



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL SALVADOR (3219), ESTADO
DE ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1. Provincia fisiográfica	5
3.2. Clima.....	6
3.3. Hidrografía	7
3.4. Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA	9
4.1. Estratigrafía.....	10
4.2. Geología estructural	16
4.3. Geología del subsuelo	17
5. HIDROGEOLOGÍA.....	18
5.1. Tipo de acuífero	18
5.2. Parámetros hidráulicos	19
5.3. Piezometría.....	19
5.4. Comportamiento hidráulico	20
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2. Elevación del nivel estático	21
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	21
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	24
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	24
7.1. Entradas	25
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	25
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	26
7.2. Salidas.....	27
7.2.1. Bombeo (B).....	27
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	27
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	28
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	29
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

Antecedentes

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

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

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

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

1.1. Localización

El acuífero El Salvador, definido con la clave 3219 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción nororiental del estado de Zacatecas, en el límite con los estados de Coahuila y San Luis Potosí, entre los paralelos 24°06'13" y 24°35'57" de latitud norte y entre los meridianos 100°44'33" y 101°10'24" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,254 km².

Limita al oeste con el acuífero Guadalupe Garzarón, perteneciente al estado de Zacatecas; al norte con Saltillo Sur, que pertenece al estado de Coahuila; al noreste con El Peñuelo-San José del Palmar, del estado de Nuevo León; al sur con Santo Domingo; y al sur y sureste con Vanegas-Catorce, ambos del estado de San Luis Potosí (figura 1).

Geopolíticamente, el área que cubre el acuífero abarca la totalidad del municipio El Salvador y parcialmente la región oriental del municipio Concepción del Oro.

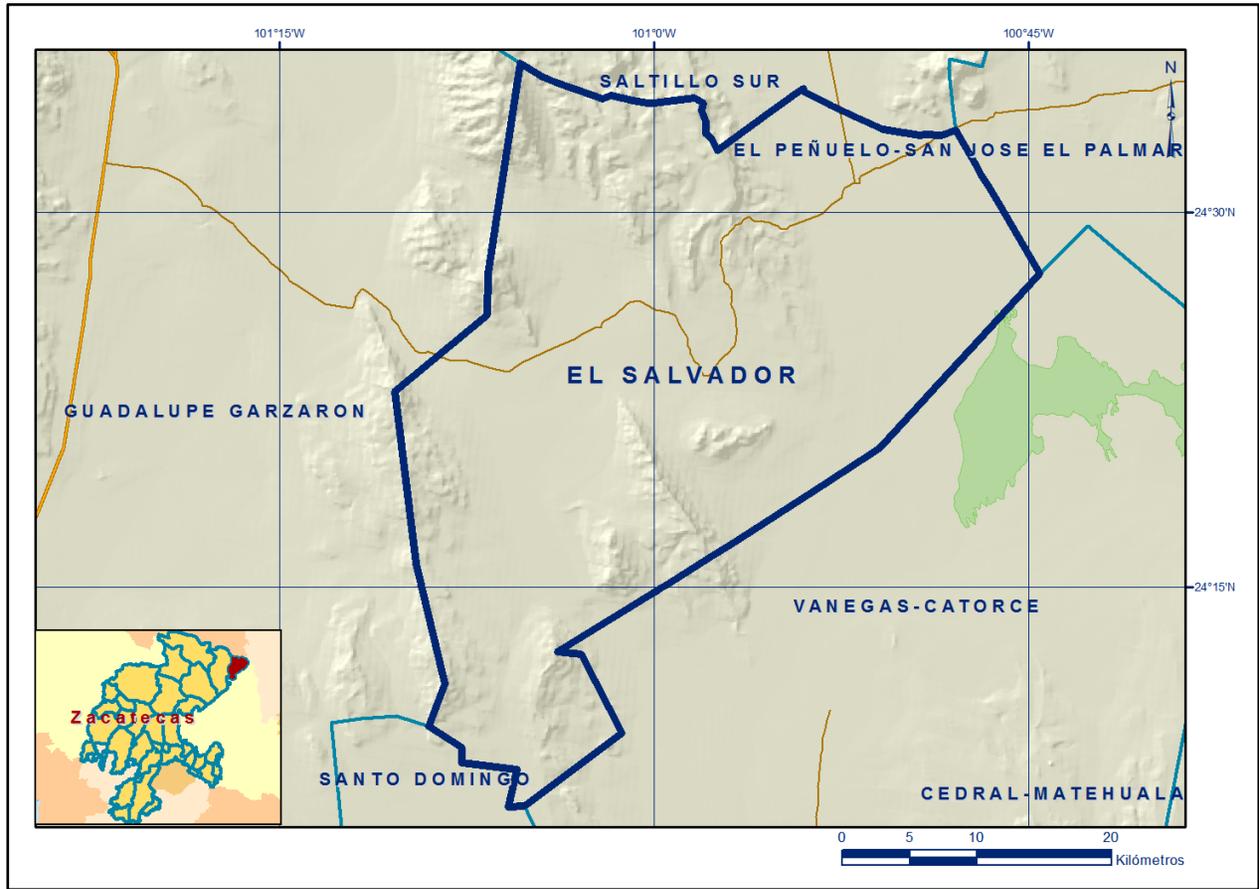


Figura 1. Localización del acuífero

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

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

ACUIFERO 3219 EL SALVADOR

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	8	22.3	24	11	7.8	
2	101	9	32.3	24	15	55.5	
3	101	10	22.7	24	22	49.4	
4	101	6	42.1	24	25	53.2	
5	101	6	38.7	24	27	33.0	
6	101	5	21.3	24	35	58.6	DEL 6 AL 7 POR EL LIMITE ESTATAL
7	100	47	55.0	24	33	17.5	DEL 7 AL 8 POR EL LIMITE ESTATAL
8	100	44	32.5	24	27	33.2	DEL 8 AL 9 POR EL LIMITE ESTATAL
9	101	5	10.8	24	6	13.0	DEL 9 AL 10 POR EL LIMITE ESTATAL
10	101	9	2.1	24	9	25.9	
1	101	8	22.3	24	11	7.8	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa u Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte”, al Consejo de Cuenca Altiplano, instalado el 23 de noviembre de 1999, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas, así como en el resto de los Municipios del Estado de Zacatecas y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en los municipios señalados”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 05 de agosto de 1988. Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal es el agrícola. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). Al sur del acuífero, en el límite con el estado de San Luis Potosí, se localiza una porción de la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “Sierra La Mojonera” con fecha de decreto del 13 de agosto de 1981.

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:

PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Estudios Geológicos y Obras Civiles, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1980. Entre sus actividades principales destacan el censo de aprovechamientos, piezometría, toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos y el muestreo de roca para análisis petrográfico y paleontológico. Realiza un análisis de la región para identificar las zonas de recarga al acuífero e identifica zonas con buenas posibilidades para la explotación del agua subterránea.

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA Y EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN LAS ZONAS MARGINADAS DEL ESTADO DE ZACATECAS, realizado en 1990 por EXYCO S.A., para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus actividades más importantes destacaron los sondeos geofísicos, piezometría, censo de

aprovechamientos y toma de muestra de agua subterránea para análisis físico-químicos. Se registró la existencia de 107 obras que aprovechaban el agua subterránea, 40 activas y 67 inactivas; se midieron niveles freáticos en algunas zonas y se identificaron zonas de descarga tanto por flujo vertical como horizontal. En cuanto a la salinidad, la concentración promedio en el agua subterránea fue de 2000 ppm de STD. De acuerdo a la interpretación hidrogeoquímica, de los resultados de los análisis físico-químicos, se concluyó que los pozos someros y norias extraen agua de reciente infiltración. Se identificaron y cartografiaron 19 unidades litológicas; que se agruparon en 7 unidades hidrogeológicas.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS VILLA GARCÍA, EL SALVADOR, GUADALUPE GARZARÓN, CAMACHO Y EL CARDITO, ESTADO DE ZACATECAS Y EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS GARCÍA DE LA CADENA, PINO SUÁREZ Y CORRALES, ZAC. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica, S. C., 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 El Salvador, para establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, determinar la recarga media anual del agua subterránea y las componentes de balance de agua subterránea.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO EL SALVADOR, 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 último 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 en la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, la cual se caracteriza por un conjunto de sierras con orientación NW-SE y E-W, que presentan una flexión al N-S, constituidas por rocas sedimentarias, principalmente calcáreas, producto del levantamiento y deformación de rocas

principalmente mesozoicas. Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), la zona que corresponde al área del acuífero comprende dos subprovincias fisiográficas: Sierras Transversas y Sierras y Llanuras Occidentales.

La Sierra Madre Oriental representa una franja alargada orientada en sentido noroeste-sureste, desde Chihuahua-Coahuila hasta el Istmo de Tehuantepec, que presenta una flexión con orientación este-oeste entre Torreón y Monterrey; está integrada principalmente por sedimentos calcáreos del Cretácico y Jurásico que se encuentran plegados, formando valles estructurales (Manuel Álvarez Jr.) en los sinclinales y serranías en los anticlinales cuando las formaciones son resistentes a la erosión, pero cuando estos últimos dejan al descubierto un núcleo constituido por rocas menos resistentes, entonces se forman valles en su centro. Debido a la intensidad de los plegamientos, la topografía es sumamente accidentada, ofreciendo perfiles típicamente aserrados.

La subprovincia Sierras Transversales está integrada por sierras perpendiculares a los cuerpos centrales de la Sierra Madre Oriental, separadas unas de otras por llanuras más o menos amplias. En la parte central varios pequeños pliegues paralelos descienden desde la subprovincia Pliegues Saltillo-Parras, hasta el distrito minero Concepción del Oro, Zacatecas. Su característica más notable es la complejidad litológica que presenta, manifestada por afloramientos de rocas sedimentarias, principalmente calcáreas, metamórficas e ígneas intrusivas y extrusivas. La subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales se caracteriza por presentar sierras orientadas en sentido norte-sur, compuestas por secuencias de rocas calcáreas, enlazadas entre sí por conjuntos de cerros que siguen ese mismo sentido o que son oblicuos.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en el área que comprende al acuífero se presenta el grupo de climas secos (B), en dos variantes BSok(x') y BS1k(x'); árido templado el primero y semiárido templado el segundo, ambos con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, temperatura del mes más cálido menor de 22°C; régimen de lluvias en verano el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual. El clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (1), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), que es una característica

establecida considerando las temperaturas medias anuales del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: El Salvador, Concepción del Oro, San Tiburcio, La Ventura, El Peñuelo y El Salado. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1960-2017 y el más corto 1982-2017, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **366.1mm** y **16.9°C** respectivamente. En lo que respecta a la evaporación potencial, solo 4 estaciones tienen información, con estos registros se determinó un valor de evaporación media anual de **1905.7 mm anuales**.

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, de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan a la región. Se presenta heladas en un rango de 20 a 60 días por año y granizadas de 0 a 2 días anuales.

3.3. Hidrografía

El área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en su totalidad dentro de la Región Hidrológica³⁷ "El Salado", Subregión Hidrológica "El Salado", cuenca "Matehuala", el acuífero ocupa también pequeñas porciones de la cuenca "Sierra de Rodríguez". La Región Hidrológica El Salado se caracteriza por estar constituida por una serie de cuencas cerradas de muy diferentes dimensiones y en su mayor extensión carece de corrientes superficiales permanentes; está comprendida entre los meridianos 99°29' y 102°57' de longitud oeste y los paralelos 21°47' y 25°23' de latitud norte. Su área es de 94,243 km²; limita al norte con la Región Hidrológica 24c, al noreste con la Región Hidrológica 25, al este y sureste con la Región Hidrológica 26, al suroeste con la Región Hidrológica 12 y al oeste y noroeste con la Región Hidrológica 36; es una de las vertientes interiores más importantes del país; se localiza en la altiplanicie septentrional y la mayor parte de su territorio se sitúa a la altura del Trópico de Cáncer, que lo atraviesa. Todo este conjunto hidrográfico está constituido por una serie de cuencas cerradas de muy diferentes dimensiones; debido a que la lámina media anual de precipitación es baja, los arroyos son escasos y de tipo intermitente, cuyos escurrimientos desaparecen hacia el centro de los valles en los que el material aluvial alcanza los máximos espesores.

La región se caracteriza por tener una serie de llanuras desérticas, en general con escurrimiento superficial de muy corta longitud, ya que se infiltra en las rocas calizas que conforman las sierras y en los piedemonte. El drenaje es predominantemente de tipo enrejado en las zonas que presentan plegamientos, que se transforma a subparalelo y subdendrítico conforme se desciende por el pie de monte y llega a los valles. En las llanuras los escurrimientos desaparecen por evaporación o se infiltran lentamente, originando la presencia de suelos salinos. Localmente, en el área de la cuenca donde se ubica el acuífero, existen algunas corrientes como son los arroyos El Astillero, Las Víboras, Matehuapil y El Puerto, los cuales se originan en las sierras y desaparecen al descender a la llanura.

Existe poca infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial, está representada por las presas: Progreso Agua Dulce, ubicada en la porción noroeste, en la comunidad del mismo nombre, su capacidad de almacenamiento es de 0.43 hm³; Las Huertas, localizada en la porción occidental del área, en la comunidad del mismo nombre, tienen una capacidad de almacenamiento de 0.5 hm³; Coyotillos, se ubica en la porción suroeste del acuífero, aprovecha las aguas del arroyo El Órgano y su capacidad de almacenamiento es de 0.5 hm³.

3.4. Geomorfología

El área del acuífero se caracteriza por la presencia de los siguientes sistemas de topofomas: Bajadas, es el sistema que predomina en el área, ocurre en las porciones suroeste y centro del acuífero, en las que se localizan las comunidades de Tanque del Alto y Tanque Nuevo; Sierras, que se extienden en una franja orientada en sentido noroeste-sureste así como hacia la región sur del acuífero; Llanuras aluviales, de piso rocoso o cementado, en zonas paralelas a las bajadas típicas que se localizan en las porciones este (localidad El Salvador) y oeste del acuífero. Por último, los Valles se encuentran solo en una pequeña porción ubicada al oeste del acuífero.

El área del acuífero se caracteriza por la presencia de un grupo de sierras alargadas, orientadas en sentido NW-SE, en las que la intensa erosión ha contribuido al modelado del relieve caracterizado por cimas redondeadas con pendientes suaves. En las partes bajas de las sierras se han acumulado depósitos de pie de monte, así como abanicos y extensas llanuras aluviales. La morfología que se presenta en la cuenca es producto de patrones geológico estructurales resultantes de la tectónica compresiva y distensiva que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica, de aquí que la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de las principales corrientes de la cuenca se deben a grandes estructuras geológicas (fallas y fracturas) que siguen los escurrimientos a través de las zonas de debilidad. En la región se presentan elevaciones topográficas

que varían de 1,700 msnm, en la llanura aluvial, porción oriente de la zona; a elevaciones de 3,080 msnm, que corresponde a la porción noroccidental de la región, en la sierra El Astillero; que representa un desnivel de 1380 m en una distancia relativamente corta. La región se encuentra surcada por arroyos intermitentes que forman un sistema de drenaje de tipo subparalelo. Morfológicamente la región se encuentra en una etapa de madurez avanzada

4. GEOLOGÍA

La geología general que aflora en la zona que comprende el acuífero está constituida por un gran paquete de material aluvial, rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y volcánicas cuya distribución geográfica se muestra en la figura 2. Regionalmente, la base de la columna estratigráfica está constituida por filitas y limolitas de la Formación Taray del Triásico Medio-Superior, que aflora en la porción sur de la Sierra de Candelaria; hacia la cima subyace discordantemente a la Formación Nazas del Triásico Superior-Jurásico Inferior, la cual aflora hacia la porción oeste del acuífero, dentro de las Sierras de San Julián, Guadalupe, Candelaria y Rodríguez, su cima se encuentra en contacto discordante con un conglomerado perteneciente a la Formación La Joya. Hacia la porción noreste, en la región de Galeana, N.L., afloran areniscas y limolitas de la Formación Huizachal del Triásico Superior-Jurásico Inferior. El Jurásico Medio está representado por conglomerado y arenisca de la Formación La Joya, que subyace discordantemente a la Formación Zuloaga; aflora en la Sierra de San Julián. En el Jurásico Superior se depositaron las calizas de la Formación Zuloaga, (Oxfordiano-Kimmeridgiano), que subyacen concordantemente a la Formación La Caja y que afloran en la mayor parte de la zona. En las inmediaciones de Galeana, N.L., aflora una secuencia de yesos, calizas dolomíticas y anhidritas correspondientes a la Formación Olvido del Oxfordiano-Kimmeridgiano. Se encuentran en contacto discordante con la Formación Huizachal y hacia su cima yace concordantemente con la Formación La Casita, la cual cambia lateralmente de facies con la Formación Zuloaga.

Limolitas y calizas de la Formación La Caja del Tithoniano afloran al noreste de la zona y cambian lateralmente de facies, hacia los sedimentos pelítico-arenosos de la Formación La Casita. Sedimentos calcáreo-arcillosos de la Formación Taraises del Berriasiano al Hauteriviano, afloran en gran parte de la zona. Subyace concordantemente a la Formación Cupido; cambia lateralmente de facies en el Berriasiano con lutitas y areniscas de la Formación Carbonera. Del Hauteriviano Tardío al Aptiano Temprano se depositaron calizas de la Formación Cupido, que aflora por toda la zona; subyace concordantemente a calizas y lutitas de la Formación La Peña del Aptiano, ésta a su vez subyace transicional y concordantemente a calizas arrecifales de la Formación Aurora, la cual es correlacionable con la Formación Cuesta

del Cura del Albiano-Cenomaniano (calizas-lutitas), hacia su cima se encuentra en contacto con la Formación Indidura del Cretácico Superior y en la región de Galeana, N.L. con la Formación Agua Nueva. Durante el Cenomaniano Tardío al Turoniano se depositaron sedimentos arcillo calcáreos de la Formación Indidura (posiblemente su rango sea hasta el Santoniano), los cuales cambian gradualmente a sedimentos calcáreo-arcillosos de la Formación Agua Nueva.

En el Coniaciano-Santoniano se depositan sedimentos areno-arcillosos de la Formación Caracol, hacia la porción noreste de la zona mediante cambio lateral de facies la Formación Caracol cambia a lutitas y calizas de la Formación San Felipe. El Cenozoico Inferior está representado por un conglomerado polimíctico con areniscas de la Formación Ahuichila del Eoceno. Lo sobreyace una brecha de composición riolítica del Oligoceno. Durante el Mioceno tiene lugar una etapa de vulcanismo que origina el campo volcánico Los Encinos, compuesto por basaltos y andesitas basálticas. Durante el Neógeno se acumularon conglomerados polimícticos mal consolidados; hacia los valles se depositaron materiales coluviales y aluviales y en donde las condiciones lo permitieron, depósitos lacustres y travertinos.

En la porción occidental afloran cuerpos intrusivos de composición granodiorita con variación a diorita y a cuarzodiorita, que en la región central son de composición monzonítica. En el Cerro Pedregoso y la Sierra de Saltillito el intrusivo es de composición sienítica, aunque este cuerpo es de edad maastrichtiana. Los cuerpos hipabisales del Oligoceno son de composición riolítica. (Carta Geológico-Minera G14-10 "Concepción del Oro", Esc. 1:250,000, SGM, 2000).

4.1. Estratigrafía

La columna estratigráfica de la región en la que se localiza el acuífero presenta rocas sedimentarias e ígneas extrusivas e intrusivas, cuya edad comprende del Triásico al Reciente. Aunque no afloran todas las unidades de la estratigrafía regional, a continuación, se describe cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

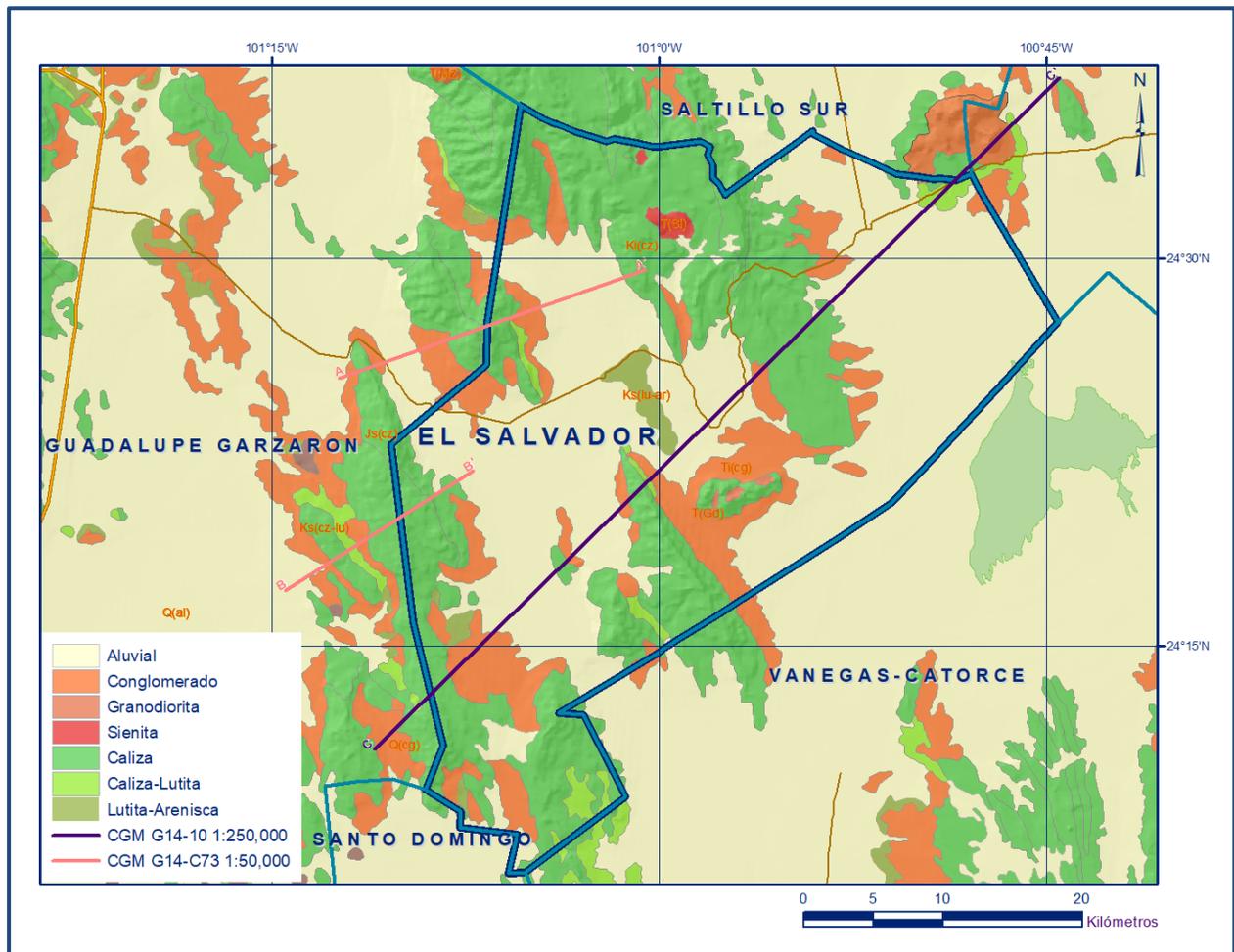


Figura 2. Geología general del acuífero

TRIÁSICO

Formación Taray

Aflora principalmente en la Sierra de Teyra, formando un conjunto de rocas bandeadas, constituidas de grauvacas y filitas, con interestratos de novaculita, que cubren a la Formación Rodeo. La parte inferior de esta formación está constituida por filitas de color café claro y la parte superior por novaculitas, interestratificadas con dolomitas y grauvacas.

JURÁSICO

Formación Nazas

También conocida como Formación Huizachal, aflora en la Sierra de San Julián, de Teyra y en el Cerro de Europa. Constituye una serie vulcanosedimentaria conformada por lavas interestratificadas con tobas, lutitas, areniscas y conglomerados que en el área del acuífero está representada por una secuencia sedimentaria dominada por limolitas y un conglomerado polimíctico de coloración rojiza con clastos de rocas andesíticas y riolíticas. Aflora ampliamente en las porciones centro y occidente del

acuífero, en el extremo sur de la sierra Los Rodríguez. Su contacto inferior no se observa en el área del acuífero, mientras que su contacto superior es discordante con las rocas de la Formación Zuloaga.

Formación La Joya

Aflora en la Sierra Madre Oriental, en el subsuelo se encuentra distribuida en la Planicie Costera del Golfo. En su localidad tipo tiene más de 1,200 m de espesor que consisten de conglomerados, areniscas, areniscas conglomeráticas, lutitas y limolitas de color rojo, ocasionalmente de color verde, de origen continental. En la región en la que se ubica el acuífero está representada por un conglomerado constituido principalmente por fragmentos derivados de la Formación Nazas, a la cual sobreyace discordantemente y subyace, también en discordancia, a las calizas con nerineas de la Formación Zuloaga.

Formación Zuloaga

Está representada por una caliza resistente a la erosión que forma los núcleos de los anticlinales en la que se distinguen dos unidades bien definidas: la parte inferior que contiene capas de caliza, cuyo color varía de gris claro a ligeramente oscuro, presenta una coloración rojiza o amarillenta al intemperismo, contiene también algunas capas de limolita calcárea débilmente consolidada. La parte superior está constituida por caliza masiva de color gris, que se caracteriza por presentar estilolitas de gran amplitud y algunos horizontes donde se presentan pequeños nódulos de pedernal de color negro. Aflora en las sierras plegadas El Astillero y Rodríguez, ubicadas en la porción suroeste y oriental del acuífero. Sobreyace discordantemente a la Formación Nazas y está cubierta en forma concordante por la Formación La Caja, su espesor aproximado es del orden de 500 m.

Formación La Caja

Consiste en capas delgadas de calizas margosas con pedernal, fosforitas, alternando con limolitas y areniscas bituminosas, que se hacen progresivamente más finas hacia la cima. Aflora en la mayoría de las sierras plegadas, generalmente en los núcleos anticlinales en forma de estrechas bandas paralelas que limitan a la Formación Zuloaga. Debido a que es poco resistente a los agentes erosivos, frecuentemente se caracteriza porque en ella se desarrollan puertos y valles, que se alargan paralelamente al rumbo de las capas. A menudo se encuentra enmascarada por una pequeña cobertura aluvial, su espesor es del orden de 100 m. Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Zuloaga y Taraises, respectivamente.

CRETÁCICO

Formación Taraises

Está constituida de caliza con cantidades menores de limolita, que descansan sobre sedimentos arcillosos de la Formación La Caja. En las partes altas de las montañas plegadas que forma, las capas de caliza son de espesor mediano a grueso, densas y de color gris claro a oscuro. La limolita que contiene se presenta intercalada en proporciones variables. La Formación Taraises es un depósito que se llevó a cabo en aguas relativamente profundas, alcanza un espesor aproximado de 150 m. Aflora en forma de franjas delgadas de poco espesor en las sierras plegadas ubicadas principalmente en la porción sur del acuífero, cuyos contactos, inferior y superior son concordantes con las formaciones La Caja y Cupido respectivamente.

Formación Cupido

Representada por rocas muy resistentes y homogéneas constituidas principalmente por calizas de estratificación mediana a gruesa de coloración gris claro, que presentan concreciones de pirita, lentes y nódulos de pedernal color gris y estilolitas; en algunas localidades con intercalaciones de limolitas calcáreas y en menor proporción lutitas. Sus mejores afloramientos se localizan en el Cañón Mimbres de la porción media de la Sierra de Parras, en Coahuila. Dentro del área del acuífero aflora principalmente en las sierras plegadas de la porción sur, en donde sus contactos estratigráficos con la unidad inferior, Formación Taraises, y superior, Formación La Peña y la Formación Cuesta del Cura, son concordantes. Su espesor medio es de 300 m.

Formación La Peña

Se describe como un grupo de estratos calcáreo arcillosos, cuya base comienza como una secuencia de calizas de estratificación delgada de color gris claro y continúa en la parte media con calizas que presentan cantidades variables de arcilla deleznable, de color amarillento y gris, con abundante pirita en las calizas y lentes pequeños de sílice blanca. En la cima se observa una alternancia entre caliza arcillosa, con caliza micrítica con bandas y lentes de pedernal negro y estratificación ondulada. Por su naturaleza arcillosa, es fácilmente erosionable y constituye un horizonte índice ya que su identificación resulta sencilla al formar depresiones entre las calizas más resistentes de la Formación Cupido. Sus afloramientos en el área del acuífero representan franjas de espesor reducido, asociadas a la Formación Cupido, a la cual sobreyace concordantemente. A su vez, es cubierta concordantemente por la Formación Cuesta del Cura. Su espesor promedio es de 60 m.

Formación Cuesta del Cura

Está constituida por una caliza laminar de color gris claro a oscuro con estratificación ondulada y numerosos lentes y nódulos de pedernal negro. Sus principales afloramientos se localizan en la porción centro del acuífero, y al noroeste en la sierra El Astillero, en los flancos de los anticlinales, sobreyaciendo concordantemente a la Formación La Peña, y subyaciendo también concordantemente a la Formación Indidura. Presenta un espesor promedio de 80 m, aunque puede alcanzar hasta 250 m.

Formación Indidura

Se localiza aflorando en la sierra Rodríguez y en las cercanías de las localidades El Salvador y Tanque Nuevo, descansando sobre la Formación Cuesta del Cura y cubierta por la Formación Caracol. Generalmente aflora en las laderas de las sierras; consiste principalmente de dos series diferentes que están formadas en la parte inferior, de caliza arcillosa dispuesta en capas delgadas y lajeadas, con numerosas capas medianas o gruesas de caliza laminar color gris oscuro y de limolita calcárea que es de color amarillento. La parte superior está formada de una lutita gris muy homogénea, fácilmente erosionable, que, en la parte más alta, casi en contacto con la Formación Caracol, presenta un cambio de facies a una lutita arenosa. El espesor total promedio de la formación es de 200 m.

Formación Caracol

Aflora localmente en las laderas de las sierras El Astillero y Rodríguez. Está constituida por capas de lutitas, con intercalaciones de arenisca en forma alternante. La lutita es moderadamente calcárea y suave, de color oscuro localmente con ligero contenido de arena, mientras que la arenisca está bien consolidada y es resistente; está dispuesta en capas delgadas y gruesas que tienen colores gris pardo y verdoso. El espesor de esta unidad puede alcanzar hasta 900 m en el valle de Mazapil (ubicado en el acuífero cercano Cedros), cubriendo concordante y transicionalmente a la Formación Indidura, mientras que es cubierta por rocas volcánicas y sedimentarias cenozoicas. Los afloramientos más importantes de esta unidad dentro del área del acuífero, se presentan en la porción centro-occidental, principalmente en las inmediaciones de los poblados San Martín y San Sebastián. Es cabalgada por la Formación Zuloaga del Jurásico.

CENOZOICO

Rocas ígneas intrusivas

Las rocas ígneas del Cenozoico son de naturaleza plutónica e hipabisal, formando stocks de dimensiones moderadamente grandes. En la porción noroccidental, en la sierra El Astillero, y en la región norte, afloran cuerpos intrusivos de composición monzonítica; en esta última región son de dimensiones menores y están asociados a mineralización en la región de Matehuapil. En las cercanías de las localidades El Salvador y Tanque Nuevo el intrusivo es de composición sienítica y son más antiguos, de edad maastrichtiana.

Formación Ahuichila

Definida por Rogers (1961) en los afloramientos expuestos en el “Frontón de Ahuichila”, ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas. Fue descrita originalmente como una serie predominantemente detrítica de conglomerado polimíctico de color rojizo, compacto con textura clástica, constituido por fragmentos de 0.10 a 0.40 m de calizas, esquistos, granitos, riolitas, arenisca, lutita, caliza lacustre y andesitas, en una matriz arenosa, con intercalaciones de tobas y areniscas. Dentro del área del acuífero El Salvador, esta unidad se encuentra aflorando en las partes bajas de la Sierra Rodríguez y en las cercanías del poblado El Salvador. Regionalmente su espesor es muy variable, en el área del acuífero su espesor promedio estimado es de 250 m. De manera local, se correlaciona con la Grava Peribañez (Córdoba D.A., 1965), constituida por fragmentos calcáreos sin clasificar, subangulosos y del tamaño que varía de 10 a 15 cm de diámetro, inmersos en una matriz arcillosa, escasamente cementados con carbonato de calcio; que aflora formando lomeríos de poca elevación al este de El Cardito, en el Cañón La Manga y al noroeste de la comunidad Puerto del Rosario.

Conglomerado Polimíctico del Neógeno

Estos depósitos conglomeráticos se depositaron durante el periodo Mioceno-Plioceno en un ambiente continental, al pie de los terrenos recién emergidos. Se cree que, durante la acumulación de este potente depósito, la región septentrional del área se comportaba tectónicamente inestable, debido a la dinámica de un sistema de fallas de desplazamiento lateral que actuaba en dicho sector, ocasionando la acumulación de un prisma relativamente potente de clásticos conglomeráticos. Está constituido por gravas no consolidadas hasta semi-consolidadas ampliamente distribuidas en el área del acuífero, con un espesor estimado de hasta de 130 m. La edad asignada a esta unidad es del Mioceno al Plioceno.

CUATERNARIO

Aluvión

Los materiales que constituyen esta unidad se encuentran rellenando las depresiones, generalmente sinclinales, como llanuras de piedemonte y llanuras aluviales que forman los rellenos de cuencas cerradas, denominadas bolsones. En general los aluviones se presentan como una mezcla de materiales de granulometría fina a gruesa, con una disposición heterogénea, en la cual superficialmente están sueltos y con una consolidación moderada a profundidad. Dentro de la unidad de aluviones también se incluyen algunos conglomerados y depósitos muy locales de travertinos, relacionados con la existencia de manantiales. Su espesor en algunos sitios alcanza 100 m, aunque localmente se presentan también pequeños depósitos de terrazas aluviales con espesores de 10 a 20 m.

Sedimentos Lacustres

Los valles y llanuras que constituyen las partes topográficamente más bajas de la zona están constituidos por sedimentos lacustres, que en el caso de lagunas efímeras se asocian a sales evaporíticas.

4.2. Geología estructural

A nivel regional, las estructuras más importantes fueron generadas por los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide, mientras que las etapas de fallamiento distensivo ocurrieron durante el Cenozoico. Se observan dos direcciones en las estructuras principales: NW-SE y NE-SW. La forma arqueada de los pliegues se generó durante la Orogenia Laramide cuando las rocas del Mesozoico se deslizaron hacia el nororiente sobre las evaporitas y lutitas del Mesozoico Inferior, que fueron plegadas y cabalgadas contra y sobre las Islas de Coahuila y San Carlos, produciendo así la vergencia general de las estructuras hacia el norte y nororiente. Se identifican tres fajas: la faja de sierras y valles, la faja de sierras y llanuras y la faja mineral; las cuales representan una sucesión progresiva de la deformación asociada en parte al fallamiento, enmarcado dentro del terreno tectonoestratigráfico Sierra Madre (Carta Geológico-Minera Concepción del Oro G14-10, escala 1:250,000. SGM, 2000).

La mayor parte de zona se encuentra ubicada en la Subprovincia Sierras Transversales, perteneciente a la Sierra Madre Oriental, que se caracteriza por presentar montañas plegadas, falladas y en ocasiones afectadas por macizos intrusivos y por rocas volcánicas. La deformación que ocasionó esta subprovincia fue causada por el evento compresivo de la Orogenia Laramide. A nivel regional, a partir del oeste, se pueden distinguir tres grupos de sierras, separadas por amplias llanuras denominadas Bolsones, formados al rellenarse de sedimentos antiguas depresiones originadas por

fallas tectónicas o por erosión. Estas sierras y llanuras son las siguientes: Sierra de Guadalupe Garzarón, Bolsón San Carlos o Laguna Jazminal, Zona de Sierras Transversales, Bolsón Cedros, Zona de la Sierra de Teyra y Bolsón San Simón. Las sierras presentan características estructurales diferentes: La Sierra de Guadalupe Garzarón, localizada al occidente del acuífero, es una sierra plegada con orientación NW-SE que está intrusionada por un macizo de tipo monzonítico. La porción occidental de esta sierra está cortada por una falla cuya orientación es la misma que la de la sierra.

Las Sierras del Carpintero, La Caja, Santa Rosa y Santa Rita, cuyas características estructurales, pertenecen a anticlinales de orientación E-W, separados por pequeñas llanuras, que corresponden a sinclinales rellenos de sedimentos. Las sierras La Caja y de Santa Rosa han sido afectadas por numerosas fallas paralelas al rumbo de las capas, intrusionadas por cuerpos de composición granodiorítica y coronadas por derrames volcánicos. Este conjunto de sierras transversales, está limitado al oriente y al poniente por el Bolsón San Carlos y el Bolsón Cedros, respectivamente. Hacia el poniente se presenta el Cerro Europa y las Sierras de San Julián, Teyra, Gruñidora, Candelaria y Tanquecillos. La porción norte de este conjunto de sierras presenta condiciones estructurales bien definidas ya que se trata de un homoclinal con orientación NW-SE, que descansa directamente sobre rocas del basamento; mientras que, en la porción sur, las sierras Gruñidora, Candelaria y Tanquecillos, tienen una estructura geológica complicada, pues los estratos cambian frecuentemente de posición, en respuesta a los plegamientos y al fracturamiento. Todo este conjunto está limitado hacia el oriente por el Bolsón San Simón. En general, se considera que los tres conjuntos de sierras mencionadas están limitados por fallas, que sólo son evidentes por los cambios morfológicos bruscos y por la posición estructural de las capas que presentan discontinuidades.

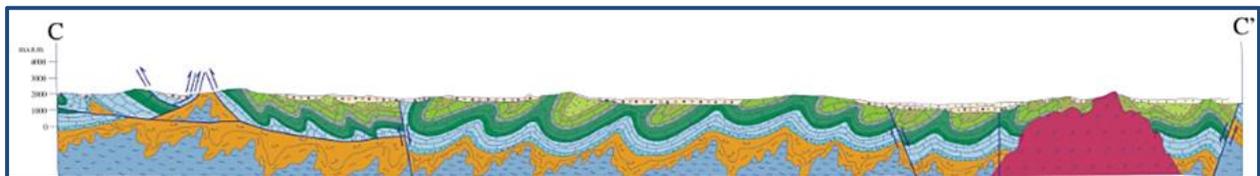
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, se puede afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares y los conglomerados polimícticos que rellenan la llanura. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la zona. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, cuando presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

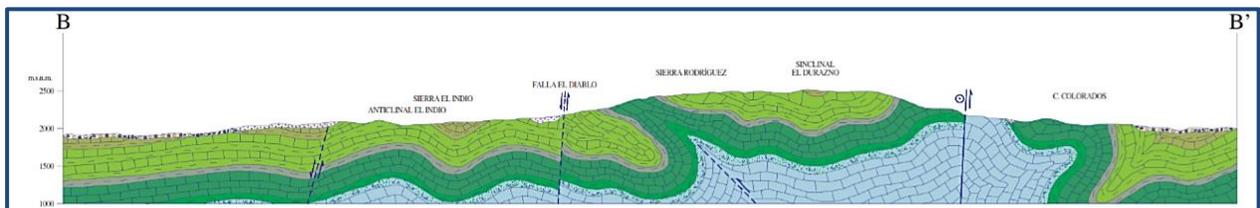
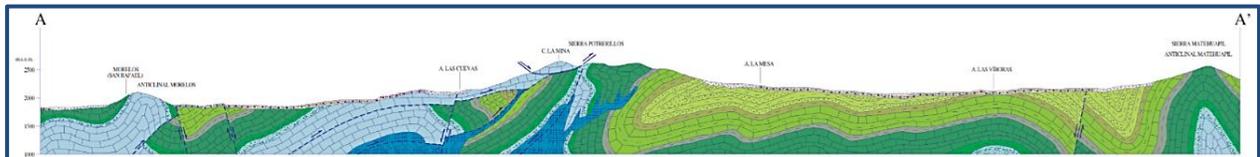
El predominio de sedimentos granulares y conglomerados polimícticos, de granulometría fina, le confieren muy baja permeabilidad al acuífero, dado que los

bajos caudales que aporta sólo son suficientes para el abastecimiento de las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento, así como por las ecuencia de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de calizas arcillosas y lutitas de las formaciones La Peña e Indidura.

Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas constituidas durante la Orogenia Laramide. Debajo de este paquete de rocas existe un acuífero alojado en rocas calizas que puede presentar condiciones de semiconfinamiento debido a la presencia de lutitas (figura 3). Sus fronteras al flujo subterráneo están constituidas principalmente por rocas arcillosas cretácicas y jurásicas, así como por rocas ígneas intrusivas.



Fuente: Carta Geológico-Minera Concepción del Oro G14-10, escala 1:250,000 (SGM, 2000)



Fuente: Carta Geológico-Minera El Durazno G14-C73 escala 1:50,000 (SGM, 2005)

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 variada y depósitos, así como conglomerados polimícticos,

cuyo espesor puede alcanzar algunos cientos metros en el centro de la llanura. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua en la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente areniscas y lutitas de la Formación Caracol, cuando presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado, que puede presentar condiciones de **semiconfinamiento**, debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2007, se ejecutó una prueba de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento (4 horas) como de recuperación (8 horas). El resultado de su interpretación, por métodos analíticos convencionales dio como valor promedio de conductividad hidráulica **$1.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (0.16 m/d)** y transmisividad de **$1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** , para un espesor saturado del acuífero de 100 m. Estos valores son representativos del acuífero alojado en los conglomerados.

Adicionalmente se recopiló información de 14 pruebas más, realizadas en el acuífero vecino Guadalupe Garzarón, que tiene el mismo origen y constitución geológica. Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales indican que los valores medios de transmisividad varían entre **$7.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$** y **$1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un valor promedio de **$4.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores de conductividad hidráulica varían de **1.2×10^{-9}** y **$6.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.0001 a 58.8 m/d)**, con un valor promedio de **$9.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (0.08 m/d)**, que se asocian a sedimentos de granulometría fina.

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. De acuerdo a la granulometría de los depósitos, para el balance de agua subterránea se adoptó un valor de rendimiento específico entre **0.01**.

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 de los estudios previos, así como la piezometría generada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2019, 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 2019 muestra que los valores varían, de manera general, de 2 a 90 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles. Las profundidades más someras, de 2 a 5 m, se presentan en dos zonas bien identificadas: la primera ubicada en las inmediaciones de Matehuapil, al norte del acuífero, y la otra en la región central, al sureste de El Salitre. Los valores más profundos, 60 a 90 m se presentan en la región oriental, al oeste del poblado General Gertrudis Sánchez, y en la porción centro occidental, entre Coyotillos y Las Huertas (figura 4).

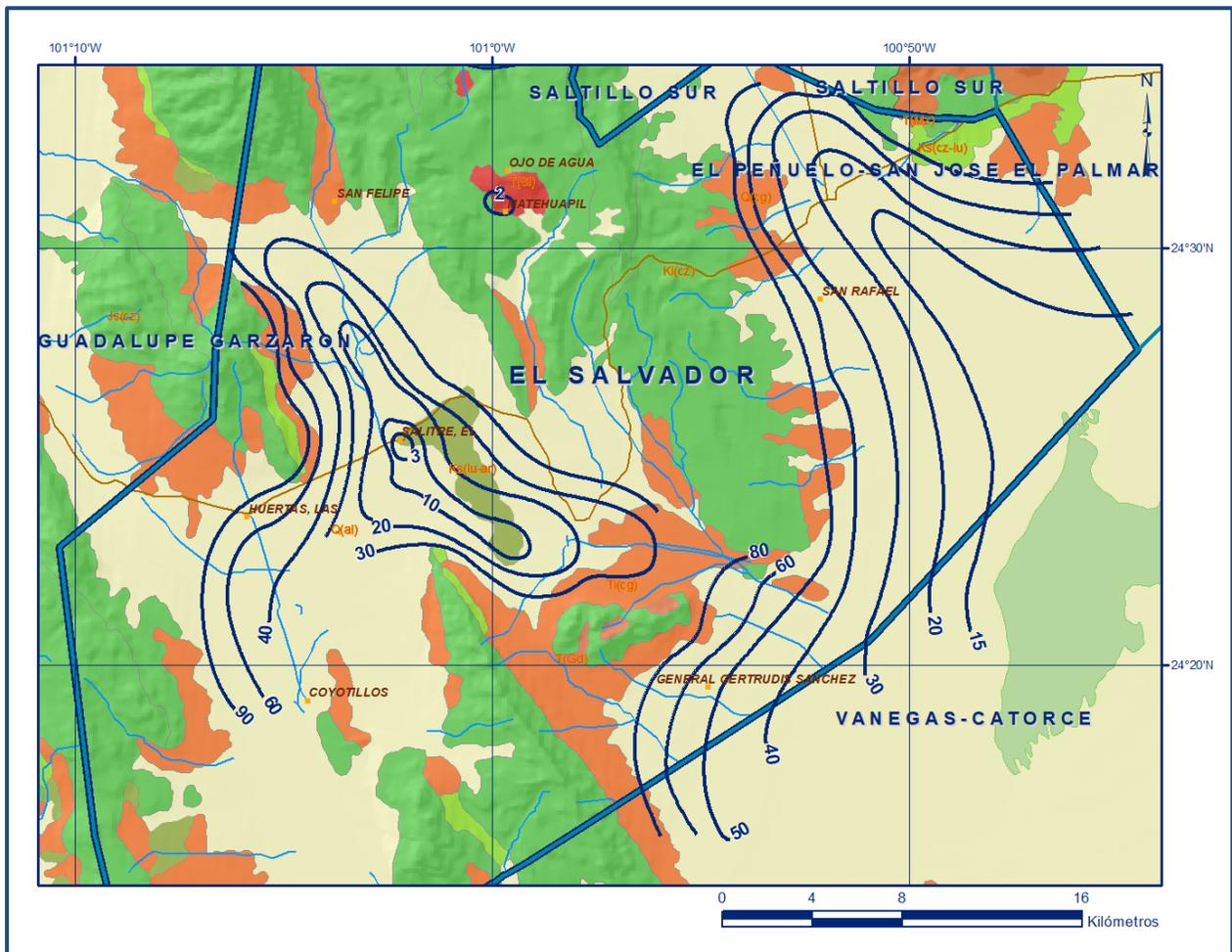


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2019 registró valores que variaron de 2,020 a 1,670 msnm. Las menores elevaciones, de 1,670 a 1,710 msnm, se registran en la región nororiental del acuífero, hacia el límite con el acuífero Vanegas-Catorce, entre los poblados General Gertrudis Sánchez, San Rafael y El Salvador; en tanto que las mayores, de 1,880 a 2,020 msnm se presentan en la región centro-occidente, hacia el límite con el acuífero Guadalupe Garzarón, entre los poblados Coyotillos, Las Huertas y El Salitre (figura 5). La dirección del flujo subterráneo presenta varias direcciones preferenciales, de acuerdo a la región de análisis. En la región nororiental y oriental es hacia el este, en dirección al acuífero Vanegas-Catorce del estado de San Luis Potosí, con alimentaciones provenientes del norte. En la región centro-occidental la dirección preferencial es norte-sur y oeste-este.

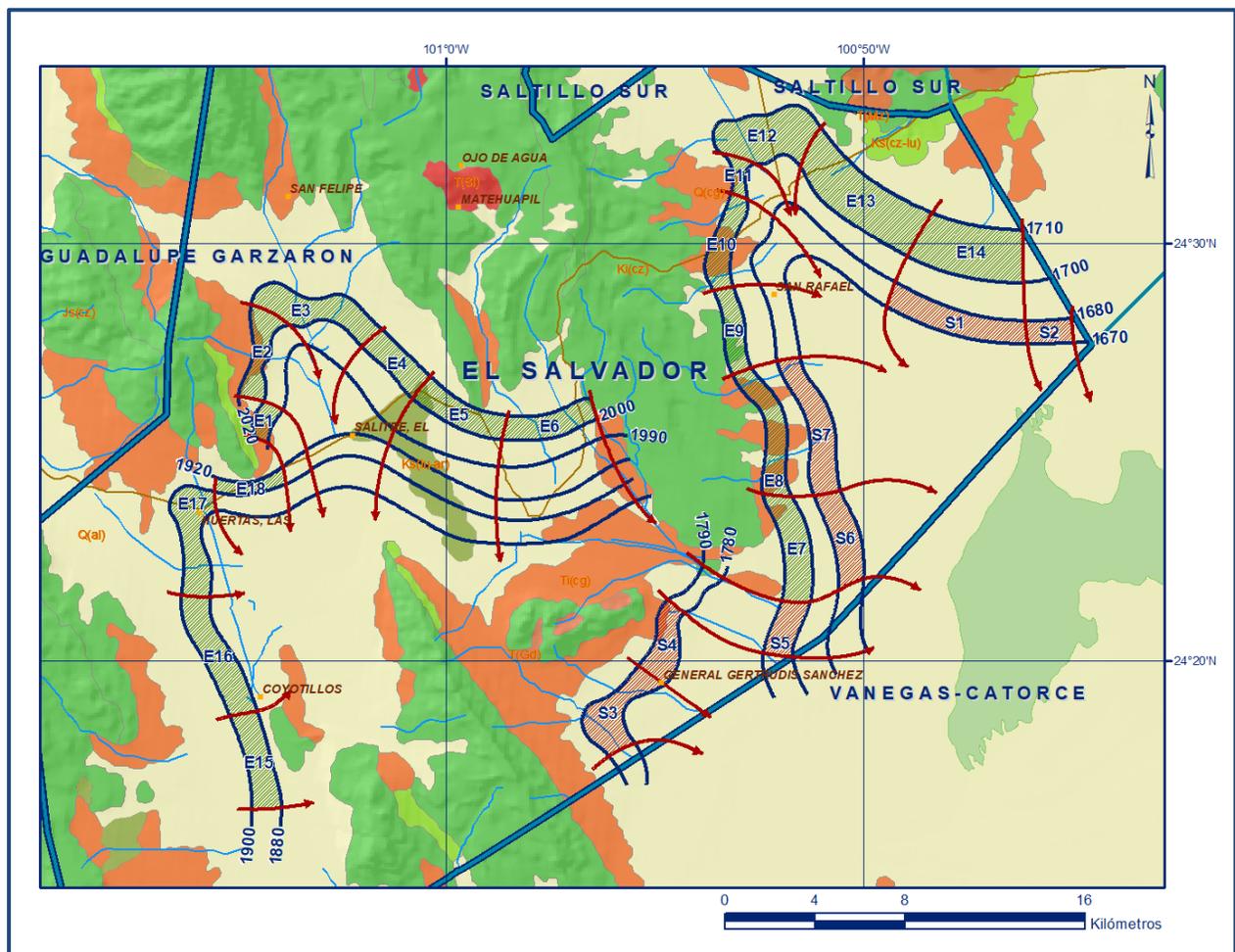


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 registró valores puntuales de abatimiento que varían de 1 a 2 m, 0.1 a 0.2 m anuales, con valores

locales de hasta 6 m (0.6 m/año), que se registraron en la zona ubicada en las inmediaciones de El Salvador, al sureste de El Salitre, en el área de General Gertrudis Sánchez. De manera general, en la mayor parte de la superficie de explotación del acuífero, no se registraron variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

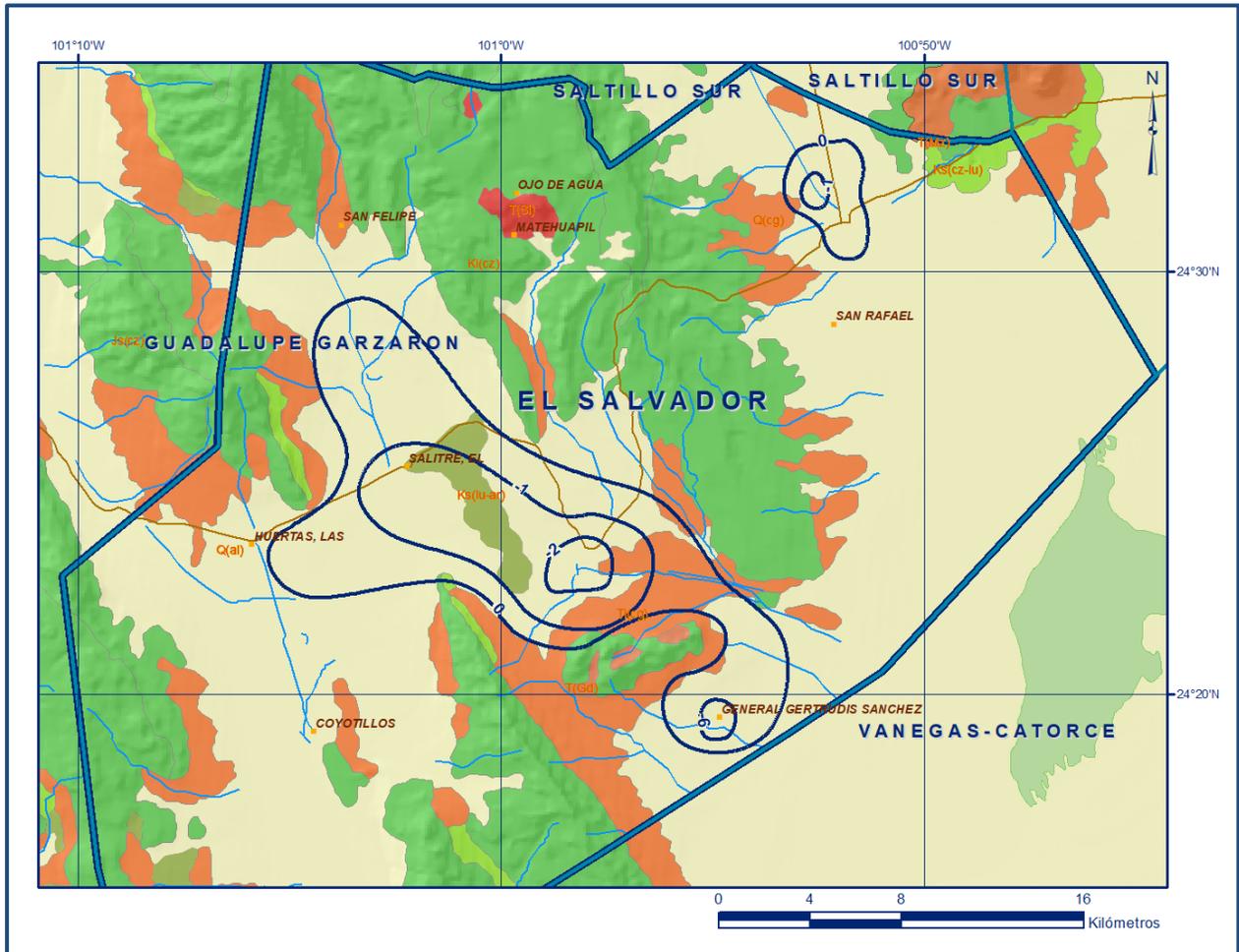


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2009-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2007, se tomaron 20 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, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio. Adicionalmente se tomaron 4 muestras de agua subterránea en el año 2018, como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 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.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores extremos de concentración de sólidos disueltos totales (SDT) varían de 332 a 2866 mg/l; del total de muestras obtenidas 13 presentan una concentración que supera 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. Otros parámetros cuyas concentraciones superan los LMP establecidos en la norma referida para consumo humano son coliformes fecales, hierro y arsénico. La concentración de coliformes fecales en una muestra es de 52 NMP/100ml, que supera el LMP no detectable. La concentración de hierro de una muestra supera el LMP de 0.3 mg/l con una concentración de 2.1 mg/l. Las concentraciones de arsénico de dos muestras rebasan el LMP para consumo humano de 0.025 mg/l, con concentraciones de 0.11 y 0.12 mg/l.

En cuanto a la conductividad eléctrica, de manera general, el agua se clasifica como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que se registraron valores inferiores y superiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; con valores extremos de 673 y 4770 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las temperaturas registradas varían de 16.2 a 30.7 °C y el pH varía de 7.0 a 8.2.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que la familia de agua que predomina es la Sulfatada Cálcida, que se asocia a materiales de origen químico sedimentario y que es muy común en acuíferos con sedimentos de origen evaporítico de ambiente lagunar.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), de las 20 muestras de agua obtenidas, 9 se clasificaron como C_3S_1 (alto contenido de sales y baja concentración de sodio intercambiable) que es poco apta para el uso agrícola ya que no puede usarse en suelos con drenaje deficiente; 4 se clasifican como C_4S_1 , que representa muy alto

contenido de sales y contenido medio a alto de sodio intercambiable (riesgo muy alto por salinidad y bajo por alcalinidad) que no es recomendable para el uso agrícola bajo condiciones ordinarias; 3 se clasifican como C_4S_2 (muy alto contenido de sales y contenido medio de sodio) para usarse en suelos permeables y con buen drenaje; 2 se clasifican como C_4S_3 (contenido muy alto de sales y alta concentración de sodio) que no son aptas para el uso agrícola; y 2 muestras más se clasifican como C_2S_1 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 2007 y complementada con datos actuales del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA, 2019), se registraron un total de 64 aprovechamientos de agua subterránea, de estos 46 son pozos, 16 norias y 2 manantiales; del total de obras, 55 están activas y 7 inactivas. De las obras activas, 9 se destinan al uso agrícola, 25 al uso público-urbano, 8 para uso pecuario y 13 tienen uso múltiple; se incluye en el censo la existencia de 2 manantiales que son aprovechados para uso público urbano.

El volumen de extracción asciende a **1.5 hm³ anuales**, de los cuales 1.0 hm³ (66.7 %) se destinan al uso agrícola, 0.2 hm³ (13.3 %) se utilizan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región y 0.3 hm³ (20.0 %) son utilizados para uso múltiple, el cual incluye el uso doméstico y pecuario. El volumen que se descarga a través de los 2 manantiales es muy pequeño, razón por la cual para fines del balance se considera despreciable.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2009-2019, en una superficie de **506 km²** que corresponde a la zona 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 quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento en el acuífero:

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

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

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

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv= Recarga vertical

Eh= Entradas horizontales por flujo subterráneo horizontal

B= Bombeo

Sh= Salidas horizontales por flujo subterráneo

ETR = Evapotranspiración

$\Delta V(S)$ =Cambio de almacenamiento

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

$$R_v = B + Sh + ETR - Eh \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

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 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 2019 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

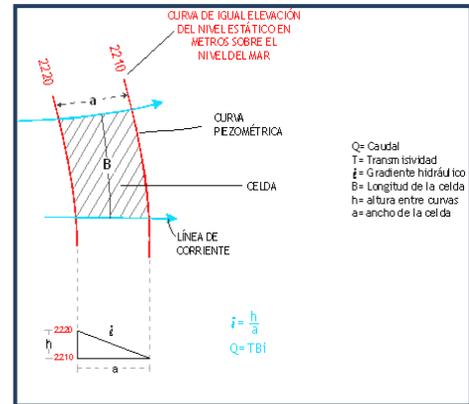
Donde:

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 **3.0 hm³ anuales**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo y de los obtenidos por correlación hidrogeológica en los acuíferos vecinos Guadalupe Garzarón, El Cardito y Cedros, adaptados al espesor saturado en cada zona.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1700	860	10	0.0116	0.00015	0.0030	0.1
E2	4000	1050	20	0.0190	0.00015	0.0114	0.4
E3	5300	1270	20	0.0157	0.00040	0.0334	1.1
E4	2950	1080	20	0.0185	0.00003	0.0016	0.1
E5	3900	1080	20	0.0185	0.00003	0.0022	0.1
E6	3850	1075	20	0.0186	0.00005	0.0036	0.1
E7	4870	1150	10	0.0087	0.00005	0.0021	0.1
E8	5950	1050	10	0.0095	0.00003	0.0017	0.1
E9	3770	1200	10	0.0083	0.00008	0.0025	0.1
E10	4360	1210	10	0.0083	0.00008	0.0029	0.1
E11	1780	480	10	0.0208	0.00003	0.0011	0.0
E12	4050	1950	10	0.0051	0.00020	0.0042	0.1
E13	6015	2050	10	0.0049	0.00008	0.0023	0.1
E14	4450	2300	10	0.0043	0.00008	0.0015	0.0
E15	4300	1050	20	0.0190	0.00005	0.0041	0.1
E16	5700	1280	20	0.0156	0.00005	0.0045	0.1
E17	5500	1050	20	0.0190	0.00005	0.0052	0.2
E18	3000	525	20	0.0381	0.00003	0.0034	0.1
TOTAL							3.0

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por flujo subterráneo (Sh), evapotranspiración (ETR) en pequeñas zonas donde se registran niveles freáticos someros y por bombeo (B).

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 **1.5 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2019, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal calculado es de **1.8 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	5860	1150	10	0.0087	0.00020	0.0102	0.3
S2	1870	1050	10	0.0095	0.00020	0.0036	0.1
S3	4550	1000	10	0.0100	0.00035	0.0159	0.5
S4	3400	1200	10	0.0083	0.00035	0.0099	0.3
S5	2450	1220	10	0.0082	0.00020	0.0040	0.1
S6	4130	1320	10	0.0076	0.00020	0.0063	0.2
S7	6300	1200	10	0.0083	0.00020	0.0105	0.3
TOTAL							1.8

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas, Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real. Existen zonas del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 5 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 16.9 °C y precipitación = 366.1 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 358.3 mm.

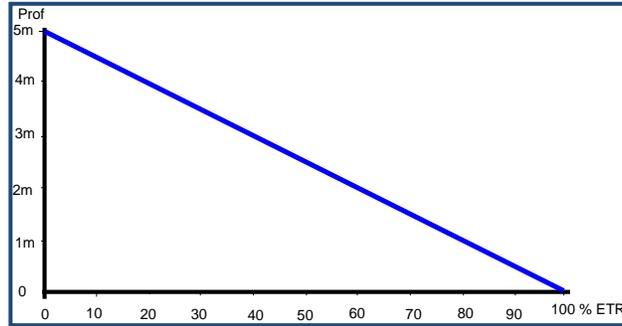
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) = 16.9
P(mm) = 366.1 P² = 134029.21
L = 963.84045 L² = 928988.413
ETR (mm)= 358.3

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

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



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 3. El volumen de evapotranspiración **ETR = 0.8 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración real (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
2	2	1.5	0.3583	0.6	0.3
3 a 4	3.5	4.2	0.3583	0.3	0.5
	TOTAL	5.7		TOTAL	0.8

7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2009-2019 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta valores de rendimiento específico de 0.01, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 1090 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 3, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -1.4 hm³, por lo que el promedio anual es de **-0.1 hm³** Por lo tanto **$\Delta V(S) = -0.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$** .

Tabla 3. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2009-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-6	-6	2.0	0.01	-0.1
-2	-2	5.2	0.01	-0.1
-1 a -2	-1.5	43.1	0.01	-0.6
-1.0	-1	1.2	0.01	0.0
0 a -1	-0.5	114.4	0.01	-0.6
	TOTAL	165.9	TOTAL	-1.4
	Promedio anual			-0.1

Solución de la ecuación de balance

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

$$R_v = B + Sh + ETR - Eh \pm \Delta V(S)$$

$$R_v = 1.5 + 1.8 + 0.8 - 3.0 - 0.1$$

$$R_v = 1.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + Eh$$

$$R = 1.0 + 3.0$$

$$R = 4.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas se aplica el procedimiento de la Norma 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:

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

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 subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **4.0 hm³ anuales**, de recarga natural.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso de este acuífero la descarga natural comprometida es **0.9 hm³ anuales**, que corresponden al 50% de las salidas subterráneas hacia el acuífero Vanegas-Catorce del estado de San Luis Potosí. El 50% restante se podrá aprovechar en el acuífero El Salvador; de esta manera se podrá favorecer el desarrollo en ambas zonas del límite entre estos acuíferos de esta región árida y pobre, en la que recarga se genera en el acuífero del estado de Zacatecas y se dirige hacia el estado de San Luis Potosí. Por lo tanto, **DNC = 0.9 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 extraídos 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 **2'337,742 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de 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 aguas subterráneas:

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 4.0 - 0.9 - 2.337742 \\ \text{DMA} &= 0.762258 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **762,258 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1990. Estudio de Prospección Geohidrológica y Exploración Geofísica en las Zonas Marginadas del estado de Zacatecas. Realizado por EXYCO S.A.

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

Comisión Nacional del Agua. 2008. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero El Salvador (3219), estado de Zacatecas

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2019. Piezometría histórica del acuífero El Salvador, Zacatecas.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológico-Minera G14-10 "Concepción del Oro". Escala 1:250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2004. Carta Geológico-Minera G14-C63 "Presa de San Pedro". Escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2004. Carta Geológico-Minera G14-C64 "El Salvador". Escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2005. Carta Geológico-Minera G14-C73 "El Durazno". Escala 1:50,000.