



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SAIN ALTO (3216), 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	5
3	FISIOGRAFÍA.....	7
3.1	Provincia fisiográfica.....	7
3.2	Clima.....	9
3.3	Hidrografía.....	9
3.4	Geomorfología.....	11
4	GEOLOGÍA.....	12
4.1	Estratigrafía.....	13
4.2	Geología estructural.....	19
4.3	Geología del subsuelo.....	20
5	HIDROGEOLOGÍA.....	21
5.1	Tipo de acuífero.....	21
5.2	Parámetros hidráulicos.....	22
5.3	Piezometría.....	22
5.4	Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	22
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	23
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	24
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	26
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	27
7.1	Entradas.....	27
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	28
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	28
7.1.3	Recarga incidental (Rr).....	29
7.2	Salidas.....	30
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	30
7.2.2	Descarga de Manantiales (Dm).....	30
7.2.3	Evapotranspiración (ETR).....	30
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	32
8	DISPONIBILIDAD	33
8.1	Recarga total media anual (R).....	33
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	33
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	34
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	34
9	BIBLIOGRAFÍA	35

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 Saín Alto, definido con la clave (3216) por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-occidental del estado de Zacatecas, entre los paralelos 23° 25' y 23° 49' de latitud norte y entre los meridianos 103°10' y 103° 35' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,043 km². Limita al norte con el acuífero El Palmar, al noroeste con Hidalgo; al este y sureste con Aguanaval, al sur con el acuífero Ábrego y al oeste con el acuífero Sabinas; todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas (figura 1).

Geopolíticamente, comprende parcialmente los municipios Sombrerete y Saín Alto, así como una pequeña porción de Fresnillo.

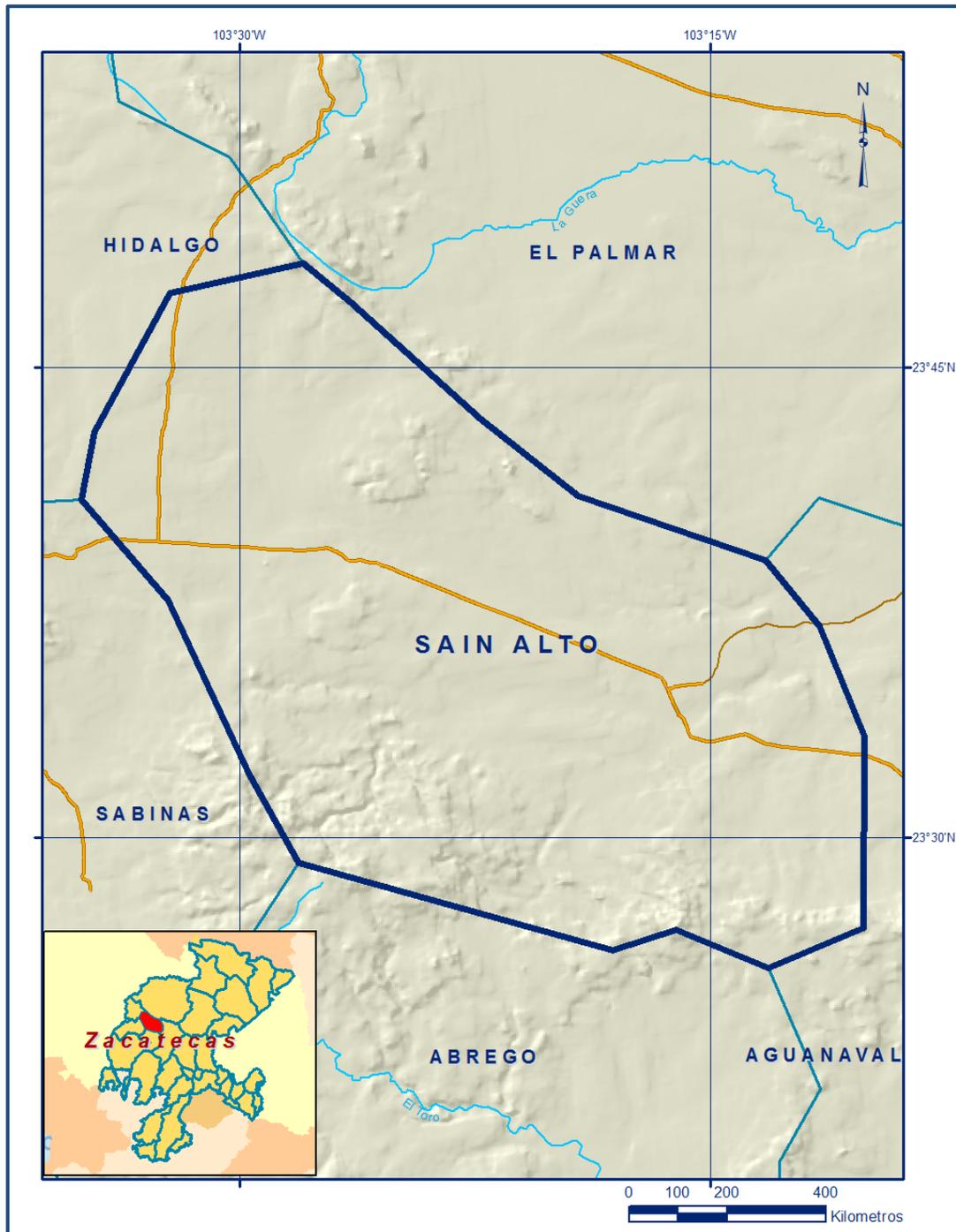


Figura 1. Localización del acuífero

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 3216 SAIN ALTO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	11	311	23	36	44.9
2	103	10	5.2	23	33	14.5
3	103	10	7.7	23	27	5.7
4	103	13	8.3	23	25	49.6
5	103	16	4.9	23	27	2.6
6	103	18	6.8	23	26	23.3
7	103	28	8.0	23	29	115
8	103	29	43.0	23	32	10
9	103	32	17.3	23	37	34.8
10	103	35	3.3	23	40	47.6
11	103	34	38.8	23	42	56.5
12	103	32	14.3	23	47	22.9
13	103	27	58.7	23	48	19.9
14	103	26	28.5	23	47	4.6
15	103	22	20.7	23	43	219
16	103	19	13.4	23	40	54.7
17	103	13	13.4	23	38	50.2
1	103	11	311	23	36	44.9

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Saín Alto pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte”, al Consejo de Cuenca “Nazas-Aguanaval”, instalado el 1º de diciembre de 1998, las porciones occidental y noroccidental se ubican en territorio del Consejo de Cuenca “Río Presidio al San Pedro”, instalado el 15 de junio de 2000; y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Zacatecas.

Su territorio completo se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda; el primero rige en casi la totalidad de la superficie del acuífero 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. 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.

El segundo decreto rige en una pequeña área de la porción sur y es 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 en el DOF el 6 de abril de 1981. Esta veda es tipo II, en la 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. En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego; ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios de exploración geológica y minera. Con respecto a estudios hidrogeológicos de evaluación, se han desarrollado varios, algunos a escala regional, a continuación se citan los más importantes:

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.

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA REGIÓN DE SAÍN ALTO, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA) en 1981 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Este estudio tuvo como objetivos definir las estructuras y unidades geohidrológicas del subsuelo con posibilidades de almacenar agua subterránea y localizar las áreas más favorables para la perforación de pozos exploratorios.

Entre sus actividades de campo destacan el censo de aprovechamientos, ejecución de exploraciones geofísicas, muestreo de agua subterránea, interpretación fotogeológica e hidrológica con verificación de campo y obtención de muestras de roca para análisis micropaleontológicos y radiométricos. Sus conclusiones más importantes permitieron identificar dos unidades acuíferas: una alojada en los materiales clásticos de los rellenos aluviales del Cuaternario y los conglomerados terciarios poco cementados; y otro de permeabilidad secundaria alojada en tobas riolíticas y las lutitas-areniscas de la Formación Caracol. El agua es de composición química cálcica-bicarbonatada, apropiada para todos los usos.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS ZONAS DE EL PALMAR Y SAÍN ALTO, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Consultores en Agua Subterránea, S.A. en el 2000 para la Secretaría de Fomento Agropecuario del Estado de Zacatecas. Mediante actividades de campo que incluyeron el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales, hidrometría de la extracción, realización de pruebas de bombeo y toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico.

Fue posible plantear el balance de aguas subterráneas y determinar la calidad del agua. Concluye que los valores promedio de conductividad hidráulica varían de 0.1 a 1.0 m/día, que la profundidad al nivel del agua subterránea variaba de 10 a 120 m, con abatimiento máximo de 2.5 m anuales en la zona de concentración de pozos y recuperaciones locales de 0.2 m anuales. Por su bajo contenido de sales el agua subterránea es apta para consumo humano, aunque en Saín Alto se detectaron concentraciones de flúor ligeramente más altas que el límite máximo permitido que estable la norma mexicana para el agua destinada al consumo humano.

ESTUDIO PARA LA REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS HIDALGO Y SABINAS. Realizado por GEOPSA, S.A. de C.V. en 2006 para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento del flujo subterráneo, profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea, a través de la obtención de información procedente de las redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua en estos acuíferos. Mediante actividades de campo que incluyeron el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales, hidrometría de la extracción, realización de pruebas de bombeo y toma de muestra de agua para análisis fisicoquímico, fue posible plantear el balance de aguas y determinar su disponibilidad.

Una conclusión importante es la identificación de pozos que físicamente se encuentran fuera del límite del acuífero Sabinas, en los acuíferos vecinos Hidalgo, Corrales, Saín Alto y El Palmar, cuyo volumen concesionado debe descontarse del volumen concesionado e inscrito en el REPDA, que actualmente está incluido en el acuífero Sabinas.

ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL PROYECTO MINERO CHALCHIHUITES, MUNICIPIO DE CHALCHIHUITES, ZACATECAS. Realizado en 2013 por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente IDEAS, S.A. de C.V., para Grupo México S. A. B. de C.V. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS SAÍN ALTO Y EL PALMAR, ZACATECAS. Realizado en 2014 por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente IDEAS, S.A. de C.V., para Grupo México S. A. B. de C.V. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan 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 dos provincias fisiográficas, la mayor parte de la superficie del acuífero, que incluye la porción centro y norte, se ubica en la Provincia Fisiográfica Mesa Central, el extremo sur pertenece a 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 Fisiográfica Mesa del Centro, Subprovincia Sierras y Llanuras del Norte; y la región sur en la Provincia Sierra Madre Occidental, Subprovincia denominada Sierras y Valles Zacatecanos.

Mesa Central es una gran cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras, tiene áreas poco elevadas, disectadas por las rocas volcánicas.

Se trata de una planicie elevada que se localiza en la parte central de México, más de la mitad de su superficie se encuentra por encima de la cota 2000 msnm y las elevaciones en su interior son moderadas, con desniveles inferiores a los 600 m.

La Subprovincia Sierras y Llanuras del Norte se caracteriza por presentar extensas llanuras altas, de 2,000 a 2,200 msnm, limitadas por sierras alargadas y angostas, que en general están orientadas en dirección NW-SE, así como zonas de lomeríos constituidos por rocas marinas cretácicas, pertenecientes a la Cuenca Mesozoica del Centro de México, la cual se observa afectada por numerosos cuerpos intrusivos terciarios.

La Sierra Madre Occidental se extiende en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco.

Es un gran sistema montañoso que tiene su origen en el Terciario Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1,500 y 1,800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias.

Por su parte, la Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos se caracteriza por sus sierras altas, de 2,300 a 2,700 msnm, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección. Los pisos de los valles son de pendientes suaves, con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos. El drenaje se dirige a través de los valles hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Grande de Santiago.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero, aproximadamente el 85 %, prevalece el clima semiseco templado BS₁kw, que se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C, la temperatura media del mes más frío es menor de 18 °C, con invierno fresco y régimen de lluvias en verano, con porcentaje de lluvias invernales entre 5 y 10.2.

En la porción sur, que comprende el 15 % del área del acuífero, se registra el clima templado subhúmedo, que se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía entre 18 y 22 °C y régimen de lluvias en verano, con porcentaje de lluvias invernales entre 5 y 10.2 y precipitación del mes más seco menor de 40 mm

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 5 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: Felipe Ángeles Sombrerete, Felipe Ángeles Villanueva, Puerto San Francisco, Saín Alto y Sombrerete. Con los registros obtenidos para el periodo 1987-2012 y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **467.1 mm** y **16.3 °C**, respectivamente.

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

3.3 Hidrografía

El área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en su totalidad dentro de la Región Hidrológica RH 36 "Nazas-Aguanaval", Subregión Hidrológica "Aguanaval", cuenca del Río Aguanaval.

El área de esta región es de 89,239 km²; limita al norte con la Región Hidrológica 35 Mapimí y 24 Bravo-Conchos, al este con la Región Hidrológica 37 "El Salado", al sur con la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago, al suroeste con la Región Hidrológica 11 Presidio-San Pedro y al oeste con la Región Hidrológica 10 Sinaloa.

Los ríos más importantes son el Nazas, que nace en el estado de Durango, y el Aguanaval, que tiene su origen en el estado de Zacatecas.

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.

El Río Aguanaval es el más importante del acuífero, se origina a 70 km al Este de la ciudad de Zacatecas, con el nombre de Río Chico, a una elevación promedio de 2,600 m. La dirección general de esta corriente es de sur a norte y 32 km aguas debajo de su origen recibe al aportación del arroyo El Arenal. En esta zona se encuentra la presa de almacenamiento Santa Rosa. El río pasa por Labor de Santa Bárbara, Agua Zarca y Guadalupe de Trujillo.

Entre otras poblaciones, y en Agua Zarca de los Martínez recibe las aportaciones del Río Los Lazos por su margen izquierda, el cual nace en la sierra Chalchihuites, a una elevación de 2,600 msnm al Sur de Sombrerete, Zacatecas; sobre este cauce y antes de su confluencia con el Río Chico, se localiza la presa de almacenamiento Leobardo Reynoso.

La unión del Río Chico y del Río Los Lazos da origen al Río Trujillo, el cual escurre en dirección noreste, en los límites con la región hidrológica 37 cambia su curso en dirección noroeste hasta la confluencia por margen izquierda del Río Saín Alto, en el sitio conocido como Santa Mónica, aguas arriba de la Presa El Cazadero.

Los cauces más importantes que confluyen al Río Aguanaval en el área del acuífero son los ríos Cañas, Las Mujeres, Marrufo y Santa Clara, al cual confluyen diversos arroyos de la región occidental de la zona, un afluente de este río cruza por San Miguel Auza, para integrarse posteriormente al Río Aguanaval. Localmente, el área del acuífero se ubica en la cuenca del Río Saín Alto, el cual se origina a una elevación de 2,450 msnm, aproximadamente 5 km al Noreste de Sombrerete, Zacatecas.

Desde sus orígenes el cauce escurre en dirección noreste pasando cerca de la población El Arenal, ubicada a una altitud de 2,200 msnm. Continúa su curso en dirección sureste a una elevación de 2,120 msnm pasa por la población de Cantuna.

A partir de aquí el río escurre en dirección este y en la población Huajotita, a una elevación de encuentra en elevación de 2,000 msnm continúa su curso pasando por Saín Bajo a elevaciones de 1960 msnm; 9 km aguas abajo de esta población confluye al Río Trujillo. Aguas abajo de esta confluencia se localiza la presa El Cazadero.

La infraestructura hidráulica de la zona está representada por la Presa El Cazadero, ubicada en el municipio de Saín Alto, en los límites con los acuíferos El Palmar y Aguanaval, que tiene una capacidad total de almacenamiento de 30.9 hm³, utilizada para riego en el municipio de Río Grande. Dentro de la superficie del acuífero sólo existen algunas presas pequeñas y bordos de almacenamiento, para el abrevadero del ganado.

3.4 Geomorfología

Las geoformas que constituyen el paisaje del área son el producto de la composición litológica de las rocas existentes y de los procesos endógenos y exógenos que han ocurrido a través del tiempo geológico. En la superficie del, acuífero se distinguen los siguientes tipos de geoformas: Sierras, mesetas, valles y lomeríos,

Las sierras están orientadas en sentido NW-SE, formadas por rocas sedimentarias de origen marino, principalmente calizas, lutitas y areniscas; plegadas y con drenaje de tipo dendrítico con enrejado denso, cuya elevación varía de 2200 a 2750 msnm. Se presentan distribuidas en las porciones sur, norte y noroeste del acuífero.

En la región norte, algunas sierras además del plegamiento fueron afectadas por intrusivos que ocasionaron formas de domos; la actividad volcánica propició la formación de conos volcánicos y coladas basálticas onduladas, que presentan un grado de fracturamiento intenso. Las mesetas se observan de manera aislada en la porción centro-oriental y están constituidas por rocas extrusivas ácidas asociadas a erupciones explosivas y derrames de lava, disectadas por la erosión por los arroyos que atraviesan la región. El drenaje característico de esta morfología es de tipo dendrítico, más espaciado que aquel que se observa en las sierras.

La mayor superficie del acuífero está representada por el valle, que es amplio y se extiende de manera paralela a las sierras que lo delimitan, en sentido NW-SE, hasta la porción central. En él se aloja el poblado Saín Alto y está conformado por los sedimentos aluviales provenientes de la erosión de las sierras y mesetas. Los lomeríos se localizan en la porción oriental y suroriental, bordeando las sierras y mesetas, están conformados por depósitos de pie de monte

Considerando el grado de integración del drenaje y la extensión de sus valles, se puede concluir que la zona se encuentra en una etapa de madurez temprana, de acuerdo al ciclo geomorfológico de Davis.

4 GEOLOGÍA

La región se ubica en la provincia geológica del Altiplano Mexicano, en su límite occidental con la provincia Sierra Madre Occidental; en ella se presentan tres ambientes geológicos definidos: los Terrenos Tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1987) Parral, Guerrero y Sierra Madre, cuyos límites entre ellos se infiere que son tectónicos (figura 2).

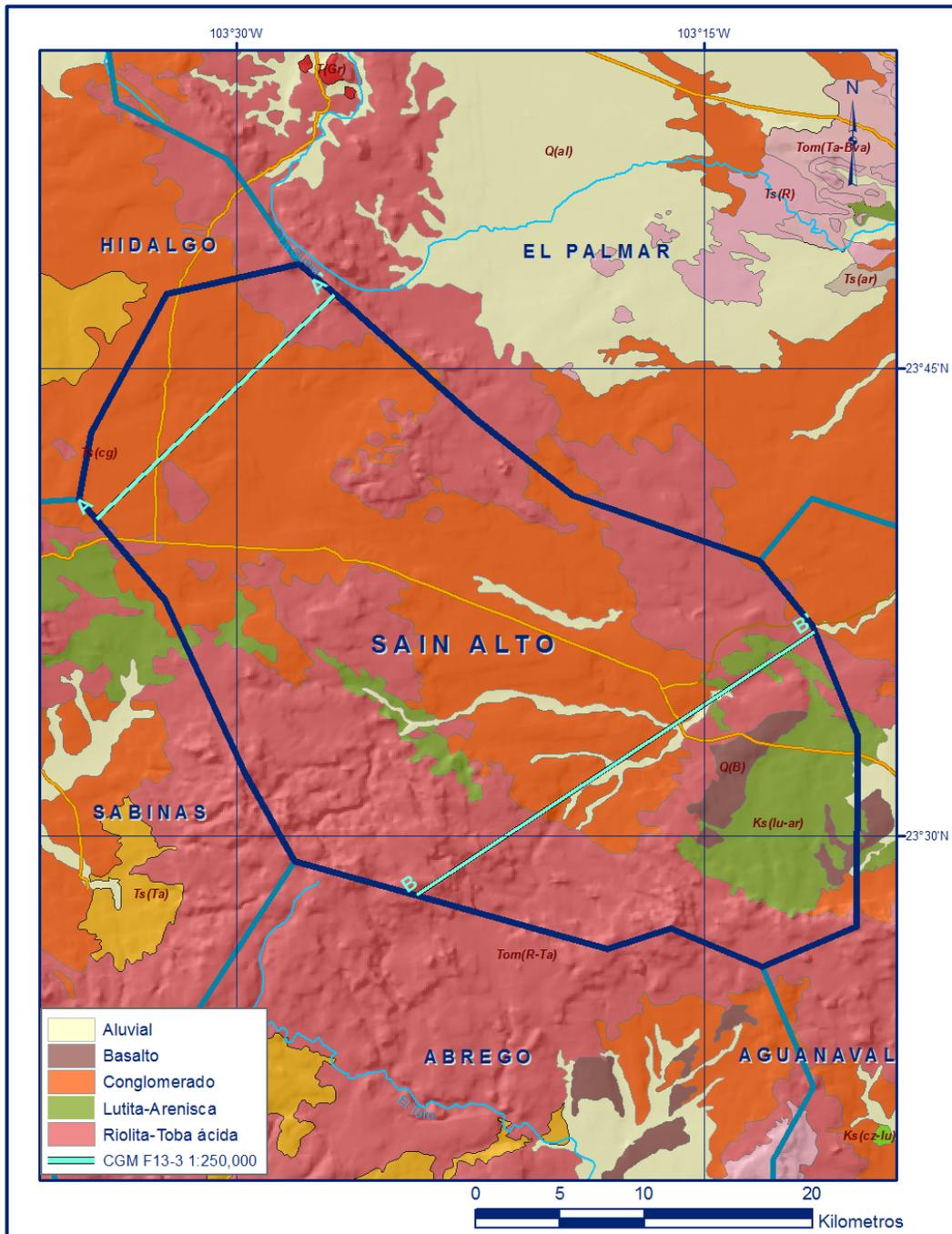


Figura 2. Geología general del acuífero

El Terreno Parral aflora en la porción occidental de la región, en las sierras de Yerbaniz, San Marcos, La Roca, Carbonera y Francisco Mendoza. Su estratigrafía está representada por una secuencia turbidítica calcáreo-arenosa con niveles de lutitas, tobas, lentes y bandas de pedernal negro de edad Cretácico Inferior. Está intensamente deformada por corrimientos tectónicos y apilamientos de cabalgaduras.

Se podría interpretar la existencia de cambios de facies con la cubierta del Terreno Sierra Madre ya que afloran capas masivas de brechas calcáreas de facies de talud de posible edad Cretácico Inferior. El Terreno Sierra Madre cubre la porción centro y oriental de la región, su base está constituida por filitas y metareniscas con novaculitas de la Formación Taray, de posible edad Triásico Inferior-Medio que afloran en la Sierra de Teyra.

La cubre en discordancia derrames y tobas de andesita, dacita, riolita con horizontes de limolita y areniscas con metamorfismo que presentan facies de esquistos verdes, que constituyen la Formación Rodeo-Nazas, de edad Triásico Medio a Jurásico Inferior. También muestra metamorfismo dinámico progresivo.

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. La columna estratigráfica comprende rocas cuya edad varía del Cretácico Inferior al Reciente. A continuación, se presenta la descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Taraises

Está constituida de calizas con cantidades menores de limolita, que descansan sobre los 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, su espesor aproximado es de 150 m.

Formación Cupido

La Formación Cupido fue reportada por primera vez por Imlay (1937) para describir una secuencia carbonatada constituida principalmente por calizas de estratificación mediana que ocasionalmente presenta concreciones de piritita y una gran cantidad de pedernal en forma de lentes y nódulos, cuyos afloramientos se tienen en el Cañón Mimbres de la porción media de la Sierra de Parras, Coahuila. Dentro del área del acuífero está representada por rocas muy resistentes y homogéneas, principalmente calizas de estratificación mediana y gruesa, de color gris claro.

Localmente también se caracteriza por presentar estilolitas y algunos nódulos y lentes de pedernal color gris, e intercalaciones de limolita calcárea y lutita. Representa un sistema sedimentario de plataforma carbonatada somera que se desarrolló entre el Barremiano y el Aptiano (Barragán, 2004). Regionalmente esta unidad presenta un cambio de facies lateral hacia las rocas de ambientes más profundos que representan las rocas de la Formación Tamaulipas. Dentro del área del acuífero, los contactos estratigráficos con la unidad subyacente Formación La Casita y la sobreyacente Cuesta del Cura son concordantes.

Formación Cuesta del Cura.

Fue definida por Imlay (1936) en el sector denominado Cuesta del Cura, en la Sierra de Parras, al sur de Coahuila. La secuencia descrita originalmente son estratos delgados de caliza con arcillas intercaladas y bandas de pedernal. Dentro del área del acuífero se encuentra en los flancos de los anticlinales y está constituida por una caliza laminar de color gris oscuro con estratificación ondulada y numerosas lentes y nódulos de pedernal negro.

Su edad, determinada con base en su posición estratigráfica, corresponde al Albiano-Cenomaniano, su depósito fue rápido en aguas someras en condiciones poco propicias para la vida marina. Por su posición estratigráfica que subyace a los sedimentos permeables de relleno, así como a las rocas volcánicas fracturadas, y por su muy baja permeabilidad, se considera el basamento geohidrológico de la región.

En el área estudiada, sobryace concordantemente a la Formación Cupido, y su contacto superior es también concordante con la Formación Indidura. Se correlaciona con la Formación Mezcalera del Norte de México (Chihuahua), con la Formación Proaño en Fresnillo, Zac. y con la Formación Kiamichi y el Grupo Washita del Golfo de Sabinas.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Indidura

Consiste principalmente de dos series diferentes: la base conformada por calizas arcillosas dispuestas 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 cima está formada de una lutita de color 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.

Su espesor total promedio es de 200 m. Sobreyace a la Formación Cuesta del Cura y es cubierta por la Formación Caracol, generalmente aparece aflorando en las laderas de las sierras.

Se correlaciona con la Formación Soyatal de la Cuenca Mesozoica del centro de México, con la Formación Mezcala del Sur de México y con La Formación Agua Nueva de la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Formación Caracol

Secuencia de capas de estratificación mediana a delgada de calizas y lutitas de color gris oscuro con bandas de pedernal de color gris a negro, que intemperizan a color amarillo ocre y rojizo. Su constitución litológica es muy variable debido a que posiblemente su depósito comprendió facies diferentes.

Se caracteriza por la presencia de calizas con lutitas; las calizas corresponden a micritas arcillosas recristalizadas de color gris claro, que en roca fresca presenta un color negro de textura wackestone y vetas de calcita.

Su estratificación ondulante indica una depositación en aguas de profundidad moderada que se encontraban sujetas a cierta agitación en un ambiente infranerítico.

Su ambiente de depósito es de plataforma, relativamente profunda con desarrollo de facies arrecifales. Se correlaciona con la Formación San Felipe del Noreste de México y con la Formación Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Por su posición estratigráfica y contenido fósil, se le asigna una edad Coniaciano-Maastrichtiano. Su contacto superior es con los conglomerados polimícticos del Mioceno y las rocas volcánicas del Terciario. Está afectada por intrusivos.

CENOZOICO

Formación Ahuichila

Nombre propuesto por Rogers et al. (1961) para referirse a los afloramientos expuestos en el “Frontón de Ahuichila”, ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas.

Se trata de un conglomerado de origen continental, tipo molasa, compuesto de fragmentos angulosos a subredondeados de caliza en una matriz de calcarenita, que aflora en bancos masivos y gruesos que conforman lomeríos suaves, que sobreyace discordantemente a las rocas mesozoicas.

Aflora en los en las partes bajas de los valles, su espesor medio es de 400 m y su edad se ha establecido en el Eoceno Superior-Oligoceno Inferior por correlación con depósitos clásticos del centro de México (Fries et al., 1955; Edwards, 1955). Está constituida por capas de conglomerados, areniscas, lutitas, calizas lacustres y tobas.

Formación Ahuichila

Nombre propuesto por Rogers et al. (1961) para referirse a los afloramientos expuestos en el “Frontón de Ahuichila”, ubicado en el límite donde convergen los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas.

Se trata de un conglomerado de origen continental, tipo molasa, compuesto de fragmentos angulosos a subredondeados de caliza en una matriz de calcarenita, que aflora en bancos masivos y gruesos que conforman lomeríos suaves, que sobreyace discordantemente a las rocas mesozoicas.

Aflora en los en las partes bajas de los valles, su espesor medio es de 400 m y su edad se ha establecido en el Eoceno Superior-Oligoceno Inferior por correlación con depósitos clásticos del centro de México (Fries et al., 1955; Edwards, 1955). Está constituida por capas de conglomerados, areniscas, lutitas, calizas lacustres y tobas.

Riolita-Ignimbrita

Unidad constituida por una alternancia de tobas ácidas, ignimbritas y riolitas, que se caracterizan por presentar fracturamiento intenso en la parte superior de sus pseudoestratos, debido a que su enfriamiento fue más rápido.

Están constituidas por cuarzo, feldespatos potásicos y plagioclasas sódicas en una matriz vítrea de composición ácida; como minerales secundarios presenta sílice, arcillas y clorita. Presenta una estructura fluidal, ligeramente vesicular con pseudoestratos.

Está afectada por fallas que provocaron un basculamiento con dirección norte-sur. Su espesor es de 150 m aproximadamente, cuando presenta fracturamiento en superficie funciona como zonas de recarga.

Se correlaciona con las unidades volcánicas del Supergrupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental, asociadas con los eventos tectónicos ocurridos durante la culminación de la Orogenia Laramide.

Toba ácida-riolítica

Roca volcánica de composición ácida producto de intensa actividad volcánica explosiva, megascópicamente son de color rosa a rosa pardo que intemperiza a un color de tonos violetas, en algunas localidades brechoide y arenosa. Subyace a basaltos y conglomerados, su edad corresponde al Terciario.

Por su posición estratigráfica se le asignó una edad del Oligoceno y se correlaciona con las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental.

Supergrupo Volcánico Superior

Esta unidad fue originalmente definida por McDowell y Keizer (1977) para caracterizar a las ignimbritas silíceas que fueron emplazadas en dos pulsos principales, uno del Oligoceno Temprano y otro del Mioceno Temprano (Ferrari et al., 2005).

Esta actividad volcánica generó en la región centenas de metros de espesor de tobas riolíticas, ignimbritas, riolitas y domos riolíticos, además del desarrollo de calderas de dimensiones kilométricas que están asociadas directamente a la producción de depósitos minerales (Staude y Barton, 2001). Dentro del área estudiada, esta unidad incluye una serie de rocas volcánicas y piroclásticas de probablemente edad Oligoceno que afloran ampliamente en la superficie del acuífero.

Rocas Intrusivas

Están representados por pórfidos riolíticos en forma de diques y troncos que intrusionan a rocas del Cretácico Inferior (calizas, areniscas y lutitas), generando

metamorfismo de contacto y produciendo recristalización y silicificación de las rocas adyacentes, con la consecuente mineralización.

En el área del acuífero aflora en la porción centro-norte, en forma de domo o apófisis dentro de la secuencia volcánica de riolitas. Es una roca de un color rosáceo a pardo de textura porfídica. Por sus relaciones de intrusión se le asigna una edad correspondiente al Mioceno.

Conglomerado Polimíctico

Compuesto por fragmentos subredondeados a redondeados de tobas riolíticas, riolitas, ignimbritas, vitrófidos, basaltos, calizas, 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 en tamaño desde arenas, gravas hasta guijarros. El depósito muestra gradación normal de los sedimentos, de la base a la cima, de tamaño grueso a los más finos. Aflora ampliamente en los valles.

Es 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. Por su posición stratigráfica, se le asigna una edad correspondiente al Oligoceno-Mioceno.

CUATERNARIO

Basalto

Es la roca volcánica más joven generada a partir de fisuras profundas, dispuesta en forma de coladas y filones. Se trata de basaltos de olivino, con estructura es compacta, de textura afanítica, generalmente vesicular y en ocasiones formando bloques.

Aflora principalmente en el límite norte y en la porción suroriental del acuífero, cubriendo a las riolitas y tobas ácidas del Oligoceno-Mioceno. Se correlaciona con los eventos volcánicos de carácter básico ocurridos a finales del Terciario Superior o principios del Cuaternario, relacionados con la apertura del Golfo de California.

Aluvión

Unidad detrítica no consolidada de origen fluvial, constituida por depósitos recientes formados por sedimentos de formas subredondeadas a redondeadas que son producto de erosión de las rocas existentes en el área.

Su granulometría es muy variada y está conformada por gravas, arenas, limos y arcillas. Constituye el cauce de los ríos y arroyos.

4.2 Geología estructural

El marco geológico-estructural del área es producto de los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide, representados por varios eventos distensivos que se manifestaron en el Cenozoico. Como consecuencia del movimiento tectónico que afectó a las rocas mesozoicas y cenozoicas, se generaron anticlinales y sinclinales orientados al NW-SE y N-S, afectados por fallas laterales y normales, fracturas y cabalgaduras con dirección al noreste; las varias fases de intrusión fueron controladas al norte y sur por dos zonas de fallas que presentan una orientación W-NW.

El marco estructural está definido por los contactos tectónicos de los Terrenos Guerrero, Parral y Sierra Madre, que se caracterizan por presentar sistemas complejos de plegamientos asociados a cabalgaduras en un régimen de deformación dúctil. Se interpreta que este evento ocurrió durante la Orogenia Laramide, cuando el Terreno Guerrero cabalgó sobre los Terrenos Sierra Madre y Parral.

Esta deformación, al interior de Terreno Sierra Madre, causó plegamiento formando anticlinales y sinclinales de runo NW-SE, con apilamiento de cabalgaduras en la Sierra Guadalupe de Las Corrientes, en un estilo de deformación contrastante al que existe hacia el SW de la región. 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 hipabisales y domos, así como la extrusión de rocas volcánicas félsicas (Carta Geológico-Minera Fresnillo F13-3, escala 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano, 1998).

En el área del acuífero las rocas cretácicas están fuertemente afectadas por los eventos compresivos de la Orogenia Laramide, principalmente a partir de una serie de plegamientos cuyos ejes se orientan de manera general NW-SE; lo que sugiere que los esfuerzos compresivos actuaron del SW al NE. Esta deformación está estrechamente ligada a la historia de la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Norteamericana que en la región del noroeste del México dio origen a las secuencias volcánicas inferior y superior de la Sierra Madre Occidental. Las secuencias ignimbríticas del Supergrupo

Volcánico Superior en la Sierra Madre Occidental están coronadas por rocas volcánicas de composición andesítico-basáltico que tienen un gran significado tectónico, ya que marcan el cambio de un ambiente en subducción a otro de distensión intraplaca.

Este evento extensional debió haber iniciado a principios del Mioceno y generó una serie de cuencas continentales, cuyo relleno sedimentario, para aquellas desarrolladas en la región, está representado por las secuencias conglomeráticas que incluyen actividad volcánica predominantemente máfica sincrónica dentro de ellas. A finales del Mioceno se manifiesta de nuevo una actividad tectónica distensiva, provocando el basculamiento de las rocas del relleno sedimentario y la reactivación del vulcanismo. Finalmente, los procesos de erosión y depósito dentro de cuencas continentales actuales, permitieron la acumulación de sedimentos.

4.3 Geología del subsuelo

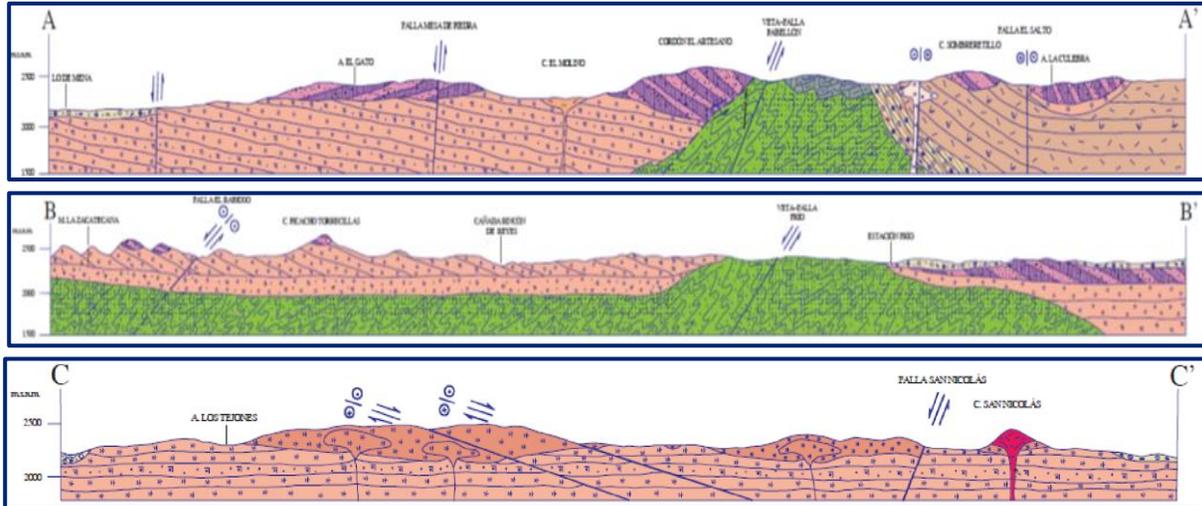
De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica generada en 2000 y 2014 y por correlación con acuíferos vecinos, se determina que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada y los conglomerados polimícticos que rellenan los valles.

Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la zona. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente calizas y lutitas de la Formación Caracol, así como en una secuencia de rocas volcánicas entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

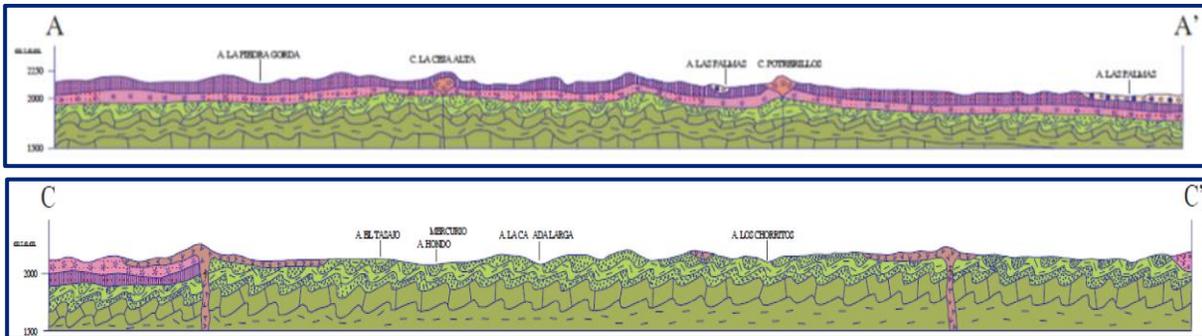
A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que aún no ha sido explorado y que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas (figura 3).

El predominio de sedimentos granulares areno-arcillosos y conglomerados polimícticos, de granulometría fina, le confieren baja permeabilidad al acuífero que en general aportan bajos caudales de extracción. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento a profundidad, así como por la secuencia de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas y por rocas intrusivas

Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen algunos cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas originadas durante la Orogenia Laramide.



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B25 "Sombrerete", Escala. 1:50,000 (SGM, 2001)



Fuente: Carta Geológico-Minera F13-B26 "Saín Alto" Escala. 1:50,000 (SGM, 2007)

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 en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales, de granulometría variada y conglomerados, cuyo espesor puede alcanzar algunos cientos de metros en el centro de los valles tectónicos.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

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

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades de los estudios realizados en 2014, se ejecutaron 2 pruebas de bombeo de corta duración; adicionalmente se cuenta con información de 6 pruebas más realizadas en el año 2000 y 13 pruebas realizadas en el acuífero vecino El Palmar recopiladas de otros estudios previos, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales indican que los valores medios de transmisividad varían de 1.0×10^{-5} a $9.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y los valores de conductividad hidráulica entre 1.5×10^{-6} y $9.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (**0.2 a 0.8 m/d**).

Ambos parámetros son representativos de materiales de granulometría fina, en general de baja permeabilidad.

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 se adoptó un valor de rendimiento específico de 0.01, considerando los materiales aluviales arcillo arenosos y las rocas arcillosas de la Formación Caracol, que constituyen el acuífero en explotación.

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 realizados en 2000, 2012 y 2014. Debido a que no se han registrado variaciones significativas en los últimos años, únicamente se describe la configuración más reciente.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2014 presentó valores que variaron de 5 m, que se registran en algunas norias ubicadas en la porción norte del acuífero, en las inmediaciones del cauce del Río Aguanaval.

Hasta 130 m que se midieron en el extremo noroccidental, al oeste del poblado Francisco I. Madero, incrementándose por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles.

Los niveles estáticos someros, menores de 10 mm, se ubican en la porción suroriental, entre Saín Alto y Atotonilco, en la vecindad del cauce del Río Saín Alto; mientras que los más profundos, de 80 a 130 m, se registran en la región norte y noroccidental, donde se ubica la principal zona de explotación (figura 4).

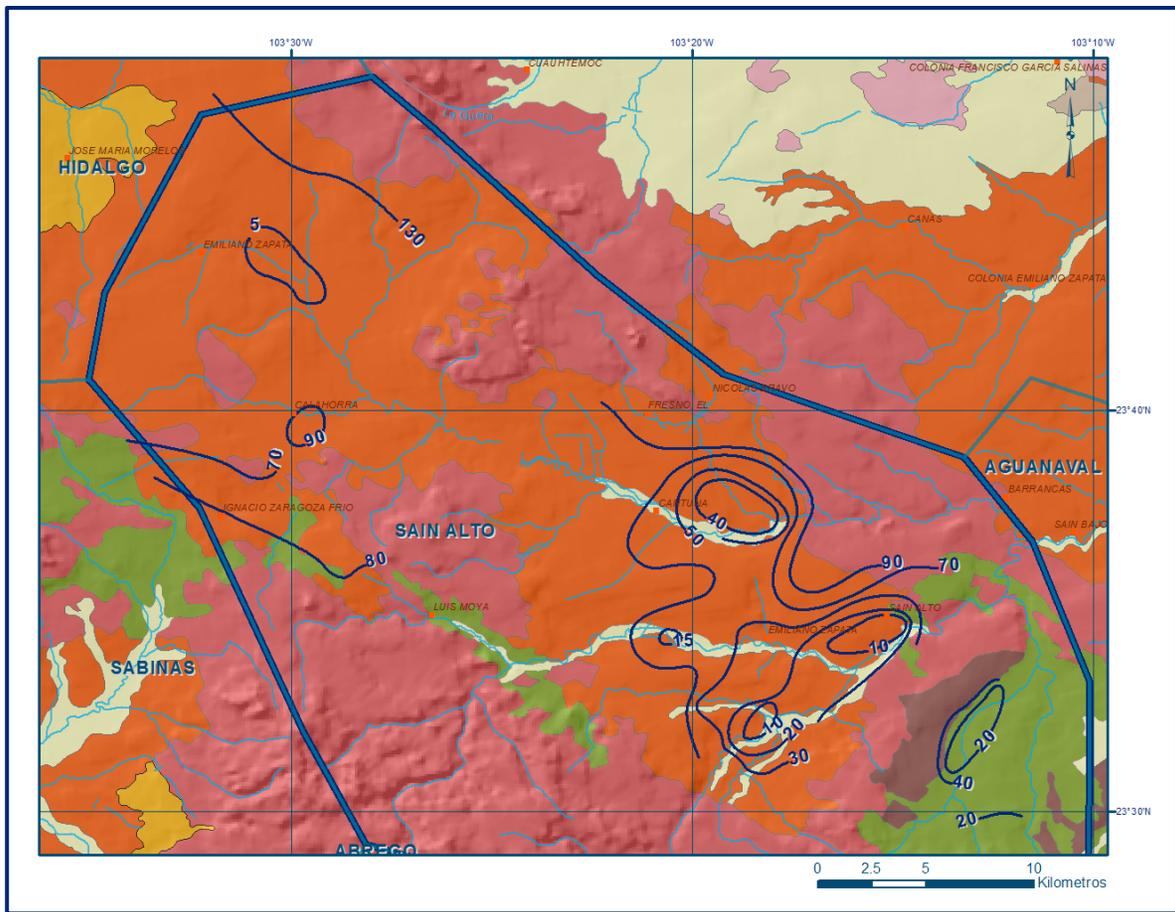


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2014)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático para el año 2014, registró valores que variaron de 2270 a 2040 msnm. Las menores elevaciones, de 2040 a 2060 msnm, se presentan en la porción suroriental del acuífero, entre Saín Alto y Atotonilco, en tanto que las mayores de 2270 a 2200. Se registran en la porción noroccidental, desde donde descienden gradualmente, por efecto topográfico, al igual que la profundidad, hacia el centro y

sureste del valle, en dirección hacia Saín Alto. La dirección preferencial del flujo subterráneo es NW-SE, hacia la región aledaña a Saín Alto, zona en donde además confluyen los flujos provenientes de los flancos norte, sur y oeste (figura 5).

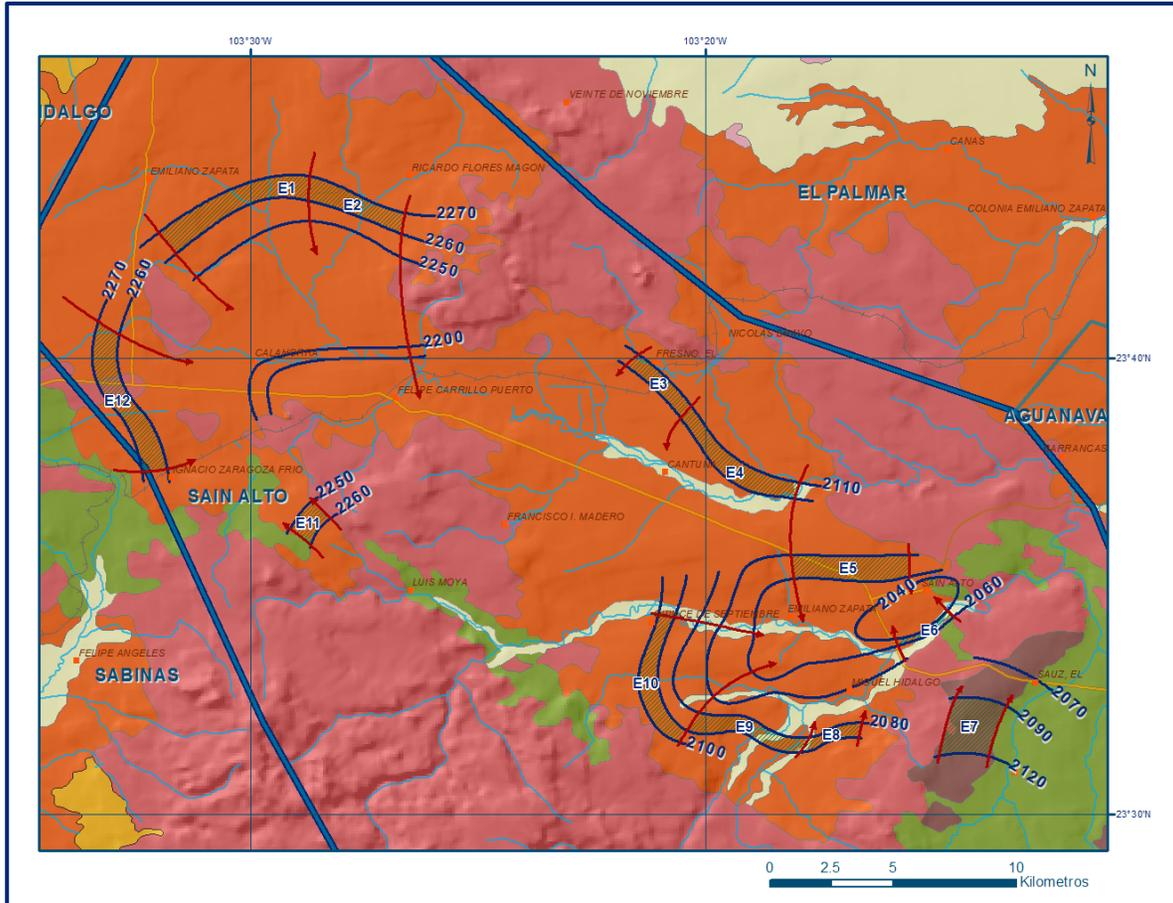


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2014)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Para el periodo 2012-2014, la configuración de evolución del nivel estático no registró abatimientos significativos, sólo se observa una zona de abatimiento de 0.5 m, es decir de 0.25 m anuales, entre las poblaciones Cantuna y Emiliano Zapata y en ambos márgenes del cauce del Río Saín Alto.

Para la mayor parte de la superficie de explotación, los niveles del agua subterránea no presentan variaciones importantes en su posición, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo (figura 6). Incluso se registran recuperaciones hacia las zonas de recarga, solo medibles en aprovechamientos dispersos que no permiten su configuración, se considera que para estas zonas la recuperación es de 0.1 m anuales, en el periodo analizado.

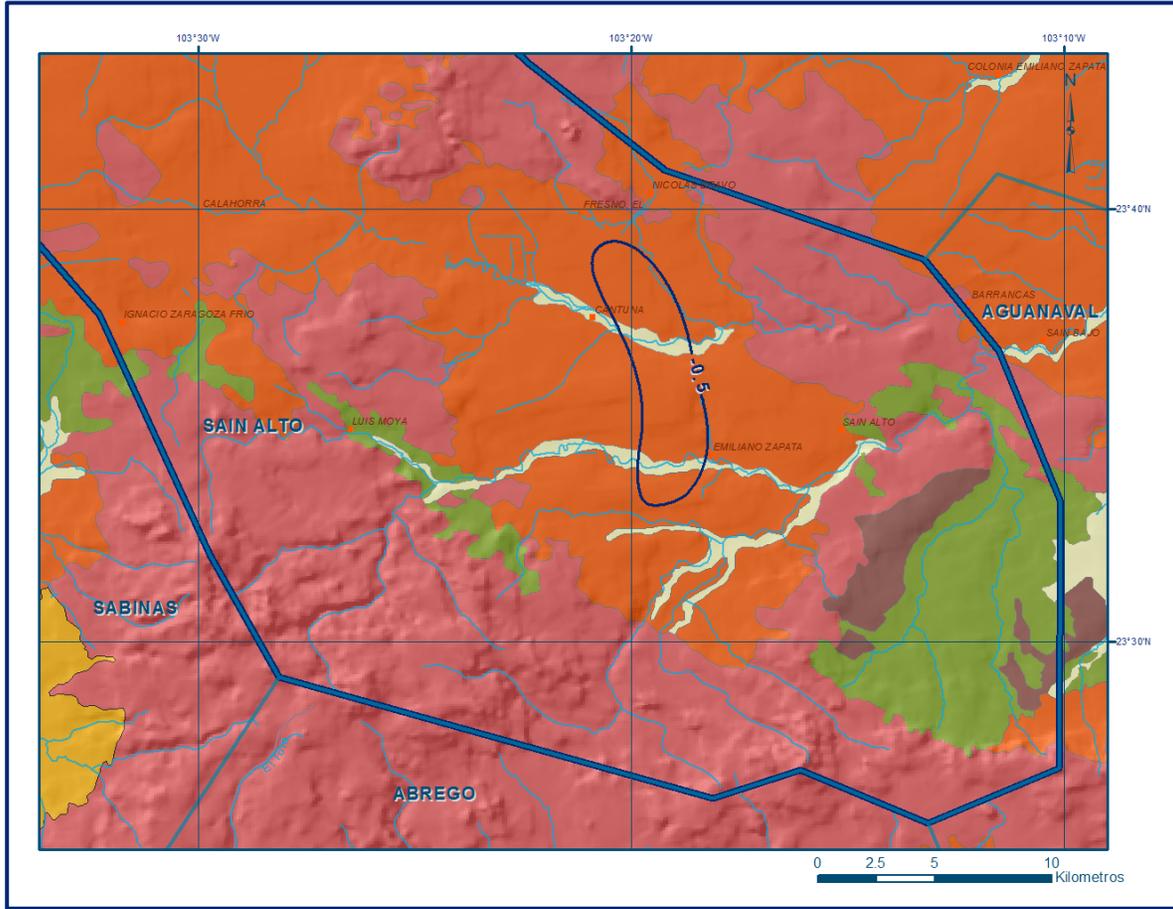


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2012- 2014)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en los estudios realizados en 2000 y 2014, se tomaron 10 y 3 muestras de agua subterránea, respectivamente, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total, dureza al calcio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, calcio, magnesio, sodio y potasio.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de STD varían de 150 a 265 mg/l, que no superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por la modificación a la 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 STD, para el agua destinada al consumo humano.

En general, las concentraciones más bajas se localizan en los aprovechamientos localizados hacia las zonas topográficamente más altas y las mayores en las zonas de explotación ubicadas en las regiones de menor elevación, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo del noroeste al sureste.

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 varían de 240 a 4252 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las temperaturas registradas varían de 23.0 a 38.5 °C y el pH de 6.2 a 7.0.

Con respecto a las familias del agua por iones dominantes, predomina la familia bicarbonatada-sódica; que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de las rocas volcánicas, 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 se clasifican como C_1-S_1 que representa contenido bajo de sales y baja concentración de sodio intercambiable, y C_2-S_1 que presenta contenido medio de sales y baja concentración de sodio; ambas se consideran aptas para el uso agrícola, sin restricciones en el tipo de cultivo ni de 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 2014, se registraron un total de 84 obras que aprovechan el agua subterránea: 56 pozos, 18 norias, 8 manantiales y 2 tiros de mina; 76 activas y 8 inactivas. Del total de obras activas 41 se utilizan para uso agrícola, 12 para dotación de agua potable a las comunidades de la región, 11 para uso doméstico-abrevadero y 12 para otros usos.

El volumen de extracción conjunto asciende a **11.5 hm³ anuales**, de los cuales 9.5 hm³ (82.6 %) son para uso agrícola, 1.4 hm³ (12.2 %) para abastecimiento de agua potable y 0.6 hm³ (5.2 %) para usos doméstico-abrevadero. Adicionalmente, a través de los **8**

manantiales se descarga un caudal conjunto de 4 lps, que representa un volumen anual de **0.1 hm³**, destinados al uso doméstico-abrevadero.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2012-2014, en una superficie de **375 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 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 (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.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Para este caso, debido a que el volumen destinado al uso público-urbano es muy pequeño, para

finés del balance únicamente se considera la infiltración originada por los excedentes del riego agrícola (Rr).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Rr:** Recarga incidental por riego agrícola
- B:** Bombeo
- Dm:** Descarga a través de manantiales
- ETR:** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

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

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

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 de los 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.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2014, mostrada en la figura 5.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

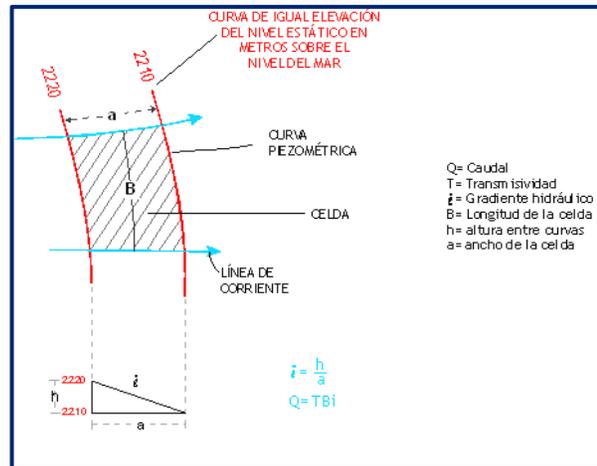
Donde:

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 es de **14.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

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	4615	960	20	0.0208	0.0005	0.0481	1.5
E2	4805	1250	20	0.0160	0.0005	0.0384	1.2
E3	4425	770	20	0.0260	0.0005	0.0575	1.8
E4	4805	770	20	0.0260	0.0005	0.0624	2.0
E5	4040	1345	10	0.0074	0.0008	0.0240	0.8
E6	2405	575	20	0.0348	0.0008	0.0669	2.1
E7	1730	1925	30	0.0156	0.0015	0.0404	1.3
E8	3270	1055	10	0.0095	0.0010	0.0310	1.0
E9	3655	865	10	0.0116	0.0010	0.0423	1.3
E10	6155	675	10	0.0148	0.0003	0.0274	0.9
E11	1635	1250	10	0.0080	0.0005	0.0065	0.2
E12	6345	1345	10	0.0074	0.0005	0.0236	0.7
Total entradas							14.8

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 realizadas en 2000 y 2014, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

7.1.3 Recarga incidental (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la

superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático.

Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta que la profundidad al nivel del agua subterránea alcanza hasta 40 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 9.5 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 1.0 hm³ anuales. **Rr = 1.0 hm³ anuales**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre mediante bombeo (B), de manera natural a través de manantiales (Dm) y por evapotranspiración (ETR) en zonas de niveles freáticos someros.

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **11.5 hm³ anuales**.

7.2.2 Descarga de Manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 8 pequeños manantiales que en conjunto descargan 4 lps, es decir un volumen estimado de **0.1 hm³ anuales**.

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), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, como se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 16.3 °C y precipitación = 467.1 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 434.5 mm.

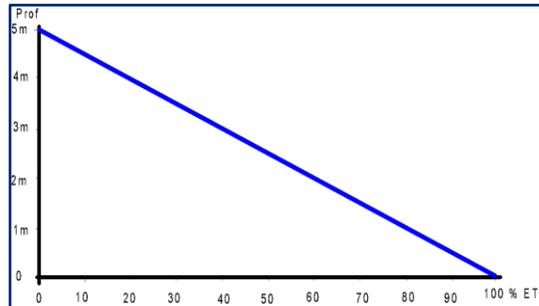
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	16.3		
P (mm) =	467.1	P ² =	218182.41
L =	924.03735	L ² =	853845.024
ETR (mm)	434.5		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno, por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. Tomando en cuenta que en una superficie de 33 km² de niveles freáticos someros a lo largo del cauce del Río Saín Alto y en la porción noroeste del acuífero, al sureste del poblado Emiliano Zapata, en donde la profundidad promedio al nivel del agua subterránea es de 3 m, le corresponde el 40% de la lámina de ETR. Esto es: (33 km²) (0.4345 m) (0.4) = 5.7 hm³ anuales. Por lo tanto **ETR = 5.7 hm³/año.**

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2012-2014 (figura 6).

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S y de 0.01, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S :** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A :** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2)
- h :** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

El 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 0.1 hm^3 , por lo que el promedio anual tiende a ser nulo.

Por lo tanto $\Delta V(S) = 0.0 \text{ hm}^3$ anuales.

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2012- 2014)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km^2)	S_y	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
-0.5	-0.5	27.0	0.01	-0.1
0.0	0.0	128.0	0.01	0.0
0.1	0.1	220.0	0.01	0.2
Área de balance		375.0	TOTAL	0.1
		Promedio anual		0.0

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:

$$\begin{aligned}
 R_v &= B + D_m + ETR \pm \Delta V(S) - E_h - R_r \\
 R_v &= 11.5 + 0.1 + 5.7 \pm 0.0 - 14.8 - 1.0 \\
 R_v &= 1.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_r \\ R &= 1.5 + 14.8 + 1.0 \\ R &= 17.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

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 a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **17.3 hm³/año**, de los cuales 16.3 hm³ son recarga natural y 1.0 hm³ recarga incidental.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso de este acuífero, su valor es de **0.1 hm³ anuales**, que corresponden a la descarga de los manantiales. **DNC = 0.1 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 (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 **15,837,210 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 17.3 - 0.1 - 15.837210 \\ \text{DMA} &= 1.362790 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,362,790 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1980. Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en el estado de Zacatecas. Elaborado por Estudios Geológicos y Obras Civiles, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la Región de Saín Alto, en el estado de Zacatecas. Elaborado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA).