



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL  
DE AGUA EN EL ACUÍFERO CORRALES (3203), ESTADO DE  
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
<b>Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
1.1 Localización del acuífero.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero .....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>6</b>
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	9
<b>4. GEOLOGÍA .....</b>	<b>9</b>
4.1 Estratigrafía.....	10
4.2 Geología estructural.....	14
4.3 Geología del subsuelo.....	15
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	16
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría.....	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2 Elevación del nivel estático .....	18
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	19
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>21</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>22</b>
7.1 Entradas.....	22
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
<b>7.2 Salidas.....</b>	<b>24</b>
7.2.1 Bombeo (B).....	24
7.2.2 Descarga de manantiales (Dm) .....	24
7.2.3 Salidas por flujo base (Dfb).....	25
7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	25
<b>8. DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>26</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	27
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	27
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>29</b>

## **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 Corrales, definido con la clave 3203 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción occidental del estado de Zacatecas, en el límite con los estados de Durango y Jalisco, entre los paralelos 22°20'34" y 23°25'34" de latitud norte y entre los meridianos 103°23'28" y 104°19'45" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,938.98 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con el acuífero Sabinas, al noreste con el acuífero Abrego, al este y sureste con el acuífero Valparaíso, pertenecientes al estado de Zacatecas; al sur con el

acuífero Norte de Jalisco, perteneciente al estado de Jalisco; al suroeste con el acuífero Valle Santiago–San Blas; al oeste y noroeste con el acuífero San Pedro Tuxpan, ambos del estado de Nayarit (figura 1). Geopolíticamente, el territorio que cubre el acuífero comprende totalmente el municipio Jiménez del Teúl, la mayor parte de Valparaíso y fracciones menores de Chalchihuites, Sombrerete y Fresnillo.

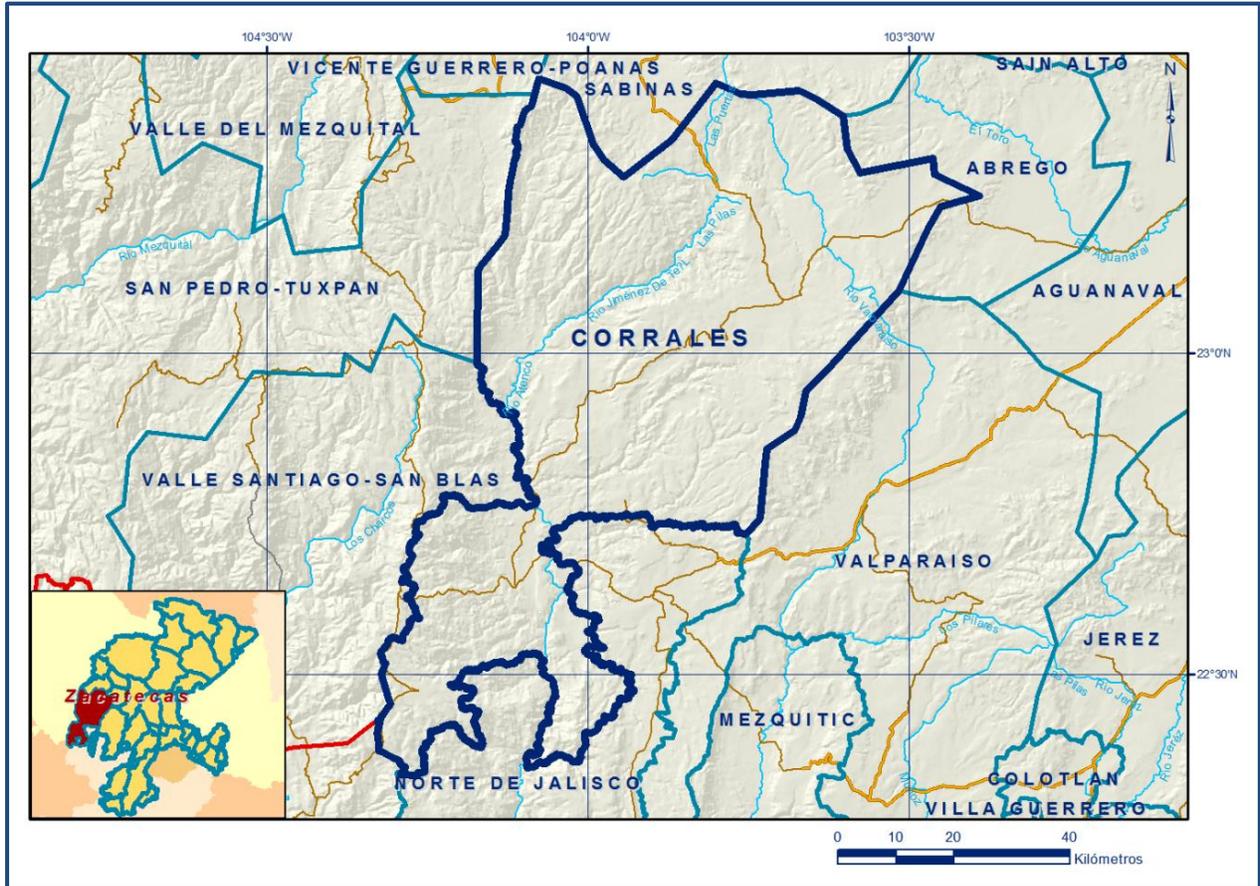


Figura 1. Localización del acuífero

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 3203 CORRALES**

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	103	37	7.9	22	59	2.1	
2	103	39	40.6	22	56	22.3	
3	103	40	8.8	22	54	3.9	
4	103	40	42.6	22	52	44.1	
5	103	43	18.8	22	51	3.1	
6	103	43	28.3	22	49	42.9	
7	103	43	56.0	22	44	33.8	
8	103	45	16.2	22	43	9.0	DEL 8 AL 9 POR EL LIMITE ESTATAL
9	104	17	30.7	22	20	38.6	DEL 9 AL 10 POR EL LIMITE ESTATAL
10	104	10	24.0	22	59	6.4	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	104	5	1.0	23	24	11.4	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	104	4	38.4	23	25	33.8	
13	104	2	4.0	23	24	45.0	
14	104	1	4.7	23	23	53.2	
15	103	59	32.0	23	19	30.5	
16	103	58	32.0	23	17	58.8	
17	103	56	42.9	23	16	25.2	
18	103	52	12.1	23	19	53.3	
19	103	48	5.1	23	25	13.5	
20	103	45	47.3	23	24	8.9	
21	103	44	40.8	23	24	3.2	
22	103	40	18.6	23	24	27.9	
23	103	38	51.2	23	23	45.1	
24	103	36	14.5	23	22	6.3	
25	103	35	49.3	23	19	2.5	
26	103	34	37.0	23	16	48.3	
27	103	27	52.4	23	18	10.9	
28	103	27	42.1	23	16	38.0	
29	103	23	28.2	23	14	40.4	
30	103	27	9.1	23	13	36.4	
31	103	28	20.2	23	11	35.9	
32	103	30	58.1	23	5	48.1	
1	103	37	7.9	22	59	2.1	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Corrales pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa u Organismo de Cuenca VII “Lerma-Santiago-Pacífico” 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 es *rige en casi toda la 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.

Una pequeña porción al noreste del acuífero se encuentra vedada por el *“Decreto por*

el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de los Municipios de Fresnillo y Villa de Cos, Zac. y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en esos Municipios” publicado el 6 de abril de 1981. Esta veda es tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo 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. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca “Río Santiago”, instalado el 14 de julio de 1999. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo estudios hidrogeológicos de evaluación, algunos de cobertura regional. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

**REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS VILLA GARCÍA, EL SALVADOR, GUADALUPE GARZARÓN, CAMACHO Y EL CARDITO, ESTADO DE ZACATECAS Y EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS GARCÍA DE LA CADENA, PINO SUÁREZ Y CORRALES, ZAC., elaborado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C., para la Comisión Nacional del Agua, en 2007.** El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento del flujo subterráneo, profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea, mediante la obtención de información procedente de las redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua de acuíferos del estado de Zacatecas, entre los cuales se incluye Corrales, para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, determinar la recarga media anual del agua subterránea y las componentes de balance de agua subterránea.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO CORRALES, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2019.** Se utilizó la información piezométrica reciente para la elaboración de las configuraciones del nivel estático. El estudio 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; las regiones centro y sur en la subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur, que abarca la mayor parte del acuífero; la subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos en la porción nororiental; y al noreste del acuífero la subprovincia Gran Meseta y Cañadas Duranguenses” en la parte noroeste. Una pequeña zona del extremo norte pertenece a la subprovincia Sierras y Llanuras de Durango.

La Sierra Madre Occidentales una cadena montañosa que abarca todo el oeste mexicano y el extremo suroccidental de los Estados Unidos. En sus 1500 km de longitud recorre Arizona, parte de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit y Jalisco, lugar donde se une al Eje Volcánico Transversal de México. Es una extensa meseta formada por rocas volcánicas disectada por fallas normales y grabens, cuyo borde occidental se caracteriza por presentar una terminación abrupta con fallas normales que presentan grandes desplazamientos y zonas de barrancas profundas; se originó 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 Mesetas y Cañadas del Sur ocupa el 7.94% de la superficie total del estado, el paisaje de esta subprovincia está constituido por altas mesetas, algunas de ellas enormes, que son interrumpidas abruptamente por profundos cañones, ocasionados por la erosión fluvial sobre los diversos tipos de rocas volcánicas ácidas que constituyen la sierra. La subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos se caracteriza por sus sierras altas, de 2300 a 2800 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.

La Gran Meseta y Cañones Duranguenses está formada por rocas ígneas extrusivas ácidas y formada principalmente por mesetas de gran superficie con cañadas y de sierra alta con cañones. En el acuífero presenta las principales elevaciones topográficas cuya elevación varía de 2,300 a 2,600 msnm; su principal rasgo son las grandes mesetas limitadas por abruptos y enormes acantilados. Las características especiales de estas subprovincias son su elevación sobre el nivel medio del mar y el gran número y extensión de sus hermosos y fértiles valles, separados uno de otros por altas barreras montañosas. La subprovincia de Sierras y Llanuras de Durango es una franja angosta y alargada que forma parte de los costados orientales de la Sierra Madre Occidental, desde Cuauhtémoc en Chihuahua hasta Sombrerete en Zacatecas. Está representada por llanuras amplias y una manifestación importante de mesetas, constituidas principalmente por riolitas e ignimbritas.

### **3.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, dentro del área se presentan dos grupos de climas: el grupo de climas secos que se registra en la franja central que se extiende de norte a sur del acuífero, y el grupo de climas templados que se presenta tanto en la porción noreste como la suroeste del acuífero.

El clima Semiseco Cálido (BS1(h')hw), con lluvias en verano y porcentaje de precipitación invernal menor de 5, se presenta en una pequeña porción, hacia el sur de la zona, donde la precipitación media anual fluctúa entre 700 y 800 mm y la temperatura media anual es de 22° C. El Clima Semiseco Semicálido (BS1hw) presenta lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2; la precipitación media anual es de un rango de 500 a 700 mm y la temperatura media va de 18 a 22° C. Este tipo de clima se observa en una franja central del acuífero, con orientación norte-sur. El Clima Semiseco Templado BS1 kw(w) con lluvias en verano, rango de precipitación media anual de 400 a 700 mm y temperatura media anual menor a 18° C, se presenta en la zona norte. El Clima Templado Subhúmedo C(w0) se registra en una pequeña zona del extremo noroccidental, es intermedio en cuanto a humedad, con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal menor a 5.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 9 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Jiménez del Teúl, Corrales, Milpillitas de la Sierra, Ameca la Vieja, San Pedro de la Sierra, San Juan Capistrano, El Platanito, Santa Lucía y Pajaritos de la Sierra. Con los registros obtenidos para

diferentes periodos de años, el más grande 1957-2018 y el más corto 1981-2018, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **521.3 mm, 17.2 °C y 1613.4 mm**, respectivamente.

La precipitación a lo largo del año tiene variaciones considerables. Las lluvias más abundantes se registran durante los meses de julio a septiembre, en tanto que los meses menos lluviosos son de noviembre a abril. La temporada de estiaje total ocurre de marzo a mayo, la región presenta de 0 a 60 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 región hidrológica número 12 Lerma-Santiago, subregión hidrológica Río Santiago, dentro de la cuenca hidrológica conocidas como Río San Juan, ocupa también una fracción de la cuenca Río Atengo y pequeñas fracciones de las cuencas Presa Leobardo Reynoso y Arroyo Lobatos.

La cuenca Río San Juan comprende una superficie drenada de 149.5 km<sup>2</sup>. El cauce principal de esta corriente tiene una longitud de 280 km y se forma principalmente por los escurrimientos del río San Juan; esta corriente nace en la vertiente oriental de la Sierra Madre Occidental, en la porción sureste del estado de Durango a casi 2000 msnm; inmediatamente después penetra a Zacatecas con el nombre de río San Juan Capistrano o Chapalangana, siguiendo un curso general al sur; cruza una pequeña parte del estado de Jalisco y cambia su dirección rumbo al suroeste para cruzar el límite de los estados de Jalisco y Nayarit, sitio donde confluye el río Jesús María; aquí toma el nombre de Huaynamota y continúa así hasta su confluencia con el Río Grande Santiago.

En la superficie que cubre el acuífero existen poca infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial, está representada por las presas: Francisco González Bocanegra, ubicada en la porción noreste de la zona, cercana a la comunidad La Batea, su capacidad de almacenamiento es de 3.36 hm<sup>3</sup> y aprovecha las aguas del arroyo San Antonio; la presa San Ignacio, se localiza en la comunidad La Batea, aprovecha las aguas del arroyo Las Grullas; en la porción suroeste del área se ubican las presas San Juan Capistrano I y II que aprovechan las aguas del arroyo Ojito de Agua y tienen una capacidad de almacenamiento de 0.5 y 0.75 hm<sup>3</sup>, respectivamente.

### **3.4 Geomorfología**

El paisaje está constituido por altas mesetas, que son interrumpidas abruptamente por profundos cañones que a su vez han resultado de la erosión fluvial sobre los diversos tipos de roca volcánica ácida que constituyen las sierras. El área de estudio se caracteriza por la presencia de los siguientes sistemas de topo formas: Sierras, ocurren hacia el norte y oeste de los límites del acuífero; Bajadas, se observan en una pequeña porción hacia el norte; Mesetas, se extienden en una franja orientada de noreste a suroeste, prácticamente se distribuye en casi todo el acuífero; Llanuras, las cuales ocurren hacia el noreste en una pequeña área del acuífero; Valles, están distribuidos en las porciones centro-sur y noreste del acuífero; Cañones, asociados a las mesetas y valles distribuidos al noreste y suroeste de los límites del acuífero.

En la zona se encuentran elevaciones que varían de 760 msnm (porciones centro y suroeste del acuífero) a 3,010 msnm (porciones norte, este y suroeste); es decir, existe un desnivel de 2,250 m en una distancia muy corta, lo que provoca que los escurrimientos tarden poco tiempo en llegar a la planicie aluvial en épocas de lluvias.

## **4. GEOLOGÍA**

El marco geológico regional de la zona en la que se ubica el acuífero está representado por los eventos relacionados con el establecimiento de la Sierra Madre Occidental y la evolución del Terreno Guerrero, que fue definido por Campa et al. (1983), que presentan características litoestratigráficas diferentes. De esta manera, del Terreno Guerrero se presentan unidades metamorfozadas de edad Cretácico, y unidades de origen volcánico del Cenozoico pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Completan la columna unidades de edad cuaternaria que consisten en basaltos y materiales aluviales. La secuencia estratigráfica está conformada por unidades afines del Terreno Guerrero, y una cubierta de rocas ígneas de composición ácida y básica. Al oriente del acuífero, el Terreno Guerrero está representado por una secuencia de metabasalto intercalados con metareniscas y metalutitas muy deformados, (Formación Chilitos) de edad Jurásico superior-Cretácico inferior que corresponden a un arco de islas toleítico, se considera una unidad alóctona. El Terreno Parral delimita al acuífero en su porción norte, está distribuido en las sierras de Santa Lucía, Sombrerete y Chalchihuites. Está constituido por una secuencia flyschoides calcáreo-arenosa con niveles de lutita, nódulos, lentes y bandas de pedernal negro.

Las unidades del Cenozoico cubren a los terrenos Tectono-estratigráficos por discordancia erosional. Están representadas por rocas elásticas continentales, rocas

volcánicas félsicas y máficas, intrusivos plutónicos y subvolcánicos de composición ácida a intermedia. En la base del Cenozoico se depositó discordantemente un conglomerado polimíctico, Formación Ahuichila, constituido por fragmentos de calizas y rocas volcánicas, aflora en el área de Sombrerete. La actividad volcánica más antigua está representada por tobas raquílicas a riolíticas, cuya edad es de 58.1 a 38 M.a., cubren por discordancia a los conglomerados de la Formación Ahuichila en el área de Chalchihuites, al norte del acuífero. Un segundo evento volcánico dio origen a potentes paquetes de ignimbritas, tobas, derrames riolíticos y basálticos, de edad de 38 a 24 M.a. Durante el Oligoceno-Mioceno se emplazaron rocas intrusivas, formando troncos y apófisis alineados a las zonas de debilidad NW-SE. La composición varía granito-granodiorita-cuarzomonzonita-diorita, de afinidad calcoalcalina, con edades de 46-32 M.a. Están relacionados a mineralización polimetálica en Chalchihuites, San Martín-Sabinas, Jiménez de Teúl y Cerro de Sacrificios. En Chalchihuites y Sombrerete, existen pórfidos de composición riolítica, monzonítica, granodiorítica y andesítica, presentándose diques de la misma composición orientados NW-SE, que intrusionara los sedimentos mesozoicos.

Derrames de basaltos de olivino del Pliocuaternario, están asociados a conos cineríticos que cubren a las rocas volcánicas ácidas que afloran en las regiones de Milpillas de la Sierra y Jiménez del Teúl. Del Neógeno se tiene un conglomerado polimíctico constituido por fragmentos subredondeados de areniscas y rocas volcánicas de composición riolítica, areniscas, calizas y limos semiconsolidados (figura 2). El cuaternario está representado por sedimentos lacustres, conglomerados, abanicos y terrazas aluviales que rellenan las cuencas (Carta Geológico-Minera Fresnillo F13-3. Escala 1:250,000. SGM, 1998).

#### **4.1 Estratigrafía**

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias marinas y continentales, ígneas intrusivas y rocas volcánicas, así como depósitos aluviales, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico Inferior al Reciente (figura 2). A continuación, se presenta la descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

### **CRETÁCICO INFERIOR**

#### **Caliza-Lutita**

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio se presentan al suroeste del poblado Jiménez del Teúl y consisten de un paquete de rocas calcáreo-arcillosas,

depositadas durante el Cretácico Inferior que dio lugar a una secuencia de calizas arcillosas con estratificación fina y niveles de lutitas, limolitas, areniscas calcáreas y bandas de pedernal negro intercalado. Esta unidad se encuentra intensamente plegada, presentando dentro de los horizontes de lutitas zonas muy fisiles. Las calizas son las rocas más dominantes en esta secuencia y en lámina delgada se observan algunas estructuras semicirculares ovoides que pudieran ser foraminíferos. Su contacto superior discordante es con los conglomerados polimícticos del Mioceno y rocas volcánicas del Cenozoico; de la misma manera con cuerpos intrusivos.

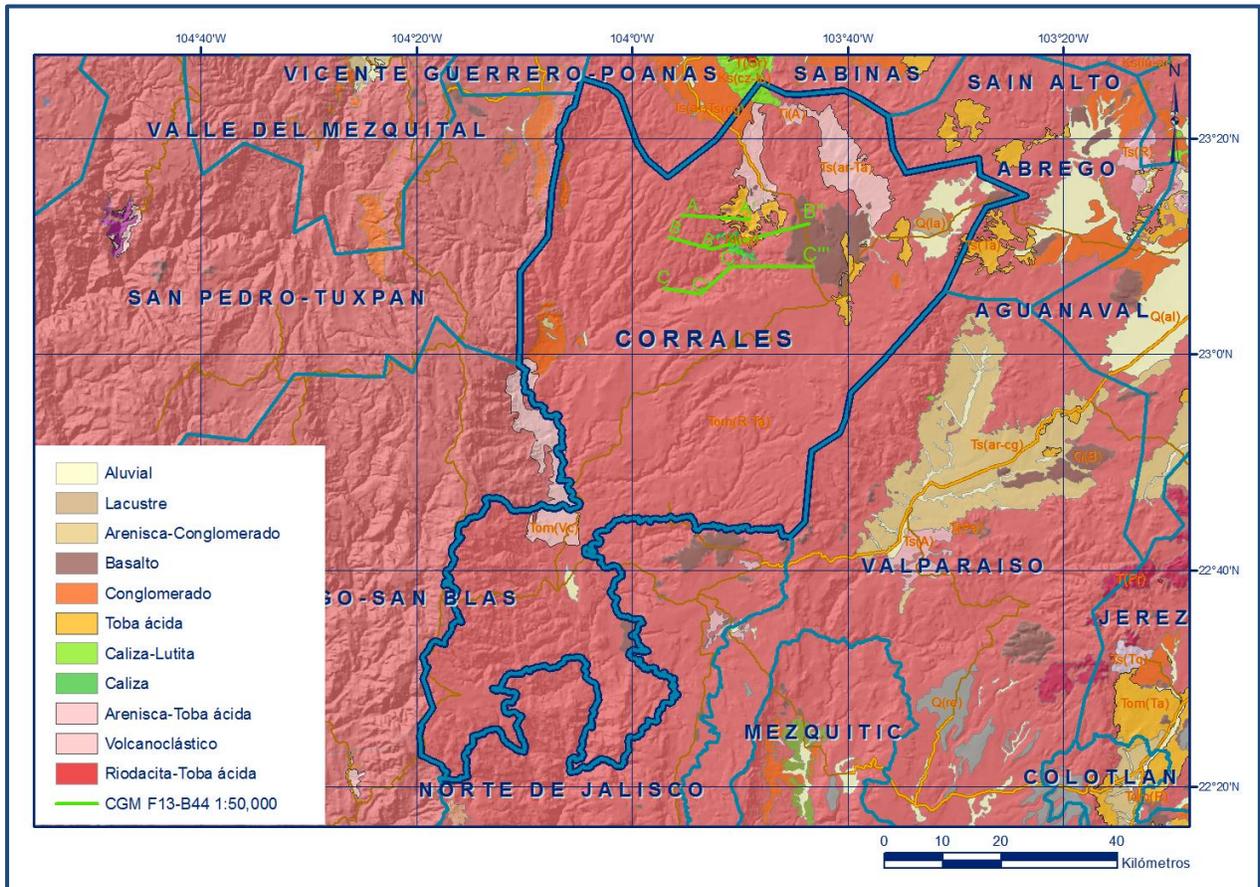


Figura 1. Geología general del acuífero

## CENOZOICO

### Andesita-Traquiandesita.

Durante el Paleoceno-Eoceno ocurrió un evento volcánico de composición intermedia distribuido a lo largo de la porción centro-norte y suroeste del acuífero, constituido por andesita-traquiandesita. Esta unidad presenta una intensa alteración hidrotermal clorítica, vetillas de cuarzo con sulfuros (propilitización) y oxidación. Afectando discordantemente a calizas-lutitas del Cretácico Inferior y también a las ignimbritas

del Oligoceno. Por su posición estratigráfica que guarda con las demás unidades litológicas que atraviesa, se le asignó una edad correspondiente al Oligoceno, correlacionable con el Grupo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental. Son el producto de reactivación de la cámara magmática en el Oligoceno, relacionado a cuerpos granodioríticos-cuarzomonzoníticos.

### **Rocas Intrusivas**

Están representadas por fases magmáticas que varían de granodiorita a cuarzo monzonita, de textura fanerítica y porfídica equigranular, de grano grueso, de color gris claro con tonalidades blanquecinas y rosáceas, que intrusionan en forma de diques y troncos a rocas del Cretácico Inferior (calizas, areniscas y lutitas), generando un metamorfismo de contacto y produciendo recristalización y silicificación de las rocas adyacentes, con la consecuente mineralización. Presenta algunas variaciones a monzonita y su coloración varía de amarillo claro a café. Estas intrusiones afectan a las unidades anteriormente descritas. En el área del acuífero se presentan afloramientos de estos intrusivos en la zona minera El Carrizo, ubicada al suroeste de la localidad Jiménez del Teúl.

### **Toba Riolítica-Ignimbrita**

Posterior a la secuencia de rocas intrusivas, se origina regionalmente un gran evento volcánico, el cual da lugar a gruesos paquetes de rocas volcánicas félsicas con algunos lapsos de vulcanismo bimodal. Hacia la base de la serie se constituye por paquetes de toba riolítica, arenisca, ignimbrita e intercalaciones de basalto. Los paquetes de toba riolítica y arenisca, son los más dominantes hacia el valle del río Jiménez del Teúl, mientras que las intercalaciones de riolita, ignimbrita y basalto son más predominantes hacia la porción noreste del acuífero, en la región del ejido El Potrero. Muestras de ignimbrita y basalto, fueron fechadas en su matriz por K-Ar, dando una edad de 29.7 Ma. y 31.7 Ma., respectivamente, lo cual las ubica en el Oligoceno Medio.

Dentro de este mismo evento volcánico se tiene la posterior deposición de toba riolítica-ignimbrita, que sobreyace a la secuencia anterior y la cual está ampliamente distribuida dentro de la zona, principalmente hacia partes topográficas altas como son la Sierra de Tlaxcala y Las Gallinas, Mesa San Antonio y Mesa Los Hornillos. En esta unidad predominan los niveles de toba riolítica de cristales, así como delgadas intercalaciones de ignimbrita y erráticos horizontes arenosos y tobáceos. Las tobas riolíticas son de matriz deleznable y argilizada, con cristales de cuarzo, feldespato y micas. Los niveles de ignimbrita presentan una matriz intensamente soldada y

compacta, algunas con gran cantidad de fragmentos de roca y pómez, así como cristales de cuarzo-feldespatos inmersos en una matriz afanítica ligeramente fluidal. Cubriendo a esta unidad se tiene un paquete de ignimbritas, representadas por los afloramientos en la mesa Los Pinos, que se caracterizan por cristales de cuarzo-feldespatos, fragmentos de roca y pómez en una matriz afanítica fluidal intensamente soldada y compacta.

### **Riolita-Ignimbrita**

Afloramientos de riolita-ignimbrita intercalados se presentan indistintamente en diversas partes de la región, las riolitas contienen cristales de cuarzo-feldespatos, fragmentos de roca en una matriz de apariencia fluidal; la ignimbrita está indistintamente intercalada en horizontes delgados y presentan flujos en diferente dirección, que no siguen un patrón determinado. Debido a su composición muy alta en el contenido de sílice, son de menor viscosidad y forman afloramientos muy restringidos.

Asociados a la unidad anterior se tienen afloramientos de riolita los cuales también presentan una textura de apariencia fluidal que se consideran la expresión superficial de domos riolíticos endógenos y que tienen una estructura de flujo vertical y hacia los bordes tienden a la horizontal. Estas rocas están formadas por cristales y fragmentos de roca inmersos en una matriz afanítica de cuarzo-feldespatos ligeramente fluidal, generalmente con oxidación-silicificación y vetillas de cuarzo-hematita.

### **Toba riolítica**

A principios del Mioceno se origina un evento volcánico-sedimentario, constituido por toba riolítica hacia la base e intercalaciones de lentes de arenisca mal clasificadas y micro conglomeráticas. Esta unidad forma parte de una secuencia depositada en cuencas cerradas limitadas por fallas normales formadas durante el período distensivo del Cenozoico medio.

### **Conglomerado Polimíctico**

Roca sedimentaria clástica continental compuesta por fragmentos subredondeados a redondeados de tobas riolíticas, riolitas, ignimbritas, vitrificados, basaltos, calizas recristalizadas, pedernal, lutitas y cuarzo, incluidos en una matriz limo-arcillosa y cementados por sílice. Se presentan semiconsolidados, mal clasificados y con ligera oxidación. Sus fragmentos varían desde arenas, gravas hasta guijarros, de tamaño que varía de 5 mm hasta 64 cm. El depósito muestra graduación normal de los sedimentos,

de la base a la cima, de tamaño grueso a los más finos. En esta misma litología se incluye a los depósitos de fragmentos subangulosos a subredondeados de calizas, basaltos, riolitas, tobas riolíticas, Ignimbritas, vidrio y areniscas, que varían en tamaño desde arenas hasta gravas, en una matriz limo-arcillosa y en ocasiones arenosa; mal consolidados y clasificados y ligeramente cementados por carbonato de calcio; dispuestos caóticamente, cuyo espesor aproximado es de 200 m y superficialmente presenta una costra de caliche. Aflora en forma de terrazas aluviales, de relleno sedimentario de una cuenca en distensión. Su principal afloramiento se ubica en las cercanías de la comunidad Corrales. Por su posición estratigráfica, esta secuencia detrítica se considera de edad Mioceno-Plioceno.

## **CUATERNARIO**

### **Basalto**

El último evento volcánico sucedido en la región corresponde a un paquete de basalto, depositado en discordancia sobre todas las unidades preexistentes; conformando grandes mesetas. Es la roca volcánica más joven generada a partir de fisuras profundas, dispuesta en forma de coladas y filones. Su estructura es compacta, de textura afanítica, con frecuencia vesicular y en ocasiones formando bloques. Su principal afloramiento se ubica entre las comunidades Refugio de los Pozos y Corrales. Cubre a las riolitas y tobas ácidas del Oligoceno-Mioceno y es correlacionable con los eventos volcánicos de carácter básico ocurridos a finales del Cenozoico Superior o principios del Cuaternario, relacionados con la apertura del Golfo de California.

### **Aluvión**

Como resultado de la erosión y transporte de todas las unidades de roca preexistentes se depositan arenas, gravas y limos, los cuales se encuentran rellenando las cuencas de ríos y arroyos en el área. Es una unidad detrítica no consolidada constituida por depósitos recientes. Aflora ampliamente en la Colonia Menonita, ubicada al oriente del acuífero (Carta Geológico-Minera Corrales F13-B45, Esc. 1: 50,000, SGM, 2001 y Carta Geológico-Minera Milpillitas de la Sierra F13-B44, Esc. 1: 50,000, SGM, 2001).

## **4.2 Geología estructural**

El marco estructural es definido por los contactos tectónicos de los Terrenos Guerrero, Parral y Sierra Madre. Dichos límites se caracterizan por presentar sistemas complejos de plegamiento asociado a cabalgaduras en un régimen de deformación dúctil. Se interpreta que el evento ocurrió durante la Orogenia Laramide en donde el Terreno Guerrero cabalgó sobre los Terrenos Sierra Madre y Parral. Esta deformación, al interior del Terreno Sierra Madre, causó plegamiento formando anticlinales y sinclinales de

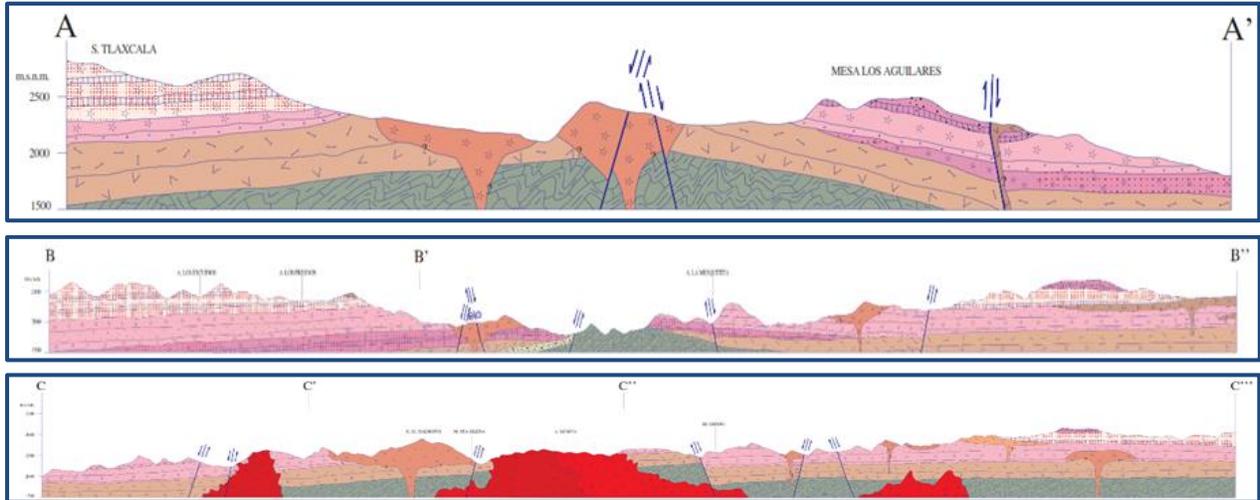
rumbo NW-SE. Posterior al evento laramídico se desarrolló un evento distensivo con componente lateral izquierda, que causó zonas de cizallamiento que sirvieron para la inyección de intrusiones multifásicas de granitoides hipoabisales y domos, así como la extrusión de rocas volcánicas félsicas.

El evento tectónico compresivo atribuido a la Orogenia Laramide, provocó un plegamiento intenso y cabalgaduras intraformacionales en la unidad de rocas sedimentarias de caliza-lutita, conformando pliegues con ejes orientados NE-SW a N-S y un fallamiento de bajo ángulo. Durante el Oligoceno-Mioceno se lleva a cabo el depósito de grandes paquetes de rocas volcánicas félsicas e intercalaciones hacia la base de rocas volcánicas intermedias y máficas, este evento volcánico se asocia con la fase final de la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Norteamericana. Posteriormente, estos eventos son sucedidos por una etapa distensiva, que ocasionó la formación de numerosas fallas normales, que originó bloques levantados y escalonados (horst y graben), en los que se depositaron algunas tobas riolíticas de matriz arenosa, hacia la base e intercalaciones de arenisca y conglomerado hacia la cima. Esta tectónica distensiva, provoca un adelgazamiento de la corteza, lo que ocasionó una fusión parcial y la producción de un basalto que llega a la superficie por el conducto de fallas normales activas, dando lugar a un volcanismo de tipo fisural y por consecuencia, la deposición de horizontes de basalto. Las fallas normales de rumbo NW-SE y otro sistema de dirección NE-SW, provocaron una serie de bloques escalonados que son cortados por sistemas menores de rumbo N-S y otro ligeramente NE-SW que lo desplazan. (Carta Geológico-Minera Fresnillo F13-3. Escala 1:250,000. SGM, 1998 y Carta Geológico-Minera Milpillas de la Sierra F13-B44, Esc. 1: 50,000, SGM, 2001).

### **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 de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que predominan riolitas e ignimbritas y menor proporción tobas ácidas y basaltos, así como areniscas, que en conjunto tiene un espesor de hasta 400 m, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

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



Fuente: Carta Geológico-Minera. "Milpillas de la Sierra". F13-B44, Esc. 1: 50,000 (SGM, 2001)

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, ocasionados por el fallamiento escalonado en forma de horts y grabens, provocado por la tectónica distensiva que ocurrió durante el Oligoceno. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica y en menor proporción basáltica que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

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

## **5.2 Parámetros hidráulicos**

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2007, se ejecutaron 2 pruebas de bombeo, de corta duración tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se obtuvieron valores de transmisividad que varían entre  **$2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$**  y  **$4.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Tomando en cuenta un espesor saturado promedio de 50 m, los valores de conductividad hidráulica varían entre  **$4.6 \times 10^{-7}$**  y  **$9.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$**  (**0.04** a **8.2 m/d**).

Adicionalmente, por correlación hidrogeológica con el acuífero vecino Valparaíso que tiene el mismo origen y constitución geológica, se pueden adoptar los valores obtenidos de la interpretación de 5 pruebas de bombeo de  **$0.06 \times 10^{-3}$**  a  **$1.95 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ; si consideramos un espesor saturado promedio de 100 m, los valores de conductividad hidráulica varían de  **$0.6 \times 10^{-6}$**  a  **$19.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$**  (**0.05** a **1.68 m/d**); así como los caudales específicos de 19 aforos de **0.01** a **1.08 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 depósitos aluviales que constituyen el subsuelo de la región, se adoptó un valor de rendimiento específico promedio de **0.1**.

## **5.3 Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2007 así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2004-2017, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial. Debido a que la profundidad a los niveles del agua subterránea no muestra cambios importantes en su posición en los últimos años, únicamente se describe la piezometría más reciente.

## **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 varían, de manera general, de 10 a 45 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro del valle donde se localizan las colonias menonitas hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan. Los niveles estáticos someros, de

10 a 20 m, se registran en la zona central del valle, en la zona lacustre ubicada al oeste del Ejido El Niño Artillero; en tanto que los más profundos, de 40 a 45 m, se presentan hacia las zonas topográficamente más altas que rodean el valle (figura 4).

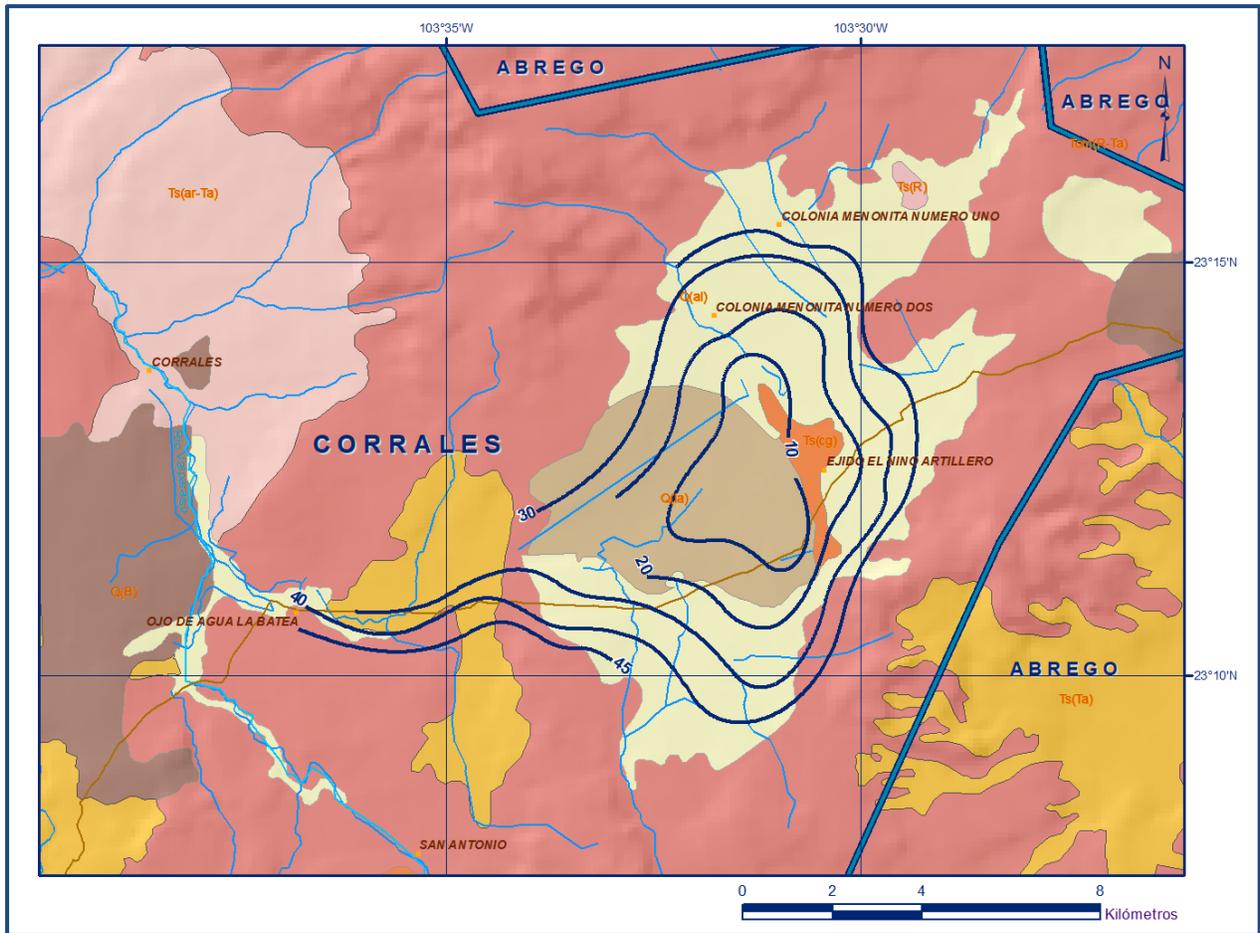


Figura 4. Profundidad del nivel estático en m (2017)

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en el año 2017 registró valores que varían de 2,400 a 2,430 msnm. Las menores elevaciones de 2,400 a 2,405 msnm se registran en la porción central del valle del acuífero donde se localiza la principal zona de explotación, y las mayores elevaciones de 2,430 msnm se presentan en las porciones altas que rodean el valle, desde donde descienden gradualmente por efecto topográfico hacia el centro de él, mostrando de esta manera una red de flujo concéntrica hacia la zona lagunar. La dirección preferencial del flujo subterráneo es este-oeste, con alimentaciones provenientes de los flancos norte y sur, para después dirigirse hacia la cañada que conduce al río Valparaíso (figura 5).

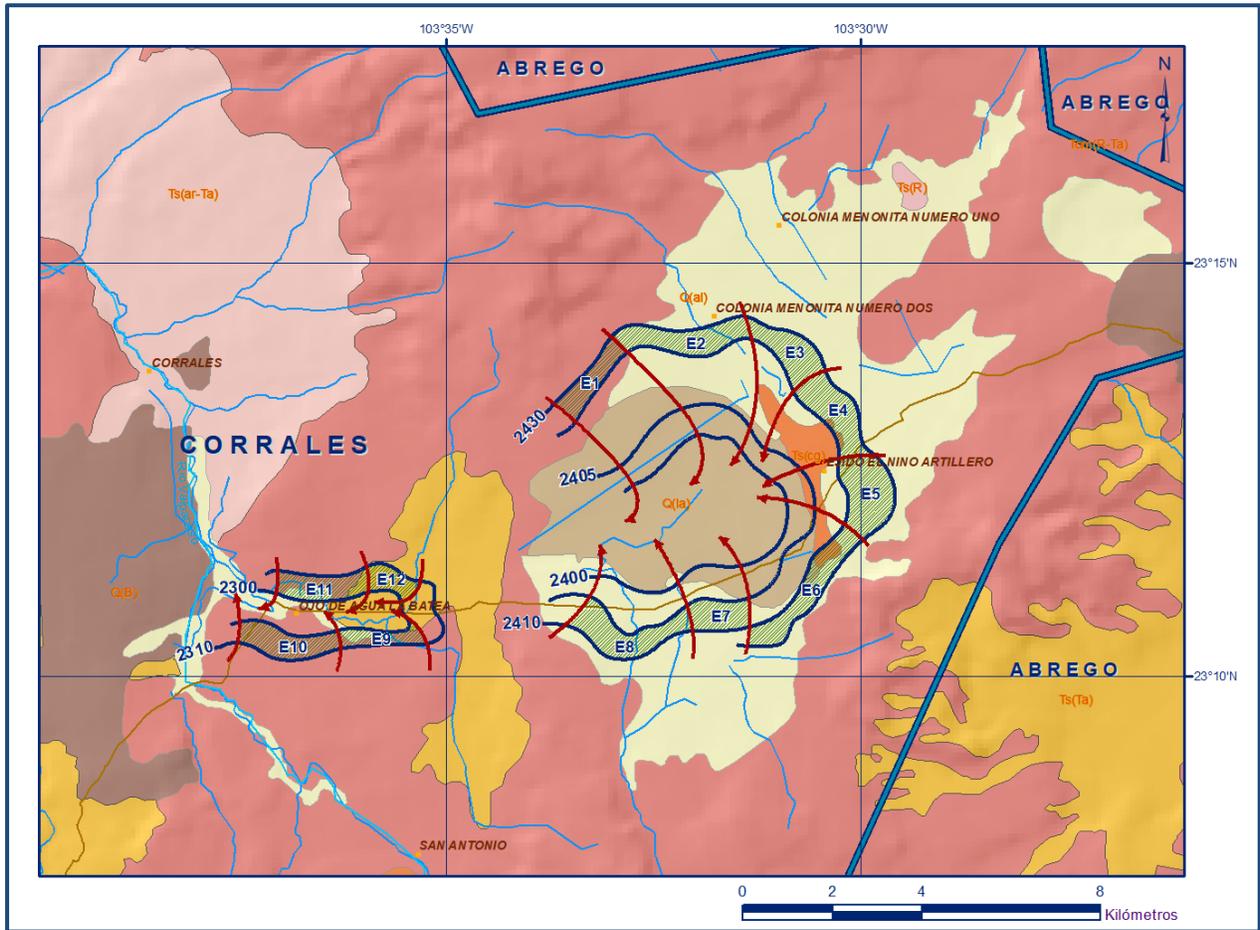


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2017)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2004-2017 registra valores pequeños de recuperación que varían de 0.5 a 1.0 m, que representan 0.03 a 0.07 m anuales, en la zona de explotación ubicada entre los poblados Ojo de Agua La Batea, al oeste, Ejido El Niño Artillero, al oeste y las Colonias Menonitas Número Uno y Dos, ubicadas al norte. En la mayor parte de la zona de explotación no se registraron cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

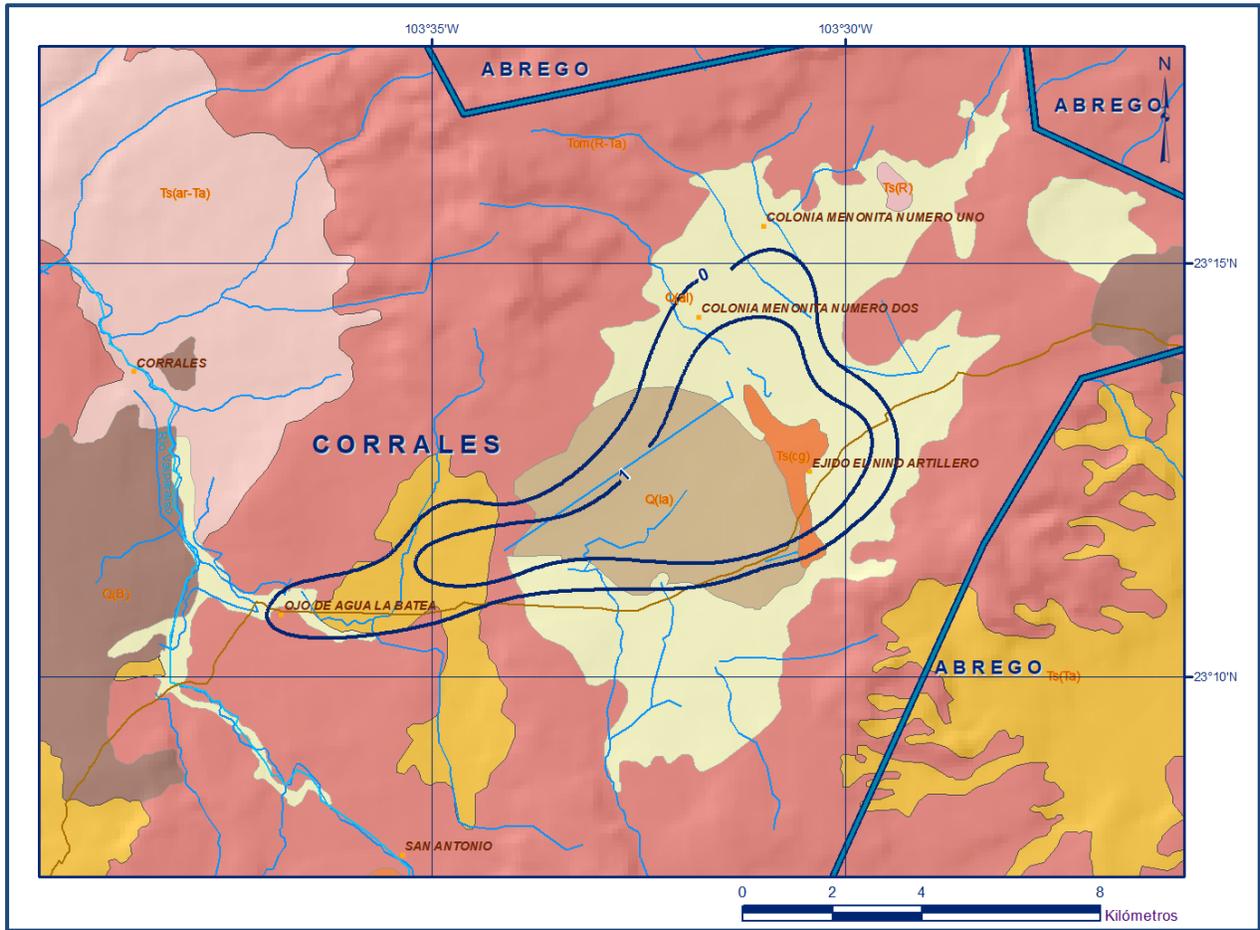


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2004-2017)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron muestras de agua en 28 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, así como iones principales.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) varían de 143 a 551 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica son inferiores a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y presentan valores

extremos de 68 a 748  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran en la porción oriental del acuífero.

Las temperaturas registradas varían de 11.2 a 27.7 °C en tanto que el pH medido fluctúa entre 6.0 a 7.8; cuatro pozos ubicados en la porción este presentan valores de pH por debajo del límite mínimo permisible de la norma, asociados a las zonas de recarga. De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que el tipo o familia de agua que predomina es la bicarbonatada sódico-potásica, ya que se presentó en 22 de las 28 muestras, que representa agua de reciente infiltración, que ha circulado y almacenado en las rocas volcánicas, como ignimbritas, tobas y riolitas, que constituyen las zonas de recarga ubicadas en las sierras que delimitan 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 mayoría de las muestras de agua se clasifican como  $\text{C}_2\text{S}_1$  (23 muestras) que representa agua de salinidad media 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 como parte del estudio realizado en el año 2007 y complementada con información del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA, 2018), se tienen registrados un total de 303 aprovechamientos de aguas subterráneas, de estos 84 son pozos, 147 norias y 72 pequeños manantiales; del total de obras, 299 están activas y 4 inactivas. De las obras activas, 18 se destinan al uso agrícola, 40 son para uso público-urbano, 159 tienen uso múltiple, 9 para uso pecuario y 1 para uso doméstico. De los 72 manantiales identificados, 67 son para uso público-urbano, 3 para agrícolas, 1 para uso pecuario y 1 para uso múltiple.

El volumen de extracción calculado es de **3.6  $\text{hm}^3$  anuales**, de los cuales 2.4  $\text{hm}^3$  (66.7%) se destinan al uso agrícola, 0.8  $\text{hm}^3$  (22.2 %) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y el restante 0.4  $\text{hm}^3$  (11.1 %) para usos múltiple, pecuario y doméstico.

Adicionalmente, a través de los **72 manantiales** identificados se descarga un caudal conjunto estimado de 12.7 lps, que equivalen a **0.4  $\text{hm}^3$  anuales**, la mayor parte destinados al uso público-urbano.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2004-2017, en una superficie de **78.8 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la superficie del valle donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

### **7.1 Entradas**

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que los volúmenes de extracción para usos agrícola y público-urbano son pequeños, para fines del balance de agua subterránea se considera que no existe recarga incidental, por lo que  $R_i = 0$ .

#### **7.1.1 Recarga vertical (Rv)**

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ), así como las

entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

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

Donde:

- R<sub>v</sub>** = Recarga vertical
- E<sub>h</sub>** = Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B** = Bombeo
- D<sub>m</sub>** = Descarga de manantiales
- D<sub>fb</sub>** = Descarga por flujo base de ríos
- ΔV(S)** = Cambio de almacenamiento

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

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E<sub>h</sub>)

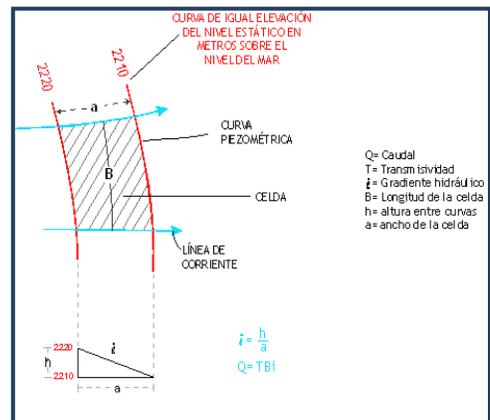
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas y poros de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona 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 **6.5 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	1800	400	20	0.050	0.0002	0.0180	0.6
E2	2800	620	20	0.032	0.0003	0.0271	0.9
E3	1750	800	20	0.025	0.0005	0.0219	0.7
E4	2100	800	20	0.025	0.0005	0.0263	0.8
E5	1800	1000	20	0.020	0.0005	0.0180	0.6
E6	3300	550	20	0.036	0.0003	0.0360	1.1
E7	1280	720	5	0.007	0.0005	0.0044	0.1
E8	2950	700	5	0.007	0.0008	0.0169	0.5
E9	1700	400	10	0.025	0.0003	0.0128	0.4
E10	2200	650	10	0.015	0.0003	0.0102	0.3
E11	1900	600	10	0.017	0.0003	0.0095	0.3
E12	1100	500	10	0.020	0.0003	0.0066	0.2
<b>TOTAL</b>							<b>6.5</b>

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

## 7.2 Salidas

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

### 7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor calculado de la extracción por bombeo es de **3.6 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 7.2.2 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 74 pequeños manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 12.7 lps, que representan un volumen de **0.4 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 7.2.3 Salidas por flujo base (Dfb)

De acuerdo con los registros promedio de aforos realizados en la estación hidrométrica “El Platanito” para el periodo 2011-2017, localizada en la parte baja de la cuenca sobre el río San Juan Capistrano, durante la temporada de estiaje, el caudal base es de 0.32 m<sup>3</sup>/s, que representan un volumen medio anual de 10.1 hm<sup>3</sup> anuales, para toda la cuenca del río San Juan, cuyos límites sobrepasan el acuífero Corrales. Como el área de captación en la que se encuentra el área de balance representa aproximadamente el 28.5% del área total de la cuenca, se estima que el caudal base aportado por esta zona al río San Juan es de 2.9 hm<sup>3</sup>/año. Por lo tanto, **Dfb = 2.9 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2004-2017 (figura 5). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.1, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

**ΔVS** = Cambio de almacenamiento en el período analizado

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

**A** = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)

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

El cambio en el volumen de agua almacenado para el intervalo 2004–2017 fue de 5.1 hm<sup>3</sup>, es decir, 0.4 m<sup>3</sup> anuales, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2004-2017)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	ΔV(S) (hm <sup>3</sup> /año)
0 a 1	0.5	54.7	0.1	2.7
1	1	24.1	0.1	2.4
	<b>TOTAL</b>	<b>78.8</b>	<b>TOTAL</b>	<b>5.1</b>
	<b>Promedio anual</b>			<b>0.4</b>

### Solución de la ecuación de balance

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

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

$$R_v = 3.6 + 0.4 + 2.9 + 0.4 - 6.5$$

$$R_v = 0.8$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.8 + 6.5$$

$$R = 7.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

**DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

**R** = Recarga total media anual

**DNC** = Descarga natural comprometida

**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterránea

### 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 **7.3 hm<sup>3</sup> 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 3.3 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 2.9 hm<sup>3</sup> corresponden al flujo base del río San Juan y 0.4 a las descargas a través de manantiales. Por lo tanto, **DNC = 3.3 hm<sup>3</sup> 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 (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 **1'991,256 m<sup>3</sup> 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 7.3 - 3.3 - 1.991256 \\ \text{DMA} &= 2.008744 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **2'008,744 m<sup>3</sup>** para otorgar nuevas concesiones.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

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

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2019. Piezometría histórica e hidrometría del acuífero Corrales, Zacatecas.

Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera Fresnillo F13-3. Escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2001. Carta Geológico-Minera Milpillas de la Sierra F13-B44, Escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2001. Carta Geológico-Minera Corrales F13-B45, Escala 1:50,000.