017)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2017 registró valores que variaron de 1,645 a 2,200 msnm. Las menores elevaciones de 1,645 a 1,700 msnm se registran en la porción norte y central del acuífero, a lo largo del río Tlaltenango, entre los poblados Cicacalco y Mómax, y en límite con el acuífero Colotlán del estado de Jalisco. Las mayores elevaciones de 1,750 a 1,920 msnm se registran en las porciones altas ubicadas al sur y suroccidente del acuífero, hacia el poblado Ignacio Allende, desde donde descienden gradualmente por efecto topográfico, al igual que lo valores de profundidad, hacia el nor-noreste del acuífero, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo SW-NE, paralela a la dirección de escurrimiento del río Tlaltenango, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental. En la región de Atolinga, la elevación del nivel estático varía de 2,130 a 2,200 m y se observa una salida hacia el acuífero vecino Villa Guerrero del estado de Jalisco (figura 5).

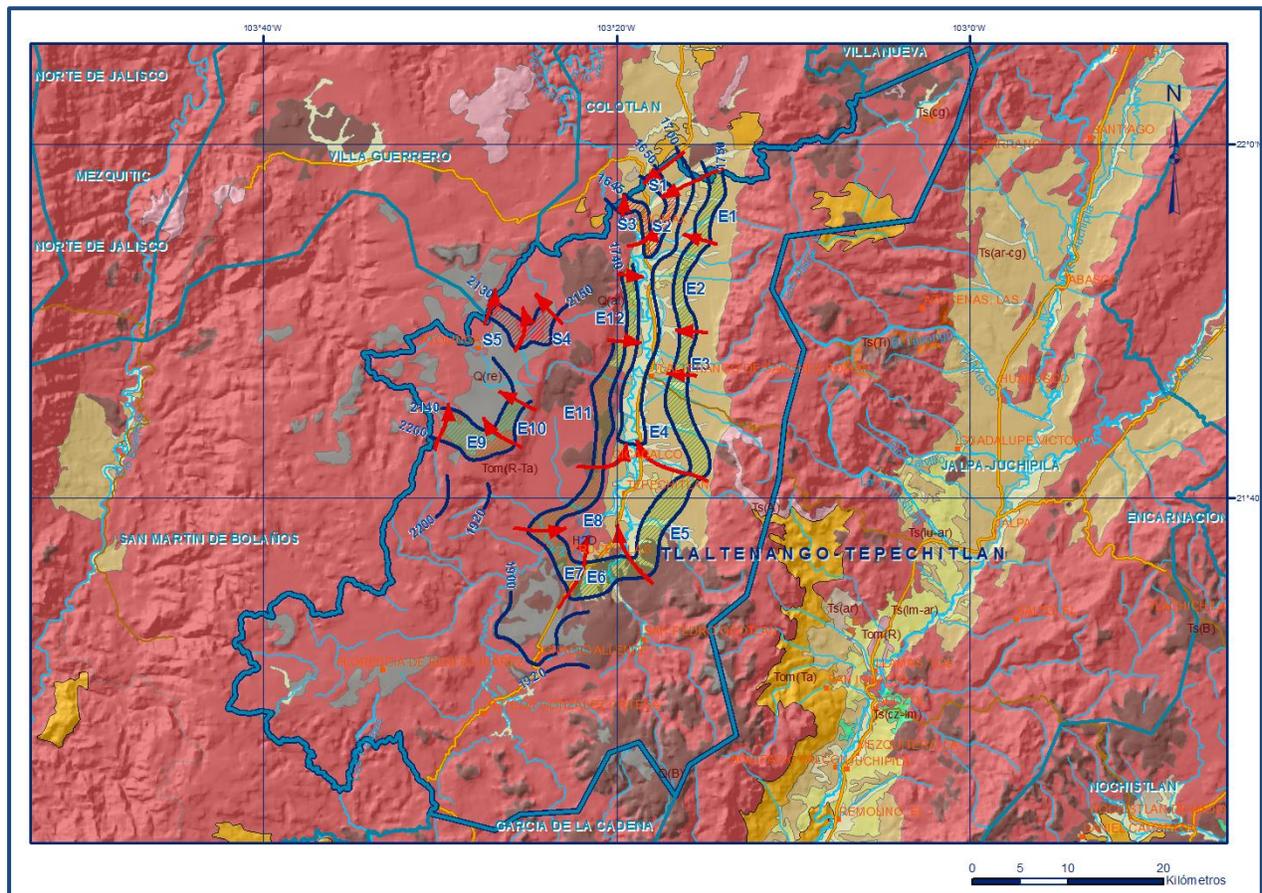


Figura 5. Elevación del nivel estático 2017

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2008-2017 registró valores muy locales de abatimiento y recuperación. Los primeros varían de 0.5 a 1.0, es decir 0.06 a 0.1 m anuales, y se presentan en la zona que rodea a la presa Miguel Alemán y en la región comprendida entre las localidades Cicacalco, Tepechitlán y Las Cruces. Las recuperaciones varían también de 0.5 a 1.0 m, con valores puntuales de 4 y 5 m, 0.5 m anuales, y se midieron en la región de Mómax y Atolinga. En la mayor parte del valle los niveles del agua subterránea no registraron variaciones en su posición (figura 6).

Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registran en la porción sur y centro del acuífero y se incrementan en dirección norte, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo.

La concentración de NO_3 fue mayor al límite máximo permisible (LMP) que establece la norma mexicana; y la concentración de flúor varió de 0.12 y 1.44 mg/l, muy próximo al LMP de 1.5 mg/l que establece dicha norma mexicana para el agua destinada al consumo humano.

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 predomina es la bicarbonatada-sódica, que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas que constituyen las principales zonas de recarga.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la totalidad de las muestras de agua se clasificaron como C_1S_1 , que representa agua de baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta 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 en el año 2008 y complementada con información 2017 del Registro Público de Derechos del Agua (REPD), se tienen registradas un total de **224 obras** que aprovechan el agua subterránea, 137 son pozos, 70 norias y 17 manantiales; de las cuales 217 están activas y 7 se consideran inactivas. De las obras activas, 68 son para uso público-urbano, 42 se destinan al uso agrícola, 22 son pecuario, 60 tienen un uso múltiple, 2 para uso doméstico, 3 son para uso de servicios y 3 más para uso industrial.

El volumen de extracción asciende a **10.6 hm^3** anuales, de los cuales 5.5 hm^3 (51.9 %) se destinan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 4.7 hm^3 (44.3 %) son para uso agrícola, 0.2 hm^3 (1.9 %) para uso de servicios, y el restante 0.2 hm^3 (1.9 %) se dedica al suministro de los usos doméstico, pecuario e industrial.

Adicionalmente, a través de los **17 manantiales** identificados se descarga un caudal conjunto estimado de 83 lps, que equivalen a **2.6 hm^3 anuales**, para usos múltiples.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2008-2017, en una superficie de **469 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 conservación de la masa es la siguiente:

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

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:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (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 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 los volúmenes de agua para uso público-urbano y agrícola son pequeños, se considera, para fines del balance, 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.

$$R_v + E_h - B - S_h - ETR - D_{fb} - D_m = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- R_v** = Recarga vertical
- E_h** = Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B** = Bombeo
- S_h** = Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR** = Evapotranspiración
- D_{fb}** = Descarga por flujo base de ríos
- D_m** = Descarga a través de manantiales
- ΔV(S)** = Cambio de almacenamiento

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

$$R_v = B + S_h + ETR + D_{fb} + D_m + \Delta V(S) - E_h \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

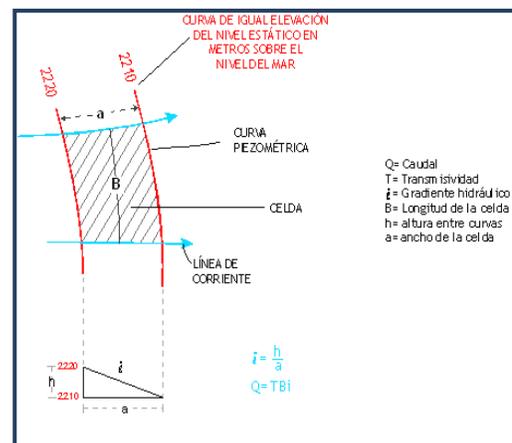
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas y poros de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona 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 2017 (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 **17.7 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2017)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	7500	1201	10	0.00833	0.0007	0.0437	1.4
E2	10320	1054	10	0.00948	0.0005	0.0489	1.5
E3	4604	1229	10	0.00814	0.0003	0.0112	0.4
E4	11143	1990	10	0.00502	0.0003	0.0168	0.5
E5	11685	2417	10	0.00414	0.0008	0.0387	1.2
E6	5968	2927	10	0.00342	0.0010	0.0204	0.6
E7	6239	1853	10	0.00540	0.0008	0.0269	0.8
E8	9156	1601	10	0.00625	0.0004	0.0229	0.7
E9	6294	3354	60	0.01789	0.0004	0.0450	1.4
E10	4116	1698	60	0.03533	0.0004	0.0582	1.8
E11	13613	1632	10	0.00613	0.0005	0.0417	1.3
E12	7036	1173	40	0.03411	0.0008	0.1920	6.1
TOTAL							17.7

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, es este acuífero y otros vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) por evapotranspiración (ETR) en la zona de niveles freáticos someros, por flujo base (Dfb) y a través de manantiales (Dm).

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 **10.6 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del

2017, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **4.5 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2017)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	2607	1281	5	0.00390	0.0080	0.0814	2.6
S2	6763	1022	5	0.00489	0.0005	0.0165	0.5
S3	4930	991	5	0.00504	0.0008	0.0199	0.6
S4	3842	2447	20	0.00817	0.0003	0.0094	0.3
S5	4320	1777	20	0.01126	0.0003	0.0146	0.5
TOTAL							4.5

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 Evapotranspiración Real. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de las tres estaciones mencionadas, 17.8°C y 765.8 mm, respectivamente, obteniéndose una lámina de evapotranspiración de 634.6 mm anuales, como se muestra a continuación:

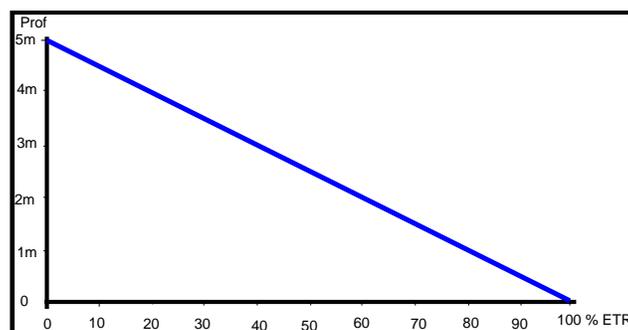
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	17.8		
P(mm) =	765.8	P ² =	586449.64
L =	1026.9876	L ² =	1054703.53
ETR (mm)	634.6		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR

exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 8.6 hm³ anuales**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2017)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
3	3	33.7	0.6346	0.4	8.6
	Total	33.7		Total	8.6

7.2.4 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 17 pequeños manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 83 lps, que representan un volumen anual de **2.6 hm³**.

7.2.5. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de aforos, proporcionada por la Dirección Local en Zacatecas, el Río Tlaltenango presentó un caudal estimado de 311 lps de flujo base, en el estiaje del periodo 1965-2007, que representan un volumen de **9.8 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 registrada durante el periodo 2008-2017 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.05, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

$\Delta V(S)$ = 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 volumen de agua recuperado en el intervalo 2008–2017, fue de 5.9 hm^3 , que representa un promedio anual de **0.7 hm^3** (tabla 5).

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2008-2017)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	S_y	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
5	5	4.4	0.05	1.1
4	4	3.6	0.05	0.7
1 a 4	2.5	53.9	0.05	6.7
1	1	4.0	0.05	0.2
0 a 1	0.5	27.9	0.05	0.7
-0.5 a -1.0	-0.75	86.1	0.05	-3.2
-1	-1	5.2	0.05	-0.3
	TOTAL	185.1	TOTAL	5.9
	Promedio anual			0.7

Solución de la ecuación de balance

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

$$R_v = B + Sh + ETR + D_{fb} + D_m + \Delta V(S) - E_h$$

$$R_v = 10.6 + 4.5 + 8.6 + 9.8 + 2.6 + 0.7 - 17.7$$

$$R_v = 19.1$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 19.1 + 17.7 \\ R &= 36.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego. Para este caso su valor es **36.8 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, su valor es de **16.9 hm³ anuales**, de los cuales 2.6 hm³

corresponden a la descarga de los manantiales, 9.8 hm³ al flujo base del río Tlaltenango y 4.5 hm³ a las salidas subterráneas que se producen hacia los acuíferos Villa Guerrero y Colotlán, del estado de Jalisco.

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 **13'549,477 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 36.8 - 16.9 - 13.549477 \\ \text{DMA} &= 6.350523 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **6'350,523 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2005. Actualización hidrogeológica del acuífero Jalpa-Juchipila, Zacatecas. Realizado por Consultoría BETSCO S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2008. Reactivación de redes de monitoreo piezométrico y calidad del agua de los acuíferos Nochistlán y Tlaltenango-Tepechitlán, en el estado de Zacatecas. Realizado por GEOPSA, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2010. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tlaltenango-Tepechitlán, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Piezometría histórica del acuífero Tlaltenango-Tepechitlán, Zacatecas.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1980. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en las zonas de Tlaltenango-Juchipila, estado de Zacatecas. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S. A.

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

Servicio Geológico Mexicano, 2017. Carta Geológico-Minera Villa Guerrero F13.D15. Escala 1:50,000.