CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO JALPA-JUCHIPILA (3209) ESTADO DE ZACATECAS

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1 GENERALIDADES 2
1.1 Antecedentes 2
1.2 Localización 2
1.3 Situación administrativa del acuífero 4
2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3 FISIOGRAFÍA 7
3.1 Provincia fisiográfica 7
3.2 Clima 7
3.3 Hidrografía 8
3.4 Geomorfología 9
4 GEOLOGÍA 10
4.1 Estratigrafía 12
4.2 Geología estructural 15
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 21
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 22
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 23
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 24
7.1 Entradas 24
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 25
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 25
7.1.3 Recarga incidental (Rr) 27
7.2 Salidas 27
7.2.1 Extracción por bombeo (B) 27
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 27
7.2.3 Evapotranspiración (ETR) 28
7.2.4 Descarga de manantiales (Dm) 29
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS) 30
8 DISPONIBILIDAD 31
8.1 Recarga total media anual (R) 31
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 31
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 32
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 32
9 BIBLIOGRAFÍA 33

1 GENERALIDADES

1.1 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.

1.2 Localización

El acuífero Jalpa-Juchipila, definido con la clave 3209 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo sur del estado de Zacatecas, en el límite con los estados de Aguascalientes y Jalisco, entre los paralelos 21°03' y 22° 22' de latitud norte y entre los meridianos 102°37' y 103° 19' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,069 km^2.

Limita al norte con los acuíferos Villanueva y Ojo Caliente, al oeste con el acuífero Tlaltenango-Tepechitlán; al suroeste con García de la Cadena; al sureste con el acuífero Nochistlán, todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas; al norte limita también

con el acuífero Valle de Aguascalientes y al noreste con el acuífero Valle de Calvillo, ambos pertenecientes al estado de Aguascalientes. Al oriente limita con el acuífero Encarnación y al sur con Los Puentes, del estado de Jalisco (figura 1).

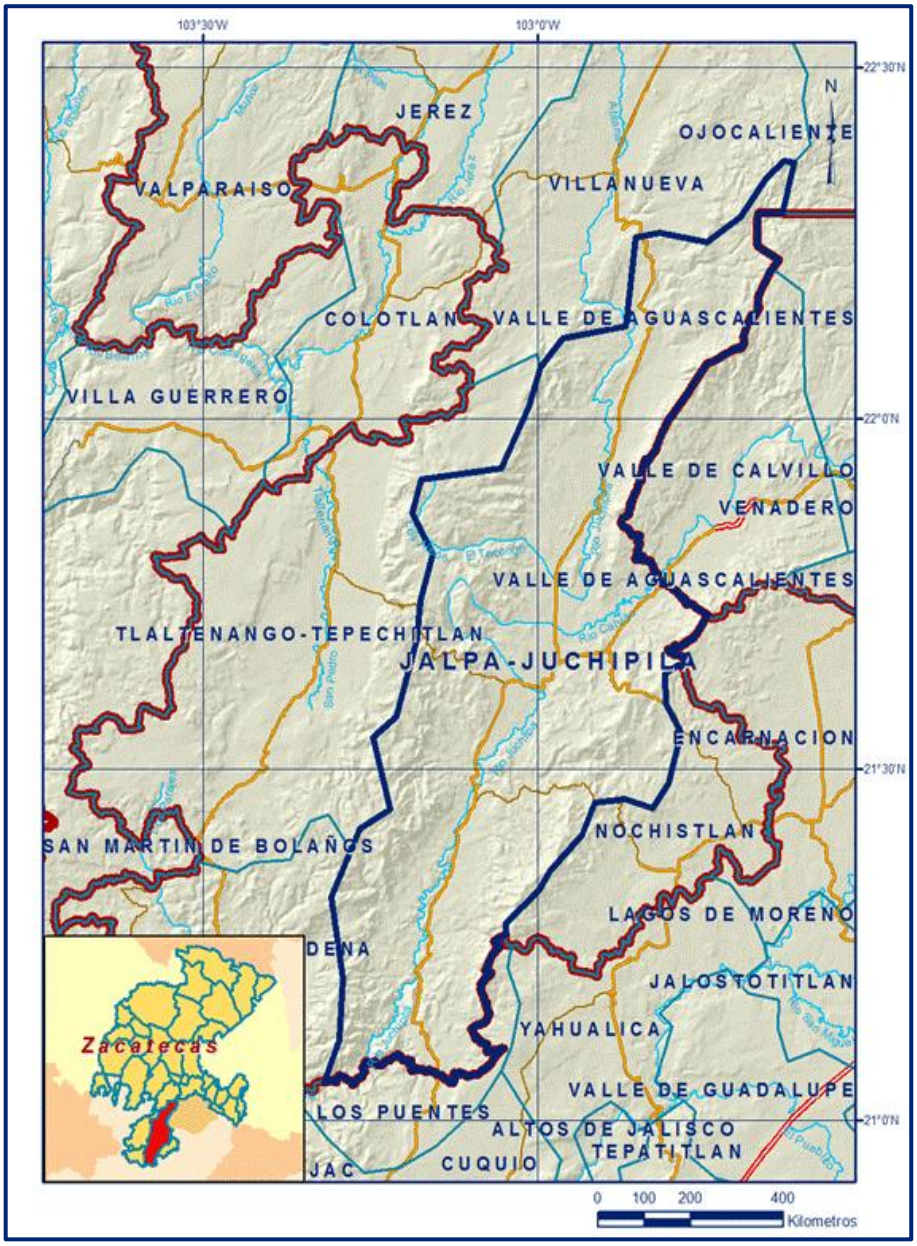


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el territorio que cubre el acuífero, comprende totalmente los municipios Apozol, Huanusco, Jalpa, Juchipila, Moyahua de Estrada y Tabasco; así como fracciones de los municipios de El Plateado de Joaquín Amaro, Tlaltenango de Sánchez Román, Tepechitlán, Teúl de González Ortega, Mezquital del Oro, Nochistlán de Mejía, Genaro Codina y Villanueva.

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 delimita al acuífero

ACUÍFERO 3209 JALPA-JUCHIPILA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	48	26.4	21	35	36.0	
2	102	47	5.5	21	33	8.4	
3	102	48	11.0	21	28	48.9	
4	102	49	41.8	21	26	37.4	
5	102	52	9.9	21	27	25.8	
6	102	54	50.2	21	27	9.2	
7	102	55	56.7	21	24	27.4	
8	102	58	53.6	21	21	13.8	
9	102	59	48.0	21	19	40.1	
10	103	2	52.5	21	16	47.8	
11	103	2	51.2	21	15	50.5	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	103	19	8.2	21	3	16.4	
13	103	17	47.1	21	6	51.7	
14	103	17	27.1	21	12	6.2	
15	103	18	29.6	21	19	3.6	
16	103	16	42.2	21	23	4.5	
17	103	15	54.3	21	24	52.0	
18	103	13	15.4	21	26	32.8	
19	103	14	45.3	21	32	45.5	
20	103	12	38.7	21	34	28.6	
21	103	10	49.4	21	41	2.6	
22	103	10	30.1	21	44	23.3	
23	103	9	24.0	21	48	23.8	
24	103	11	14.2	21	51	51.3	
25	103	10	23.9	21	54	47.3	
26	103	3	13.4	21	55	44.7	
27	103	0	45.7	22	0	58.4	
28	102	59	41.8	22	4	19.1	
29	102	57	43.0	22	6	50.9	
30	102	52	5.3	22	7	52.9	
31	102	51	9.3	22	15	28.2	
32	102	49	2.6	22	15	51.0	
33	102	44	47.7	22	15	3.8	
34	102	41	44.8	22	17	14.5	
35	102	39	26.5	22	20	35.2	
36	102	37	49.9	22	22	2.2	
37	102	36	58.6	22	21	53.0	
38	102	37	58.4	22	17	29.7	DEL 38 AL 39 POR EL LIMITE ESTATAL
39	102	39	8.9	22	12	31.9	DEL 39 AL 40 POR EL LIMITE ESTATAL
40	102	44	44.2	21	43	10.8	DEL 40 AL 41 POR EL LIMITE ESTATAL
41	102	46	55.5	21	38	52.3	
42	102	47	27.6	21	38	51.8	
43	102	48	31.1	21	38	9.4	
1	102	48	26.4	21	35	36.0	

1.3 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Jalpa-Juchipila pertenece al 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 de dos decretos de veda; el primero de ellos rige en casi la totalidad de su superficie y es el *"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.

El segundo decreto rige en una pequeña área de su extremo oriental y es el *"Decreto que declara de utilidad pública el establecimiento de la Unidad de Riego para el Desarrollo Rural "Media Luna", en terrenos ubicados en los Municipios de Calvillo, Ags. Huanusco y Jalpa, Zac."*, publicado en el DOF el 20 de mayo de 1976. Este decreto es tipo II, que solo permite extracciones para usos domésticos.

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 agrícola. 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 la empresa 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.

REACTIVACIÓN DE LA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE JALPA-JUCHIPILA, ZAC. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.,

para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2004. Sus objetivos fueron establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica del acuífero, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, conocer la evolución y la condición actual de los niveles del agua subterránea, así como su comportamiento inducido por causas naturales o antropogénicas, especialmente por el incremento de la extracción para satisfacer el desarrollo futuro de las actividades productivas. La red piezométrica del acuífero quedó definida por 24 pozos.

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.

La configuración de elevación del nivel estático permitió definir que las principales zonas de recarga se localizan en las sierras ubicadas al este y oeste del valle y que la dirección preferencial del flujo subterráneo es noreste-suroeste, paralela a la dirección de escurrimiento del río Juchipila. No se identificó la existencia de conos de abatimiento causados por la extracción intensiva. Se censaron un total de 400 aprovechamientos y se concluyó que el acuífero no presentaba una condición de sobreexplotación.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO 3209 JALPA-JUCHIPILA, ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por la Universidad Autónoma de Zacatecas para la Secretaría del Campo del Estado de Zacatecas (SECAMPO), en el año 2022. Su objetivo principal actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas para determinar el comportamiento de la evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para actualizar el balance de aguas

subterráneas. Entre sus actividades de campo más relevantes destacan el censo de captaciones, hidrometría, pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y toma de muestra de agua subterránea para su análisis fisicoquímico.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO JALPA-JUCHIPILA, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2022. El último estudio, la piezometría e hidrométrica 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, según 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 1,500 y 1,800 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 Grande de 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 domina el clima semiseco BS_1hw (w), que se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes

más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano, con lluvias invernales menor de 5 %.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 9estaciones climatológicas que se ubican dentro del área del acuífero: Presa Julián Adame, Juchipila, Jalpa, Huanusco, Presa El Chique, Tayahua, Moyahua de Estrada, y Mezquital del Oro, Apozol y Presa Moraleños. Con los registros obtenidos para diferentes periodos, el más grande 1947-2018 y el más corto 2000-2018, y utilizando el método de de polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **627.6 mm, 21.5 °C y 2,109 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 25 heladas por año y granizadas de 0 a 2 días anuales.

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 Alto Santiago, dentro de las cuencas conocidas como Presa El Chique, Río Juchipila 1 y Río Juchipila 2, que están delimitadas al oeste por el parteaguas que forma la Sierra de Morones; y al este por la Sierra Fría y Sierra de Nochistlán. Esta cuenca tiene forma alargada y orientada en dirección NE-SW; al norte se inicia a la altura de la Presa El Chique.

El río colector más importante de la zona es el río Juchipila, que se origina en la porción centro-sur del estado de Zacatecas, a una altitud de 2,600 msnm, y desemboca en el Río Santiago, en el estado de Jalisco, antes de su recorrido de norte a sur que atraviesa los municipios de Villanueva, Tabasco, Huanusco, Jalpa, Apozol, Juchipila, Moyahua y Mezquital del Oro. Su longitud estimada es de 250 km, recorre sus primeros 232 km con dirección sureste y sólo en los últimos 18 km cambia de rumbo hacia el oeste para confluir al Río Santiago, a una altitud de 800 msnm, por lo que su pendiente media es de 0.72%. Tiene un área de aportación de 8,552 km^2 y sus afluentes principales son los ríos Tabasco y Calvillo. A lo largo de su travesía por el acuífero es alimentado por corrientes intermitentes, manantiales y arroyos entre los que destacan los arroyos: San Nicolás, Clavellinas, El Rodeo, El Aguacate y El Teto, entre otros. Aguas abajo, en el

municipio de Villanueva, se incorporan al Río Juchipila, los arroyos Palomas, Zapoqui y el Uncidero, que drenan la vertiente NW de la Sierra Fría, que separa a Zacatecas del estado de Aguascalientes. En esta región se forma el Río Calvillo que drena las sierras Tlachichila y El Laurel, para finalmente desembocar en el río Juchipila. A partir de esta conjunción se forma el conocido Cañón del Juchipila. En esta región se amplía la cuenca del río y del acuífero hacia el oriente, aumentando también la influencia de la precipitación.

En la superficie que cubre el acuífero existen 14 presas y bordos de importancia para la región, que en su conjunto tienen una capacidad de almacenamiento de 224.8 hm^3. El uso principal del agua de las presas es para riego agrícola, en beneficio de 7,645 hectáreas, principalmente por sistema de gravedad a través de canales y en algunos sitios mediante bombeo. El Arroyo Malpaso y el Río Palomas son afluentes del Río Villanueva, el cual es controlado por las presas Tayahua (38 hm^3) y El Chique (139 hm^3). A la altura de la Ciudad de Jalpa, se incorpora el Río Calvillo, y de nuevo el Río Juchipila es retenido, esta vez por la presa Achoquen (10 hm^3). De ahí toma dirección norte-sur hasta las cercanías de la Ciudad de Juchipila, para dirigirse ligeramente al oeste donde se le incorpora el Arroyo Mezquital para finalmente desembocar en el Río Santiago, en el estado de Jalisco.

3.4 Geomorfología

La región forma parte del sistema volcánico de la Sierra Madre Occidental; se localiza en una depresión conocida como “Cañón de Juchipila”, que toma el nombre de la población que se localiza en su porción centro-sur, aproximadamente a 20 km al sur de la Ciudad de Zacatecas, al igual que la sierra donde se originan los primeros escurrimientos que forman el río del mismo nombre. Se caracteriza por ser una región montañosa, que presenta una morfología de sierras con cimas aplanadas y barrancas y cañones profundos de hasta 1,000 m, que en conjunto presentan una orientación NW-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.

En las porciones de mayor desarrollo la amplitud del cañón varía de 4 a 8 km, como sucede al sur de Tabasco, norte de Jalpa y entre las poblaciones de Apozol y Juchipila; a diferencia de ello, la zona más angosta, de unas cuantas decenas de metros, se observa en los últimos 20 km de su curso, donde presenta el rasgo fisiográfico típico de un cañón. Es precisamente en las porciones de mayor amplitud donde el Río Juchipila ha desarrollado pequeñas llanuras de inundación de hasta unos 50 a 100 m, a uno y otro lado de su cauce, por donde éste divaga. A las llanuras, le suceden lomeríos de cimas un tanto aplanadas que se elevan hasta unos 100 m arriba de ellas, que dan paso a frentes de pendiente alta (entre 20 y 25%) que culminan en mesetas que se elevan unos 500 a 700 m arriba del cauce del Río Juchipila. Las Mesetas alineadas constituyen la cima de la Sierra de Morones, en la margen derecha del Cañón, y la Sierra de Nochistlán en su margen izquierda.

4 GEOLOGÍA

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 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. 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).

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).

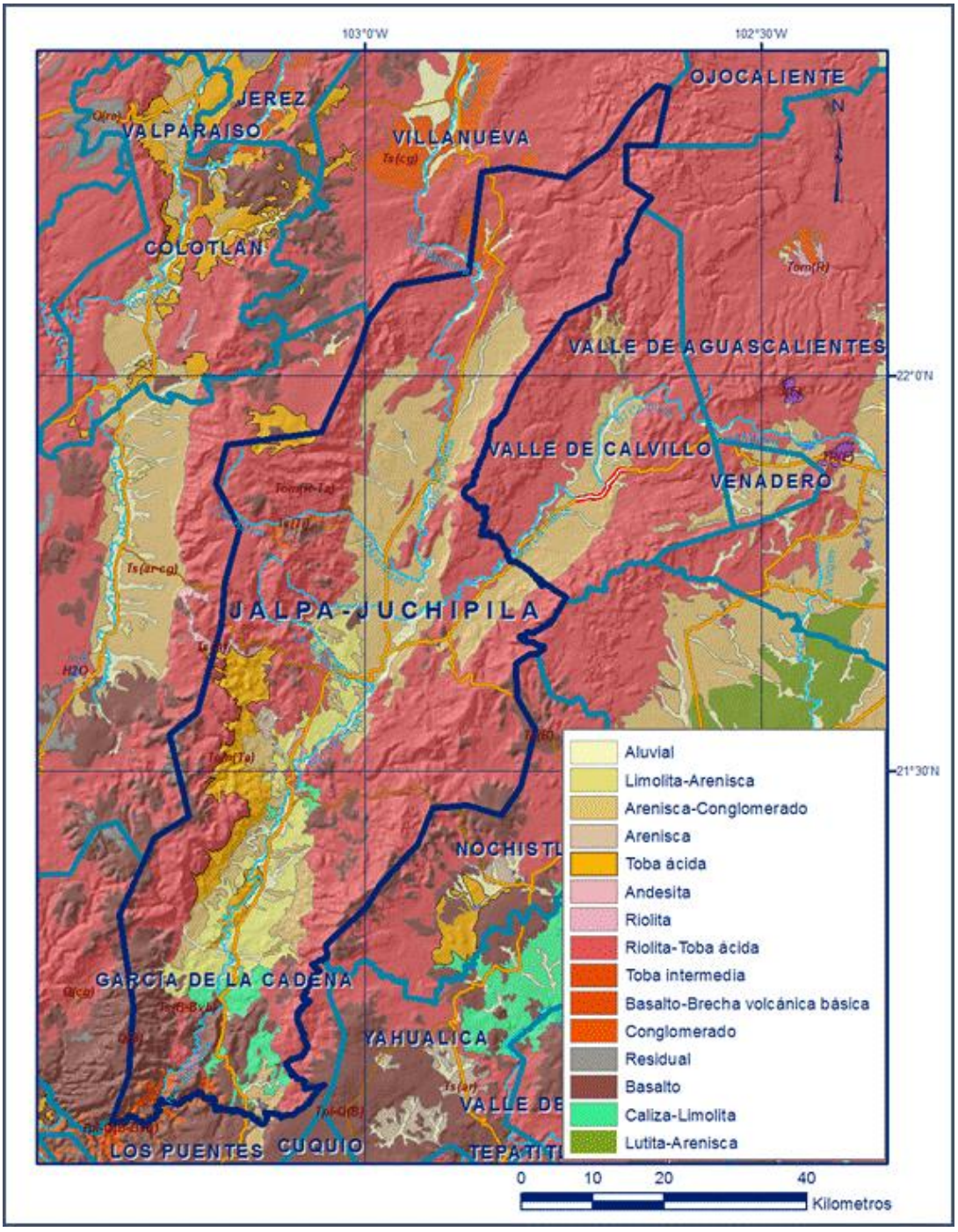


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica comprende rocas ígneas extrusivas e intrusivas, así como sedimentarias continentales y lacustres cuyo registro varía del Cenozoico al Cuaternario, 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 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 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 está asociados a un volcán y dos calderas; otros afloramientos se localizan en la porción suroeste de la misma sierra, asociados también a pilares tectónicos y aparatos volcánicos; como es el caso del graben en el que el Río Mezquital ha labrado su cauce.

Afloramientos de superficies menores a 1 km^2, se localizan al sur de Moyahua de Estrada y entre este poblado y Juchipila, en las estribaciones de la Sierra de Nochistlán, también al oriente del poblado de Apozol, donde es intrusionado por diques dioríticos. 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 la primera de ellas las rocas son principalmente de la unidad de tobas riolíticas, sobre las cuales yacen las otras unidades; afloran también en el interior de la depresión o valle tectónico, al norte de Tabasco y entre los poblados de Huiscolo y Huanusco, así como al sur oriente de Jalpa, donde el río se encajona en estas rocas, y en la base de la porción occidental de la Sierra Fría, que limita al Graben de Calvillo por su ladera noroeste. En la Sierra Fría aflora principalmente la unidad de riolitas e ignimbritas, en su porción occidental, así como en la Sierra de Nochistlán. Los afloramientos de estas rocas están cubiertas por los derrames de basaltos del Mioceno, principalmente al sur de las sierras mencionadas. Los afloramientos de la unidad de derrames riolíticos e ignimbritas, se restringen a la porción norte de la Sierra de Morones.

Derrames de basaltos

Son 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 constituyen una secuencia de brechas de color gris oscuro y rojizo, de estructura compacta y fracturada. Sus afloramientos se observan en la porción sur del área, en el límite con la provincia geológica mencionada, donde existen varios aparatos volcánicos que derramaron grandes cantidades de lava, rellenando depresiones como la del Cañón de Juchipila y formando extensas mesas que después fueron disectadas por las corrientes superficiales, que originaron profundos y estrechos cañones. En dirección a la porción central del acuífero, los afloramientos de estas rocas se hacen menos frecuentes y de menor superficie, prácticamente a la altura del poblado de Juchipila es donde se localiza el último afloramiento de varios kilómetros de extensión de esta unidad y otro, de aproximadamente 3 km² se localiza un poco más al norte, en la porción central de la Sierra Morones, al W NW del poblado Huanusco.

Calizas y lutitas lacustres

Las rocas lacustres están constituidas por calizas de color de grano muy fino (mudstone) que presentan color gris claro a medio, dispuestas en estratos delgados, con intercalaciones esporádicas de lutitas de color gris verdoso y amarillento. Están afectadas por algunos sistemas de fracturas y un echado persistente al noroeste, con inclinación máxima de 8°. Son cubiertas parcialmente por areniscas y un conglomerado arcilloso oligomíctico, de tonalidades rojizas y medianamente

consolidado. Sus afloramientos se distribuyen por todo el cañón de Juchipila, mostrando espesores máximos de 200 m y dando lugar a lomeríos de cimas aplanadas y pendientes menores de 2%. La acumulación de los sedimentos que conforman estas rocas ocurrió cuando la emisión de basaltos cerró el extremo sur del Cañón Juchipila.

Conglomerado Oligomíctico

Los conglomerados afloran principalmente en la margen derecha del cañón, desde Tabasco hasta Jalpa, conformando pequeñas lomas de cimas aplanadas; ampliando sus exposiciones al sur de este último poblado, donde ocupan casi todo el ancho del cañón y disminuyendo hasta casi desaparecer hacia el sur, donde sólo existen pequeños afloramientos de reducidas extensiones. El hecho de que el conglomerado aflore en casi toda la porción ubicada al oeste, así como al sur y sur-oeste de Jalpa, implica que en esta zona los depósitos lacustres alcanzan su mayor espesor, debido a que no se han erosionado aún. Esta porción también es afectada por el fallamiento NE-SW que formó el Graben de Calvillo, por lo que también debe ser la zona de mayor permeabilidad.

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 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. 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

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 del cañón de Jalpa-Juchipila que se extiende por cientos de km, y 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 Calvillo y Tabasco, Zacatecas, 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 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).

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 polimícticos que rellenan los valles, cuyo espesor varía desde algunos metros hacia los flancos de las sierras, hasta 200 m en la porción central del valle. 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, que en conjunto tiene un espesor de hasta 400 m y 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.

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 una fosa de origen tectónico, ocasionado 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. 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 delos estudios realizados en el 2005 y 2022, se ejecutaron 21 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 **2.7×10^{-3} m²/s** y **7.3×10^{-6} m²/s (233** a **0.63 m²/d)**. Tomando en cuenta un espesor saturado promedio de 100 m, los valores de conductividad hidráulica varían entre **2.7×10^{-5}** y **7.3×10^{-8} m/s** (**2.3** a **0.006 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 específicos de algunos pozos, los cuales varían de 0.03 a 0.83 lps/m y máximo de 3.0 lps/m.

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 **0.03**.

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 delos estudios realizado en 2005 y 2022 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 2005-2022, 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 2022 muestra que los valores variaron, de manera general, de 2 a 130 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro del valle del río Juchipila hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan y hacia el norte. Los niveles estáticos someros, de 2 a 20 m, se presentan en algunas regiones a lo largo del cauce del río Juchipila y algunos arroyos tributarios, desde su extremo norte, al sur de la presa El Chique, hasta el sur de la región, entre Juchipilay Moyahua; en tanto que los más profundos, de 70 a 130 m, se registraron hacia las zonas topográficamente más altas que rodean el valle, desde la región ubicada más al norte y en el flanco occidental de Tayahua hasta Jalpa; y en la porción sur en las estribaciones de las sierras que delimitan el valle de Juchipila (figura 3).

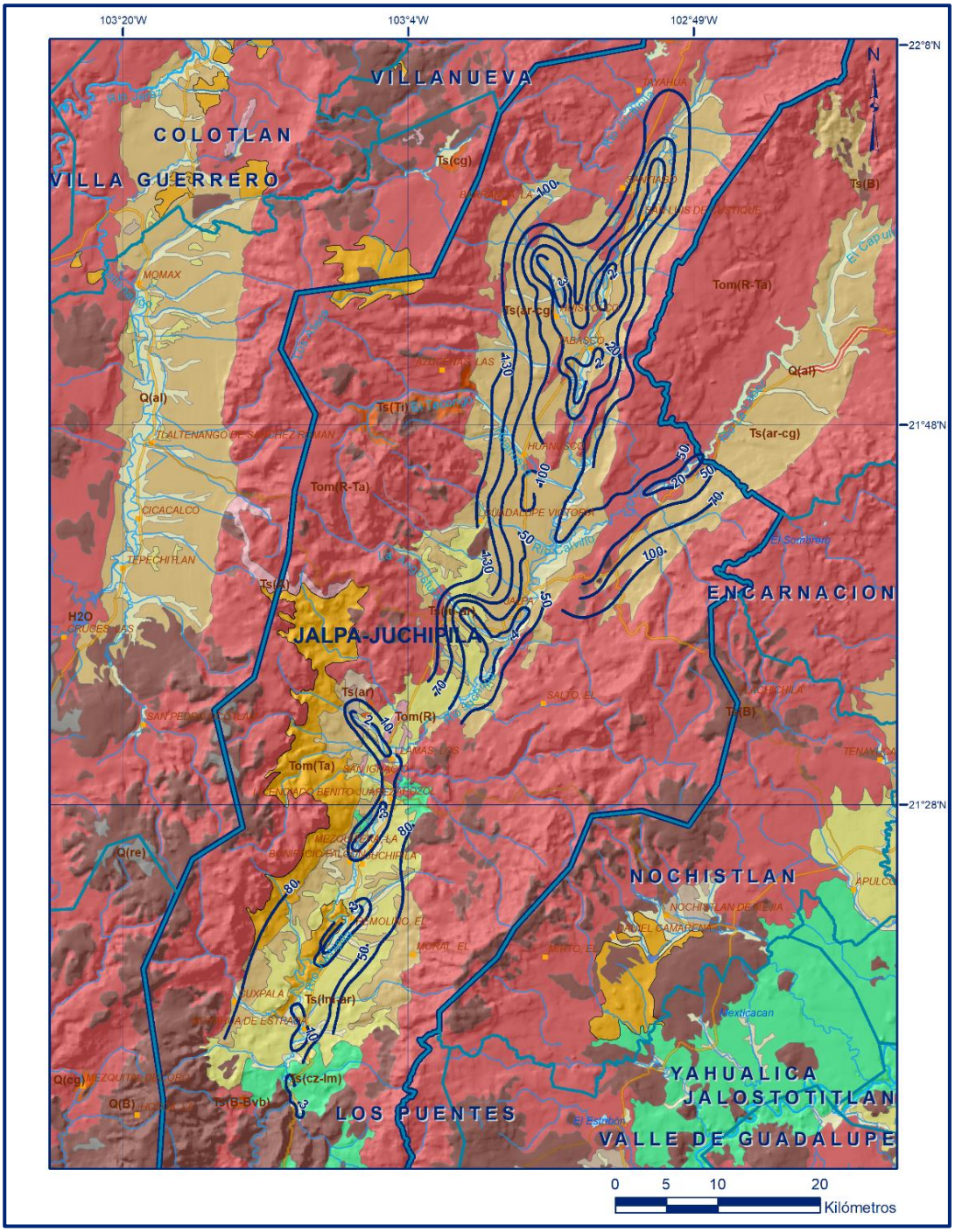


Figura 3. Profundidad del nivel estático en m (2022)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2022 registró valores que variaron de 1,710 a 1,190 msnm. Las menores elevaciones de 1,190 a 1,250 msnm se registran en el extremo sur del acuífero, en la zona ubicada al sur de Moyahua en la que el curso de río Juchipilase encañona. Las mayores elevaciones de 1,620 a 1,710 msnm se registran en las porciones altas ubicadas al norte del acuífero, desde la zona ubicada entre las

presas Julián Adamey El Chique hasta Tabasco, desde donde descienden gradualmente por efecto topográfico hacia el sur-suroeste del acuífero, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo NE-SW, paralela a la dirección de escurrimiento del río Juchipila, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental (figura 4).

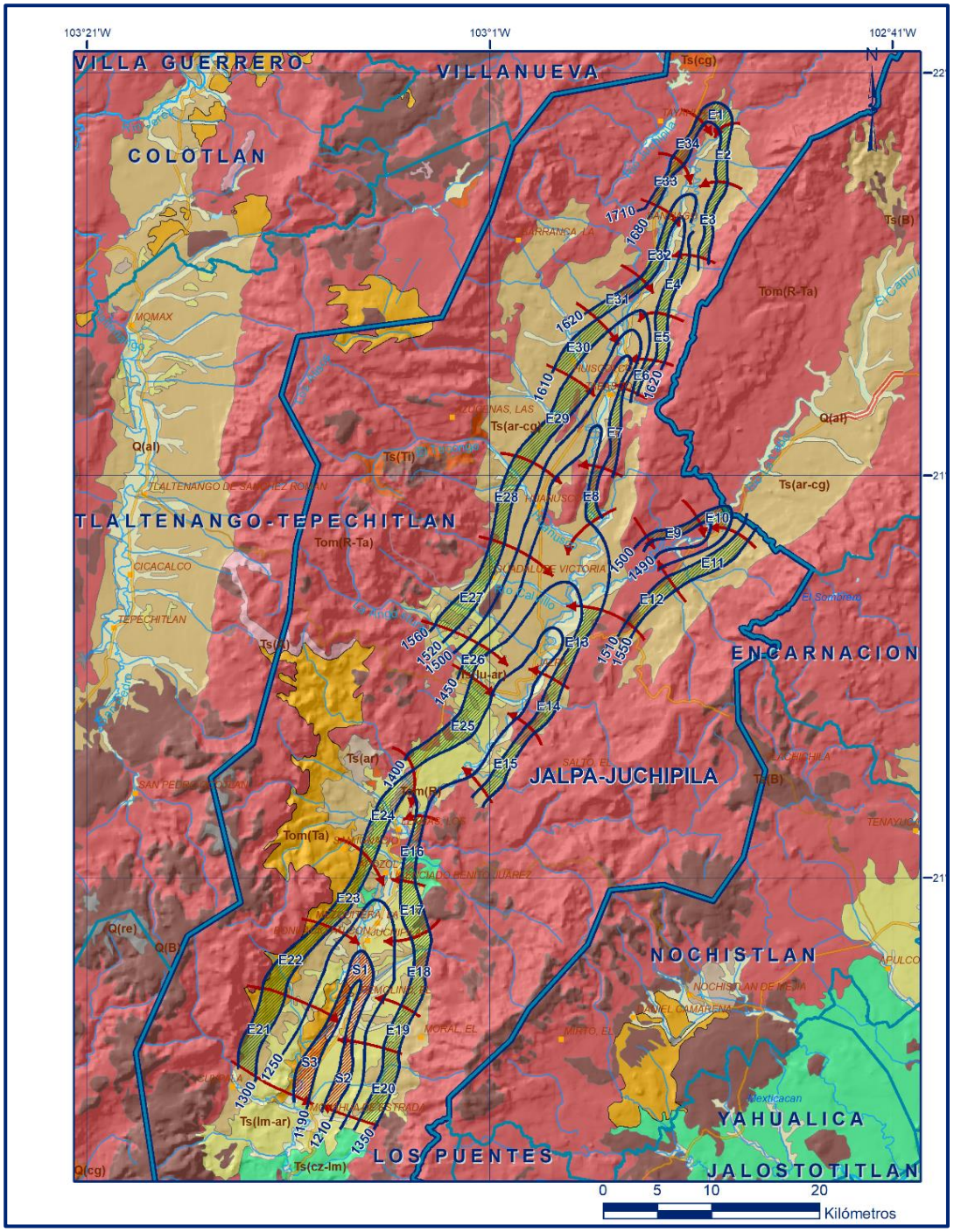


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2022)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2005-2022 registró valores de abatimiento en las porciones norte y centro del acuífero, que varían de 1 a 10 m, con valores locales de hasta 20 m en la región de Jalpa. Los mayores abatimientos se registran en la porción central del valle, en las regiones ubicadas al norte y sur de Jalpa, donde se concentra la extracción por bombeo para uso agrícola y abastamiento de agua potable. En estas zonas el abatimiento medio anual es de 0.5 m. Descensos en el nivel estático de 5 m se registraron en el área comprendida entre Guadalupe Victoria y Achoquen. Considerando el periodo analizado de 17 años, se estima un abatimiento medio anual para esta porción del acuífero de 0.3 m. En el extremo sur no se registraron variaciones significativas en la posición del nivel del agua subterránea (figura 5).

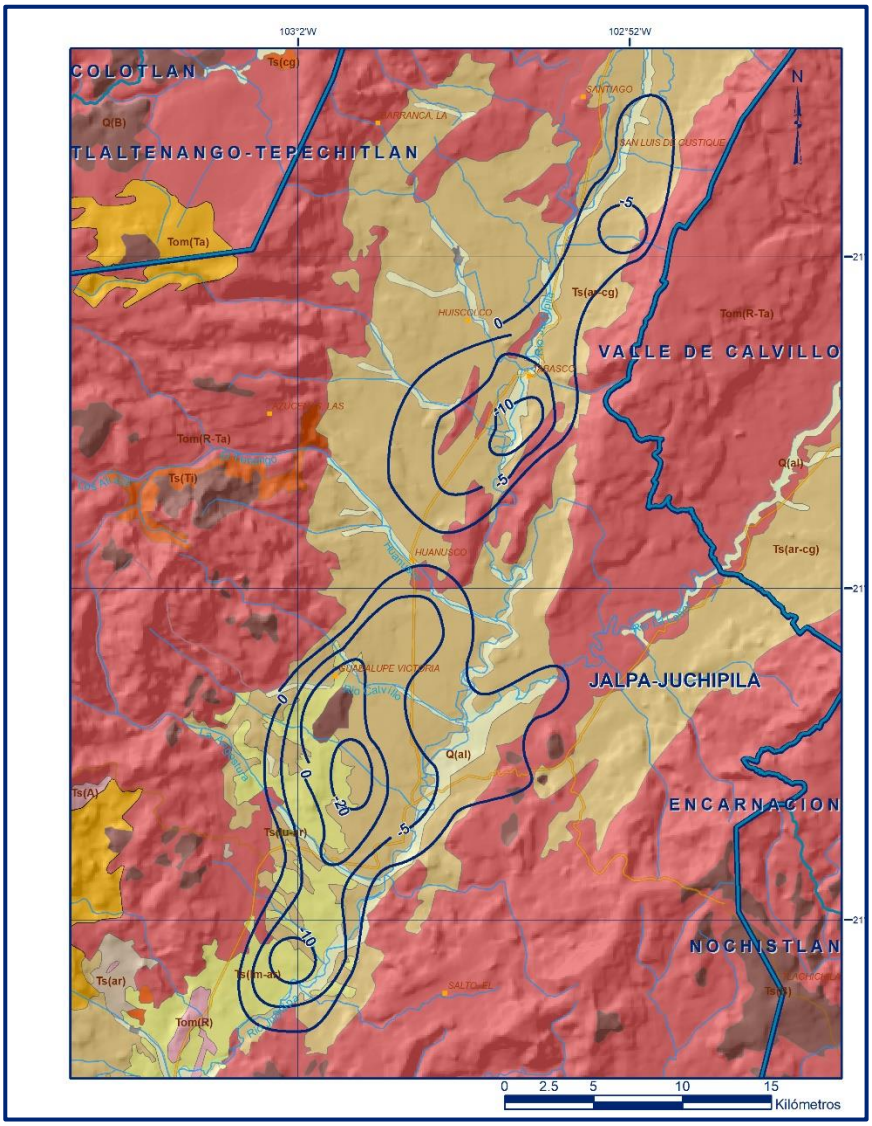


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2005-2022)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018) se tomaron 10 muestras de agua subterránea en el año 2018. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizado en 2022, se obtuvieron tomaron 100 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 disueltos totales (SDT), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, así como iones principales y determinaciones de nitratos, fluoruro, sílice, hierro, zinc, plomo, cobre, manganeso, mercurio y arsénico.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de SDT varían de 83 a 853 mg/l; sólo una muestra superó el límite máximo permisible (LMP) 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, al registrar concentración de 1841 mg/l de SDT en la noria La Hacienda. Los parámetros cuyas concentraciones superan el LMP establecido en la norma referida para consumo humano son coliformes fecales, fluoruro, hierro y arsénico, identificados en muestras tomadas en el año 2018, como parte de la RENAMECA. Dos muestras rebasan el LMP de coliformes establecido en la norma como no detectable, con concentraciones de coliformes fecales de 52 y 84 NMP/100ml; 9 muestras rebasan el LMP para consumo humano de 1.5 mg/l para fluoruro, con concentraciones máximas de 7.84 mg/l; una muestra rebasa el LMP de 0.3 mg/l para el hierro, ya que tiene una concentración de 0.69 mg/l; 6 muestras rebasan el LMP de arsénico de 0.025 mg/l, con concentraciones máximas de 0.052 mg/l.

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, excepto la noria mencionada, y presentan valores extremos de 155 a 1194 µS/cm. Los valores más bajos de SDT y conductividad eléctrica se registran en la porción norte y centro del acuífero y se incrementan en dirección hacia el sur, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Las temperaturas registradas varían de 17.4 a 50.1 °C, en tanto que el pH medido fluctúa entre 6.6 a 8.7.

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 son la bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-mixta, las dos representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia; la primera que ha circulado a través de rocas y sedimentos carbonatados que afloran en las porciones zona centro y sur, y la segunda a través de rocas volcánicas y cálcicas 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), la totalidad de las muestras de agua se clasifican como C_1S_1 y C_2S_1, que representa agua de baja a media salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable, que se considera apta para el uso agrícola, con restricción para el cultivo de hortalizas en el caso de la segunda clasificación.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de captaciones, llevado a cabo como parte del estudio realizado en 2022, solo se consideró un total de 400 aprovechamientos. Sin embargo, datos actuales del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), en el acuífero Jalpa-Juchipila existen registrados un total de 1050 obras que aprovechan el agua subterránea, 388 pozos, 604 norias y 58 manantiales; de las cuales 989 están activas y 61 se consideran inactivas. De las obras activas, 472 se destinan al uso agrícola, 400 para uso público-urbano, 104 para uso doméstico y pecuario, 7 de servicios y 6 más industrial.

El volumen de extracción asciende a **70.1 hm³ anuales**, de los cuales 64.8 hm³ (92.4%) se destinan al uso agrícola, 3.9 hm³ (5.6%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y el restante 1.4 hm³ (2.0%) para usos pecuario, doméstico y servicios.

Adicionalmente, a través de los **58 manantiales** identificados se descarga un caudal conjunto estimado de 45 lps, que equivalen a **1.3 hm³ anuales**, la mayor parte destinada al uso agrícola y público-urbano.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2005-2022, en una superficie de **820 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:

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 del acuífero:

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 el volumen de agua para uso público-urbano es pequeño, solo se considera la infiltración de los excedentes del riego agrícola (Rr).

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.

$$Rv + Eh + Rr - B - Sh - ETR - Dm = \pm \Delta V(S) \qquad (1)$$

Donde:

Rv = Recarga vertical
Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal
Rr = Recarga Incidental por retornos de riego
B = Bombeo
Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal
Dm = Descarga de manantiales
ETR = Evapotranspiración
ΔV(S)= Cambio de almacenamiento

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

$$Rv = B + Sh + ETR + Dm + \Delta V(S) - Eh - Rr \qquad (2)$$

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 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

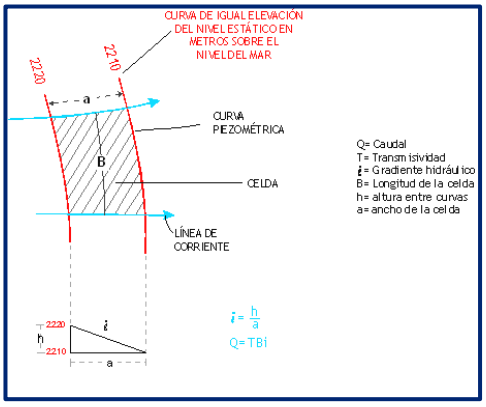
Donde:

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 **56.9 hm³ anuales.**

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2022)

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	3159	1934	30	0.0155	0.0015	0.0735	2.3
E2	5189	823	30	0.0365	0.0005	0.0946	3.0
E3	7255	694	30	0.0432	0.0005	0.1568	4.9
E4	5784	1026	10	0.0097	0.0003	0.0169	0.5
E5	4485	1016	10	0.0098	0.0003	0.0132	0.4
E6	3324	577	50	0.0867	0.0002	0.0576	1.8
E7	7765	943	20	0.0212	0.0003	0.0494	1.6
E8	5014	732	50	0.0683	0.0002	0.0685	2.2
E9	4716	768	10	0.0130	0.0002	0.0123	0.4
E10	3312	2271	10	0.0044	0.0005	0.0073	0.2
E11	7508	1448	40	0.0276	0.0003	0.0622	2.0
E12	5282	1203	40	0.0333	0.0003	0.0527	1.7
E13	7423	819	50	0.0611	0.0001	0.0453	1.4
E14	5012	1354	50	0.0369	0.0005	0.0925	2.9
E15	7100	979	50	0.0511	0.0003	0.1088	3.4
E16	6154	980	20	0.0204	0.0003	0.0377	1.2
E17	5063	1921	20	0.0104	0.0005	0.0264	0.8
E18	6947	1088	20	0.0184	0.0002	0.0255	0.8
E19	4115	1331	20	0.0150	0.0003	0.0185	0.6
E20	6985	1492	20	0.0134	0.0003	0.0281	0.9
E21	7858	1719	20	0.0116	0.0002	0.0183	0.6
E22	7581	1578	20	0.0127	0.0003	0.0288	0.9
E23	7321	1108	20	0.0181	0.0002	0.0264	0.8
E24	8370	1653	20	0.0121	0.0003	0.0304	1.0
E25	9812	2152	50	0.0232	0.0003	0.0684	2.2
E26	2899	1093	50	0.0457	0.0001	0.0133	0.4
E27	9313	1215	40	0.0329	0.0003	0.0920	2.9
E28	8029	1302	40	0.0307	0.0002	0.0493	1.6
E29	8536	1315	40	0.0304	0.0005	0.1298	4.1
E30	5643	1739	50	0.0288	0.0003	0.0487	1.5
E31	5404	1008	10	0.0099	0.0003	0.0161	0.5
E32	6476	890	10	0.0112	0.0015	0.1091	3.4
E33	4605	526	30	0.0570	0.0003	0.0788	2.5
E34	4117	761	30	0.0394	0.0003	0.0487	1.5
						TOTAL	**56.9**

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.

7.1.3 Recarga incidental (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea menor a 50 m en la zona agrícola, la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo y el uso predominante de sistemas eficientes de riego. De esta manera, si el volumen de bombeo para uso agrícola es de 104.4 hm^3 anuales, de los cuales 64.8 hm^3 son de agua subterránea y 39.6 hm^3 son de agua superficial proveniente de las presas Julián Adame, El Chique y Moraleños. Por lo tanto, el retorno agrícola **Rr = 10.4 hm^3 anuales.**

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 y a través de manantiales (Dm).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **70.1 hm^3 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 2016, mostrada en la figura 4. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **9.0 hm^3 anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2022)

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	12915	2527	30	0.0119	0.0010	0.1533	4.8
S2	6559	1218	30	0.0246	0.0003	0.0485	1.5
S3	8022	1401	30	0.0214	0.0005	0.0859	2.7
						TOTAL	9.0

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).

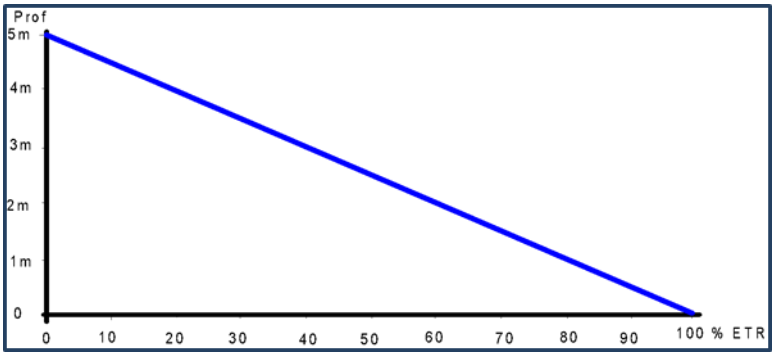
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, como se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 21.5 °C y precipitación = 627.6 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de **592.7 mm.**

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

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

T (°C) =	21.5		
P(mm) =	627.6	P^2 =	393881.76
L =	1334.41875	L^2 =	1780673.4
ETR (mm)	592.7		

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.



Existen pequeñas zonas dentro del área de balance, ubicadas a lo largo del cauce del Río Juchipila, en las que 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 que existen en las regiones que presentan este tipo de climas.

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 la superficie de 41.1 km² de niveles freáticos someros, principalmente a lo largo del cauce del Río Juchipila y arroyos tributarios en donde la profundidad promedio al nivel del agua subterránea es de 4, 3 y 2 m, le corresponde el 20, 40 y 60% de la lámina de ETR, respectivamente. EL detalle del cálculo se muestra en la tabla 4. Por lo tanto, **ETR = 10.0 hm³ anuales.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2022)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km^2)	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm^3/año)
2	2	14.3	0.5927	5	0.6	5.1
3	3	14.9	0.5927	5	0.4	3.5
4	4	11.9	0.5927	5	0.2	1.4
	Total	**41.1**			**Total**	**10.0**

7.2.4 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 58 pequeños manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 45 lps, que representan un volumen anual de **1.3 hm³.**

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 2005-202 (figura 5). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.03, 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 (km²)

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de – 56.9 hm³, por lo que el promedio anual es de -3.3 hm³. Por lo tanto, **ΔV(S) = -3.3 hm³anuales.**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2005-2022)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
0 a -5.0	-2.5	184.3	0.03	-13.8
-5	-5	5.1	0.03	-0.8
-5 a -10	-7.5	102.0	0.03	-23.0
-10	-10	10.1	0.03	-3.0
-10 a -20	-15	27.6	0.03	-12.4
-20	-20	6.5	0.03	-3.9
	TOTAL	**335.6**	**TOTAL**	**-56.9**
	Promedio anual			**-3.3**

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:

$$Rv = B + Sh + ETR + Dm + \Delta V(S) – Eh – Rr \quad (2)$$

$$Rv = 70.1 + 9.0 + 10.0 + 1.3 – 3.3 – 56.9 – 10.4$$

$$Rv = 19.8$$

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

R = Rv + Eh + Rr

R = 19.8 + 56.9 + 10.4

R = 87.1 hm³ 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 **87.1 hm³ anuales,** de los cuales 76.7 hm³ son recarga natural y 10.4 hm³ recarga incidental.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso de este acuífero, su valor es de **10.3 hm³ anuales**, de los cuales 1.3 hm³ corresponden a la descarga de los manantiales y 9.0 hm³ a las salidas subterráneas

que hacia el cañón del río Juchipila, al sur de la localidad del mismo nombre, hacia el acuífero vecino Los Puentes, del estado de Jalisco. Por lo tanto, **DNC = 10.3 hm³ 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 **68'400,691 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre del 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.

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 87.1 – 10.3 – 68.400691
DMA = 8.399309 hm³ anuales

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **8'399,309 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2004. Reactivación de Red de Monitoreo del Acuífero del Valle de Jalpa-Juchipila, Zac. Realizado por Lesser y Asociados S.A. de C.V.

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, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2008. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Jalpa-Juchipila, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2016. Piezometría histórica del acuífero Jalpa-Juchipila, 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 la empresa Técnicos Asesores y Constructores, S. A.

Secretaría del Campo del Estado de Zacatecas (SECAMPO), 2022. Estudio Hidrogeológico del Acuífero 3209 Jalpa-Juchipila, estado de Zacatecas. Realizado por la Universidad Autónoma de Zacatecas.

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