



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL
DE AGUA EN EL ACUÍFERO ÁBREGO (3215), ESTADO DE
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización del acuífero.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural.....	18
4.3 Geología del subsuelo.....	20
5. HIDROGEOLOGÍA.....	20
5.1 Tipo de acuífero.....	20
5.2 Parámetros hidráulicos.....	21
5.3 Piezometría.....	21
5.4 Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	22
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	22
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	23
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	24
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	26
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	26
7.1 Entradas.....	26
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	27
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	27
7.1.3. Recarga incidental (Ri).....	28
7.2 Salidas.....	29
7.2.1 Bombeo (B).....	29
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	29
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	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 del acuífero

El acuífero Ábrego, definido con la clave 3215 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-occidental del estado de Zacatecas, entre los paralelos 23°04'18" y 23°29'13" de latitud norte y entre los meridianos 103°09'33" y 103°36'16" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,205 km².

Limita al norte con el acuífero Saín Alto, al este y sureste con Aguanaval; al sur con Valparaíso; al suroeste y oeste con Corrales; y al noroeste con el acuífero Sabinas; todos estos pertenecientes al estado de Zacatecas (figura 1). Geopolíticamente, la mayor parte del territorio que comprende el acuífero pertenece al municipio Fresnillo, de

manera parcial comprende los municipios Sombrerete y Saín alto; y cubre también una pequeña porción del municipio Valparaíso.

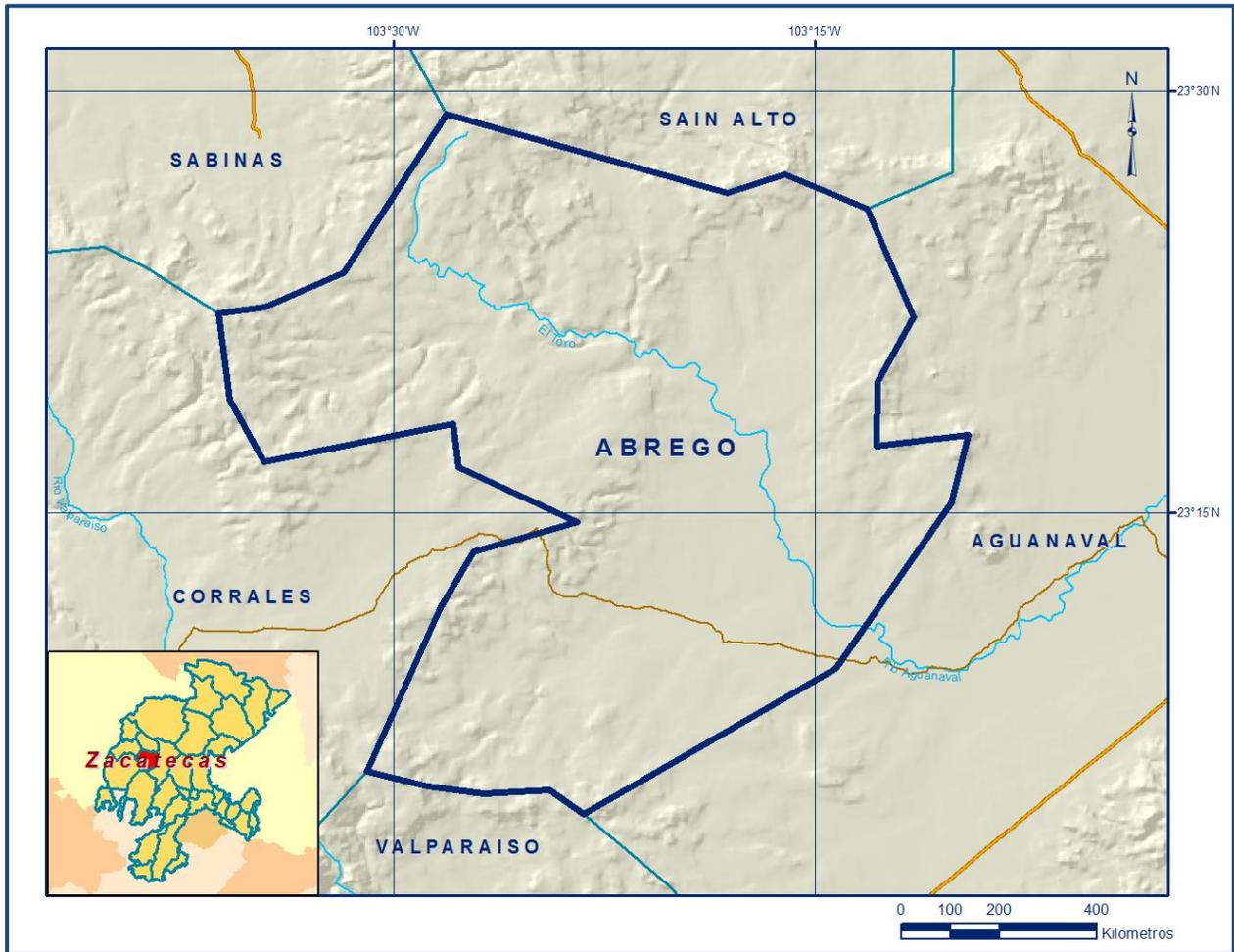


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUÍFERO 3215 ABREGO

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	28	47.1	23	5	15.8
2	103	30	58.1	23	5	48.1
3	103	28	20.2	23	11	35.9
4	103	27	9.1	23	13	36.4
5	103	23	28.2	23	14	40.4
6	103	27	42.1	23	16	38.0
7	103	27	52.4	23	18	10.9
8	103	34	37.0	23	16	48.3
9	103	35	49.3	23	19	2.5
10	103	36	14.5	23	22	6.3
11	103	34	35.6	23	22	18.7
12	103	31	47.5	23	23	33.7
13	103	28	8.0	23	29	11.5
14	103	18	6.8	23	26	23.3
15	103	16	4.9	23	27	2.6
16	103	13	8.3	23	25	49.6
17	103	11	29.7	23	21	57.5
18	103	12	46.8	23	19	38.6
19	103	12	48.4	23	17	22.0
20	103	9	33.1	23	17	46.5
21	103	10	8.0	23	15	21.7
22	103	14	16.0	23	9	27.5
23	103	23	14.5	23	4	17.2
24	103	24	26.7	23	5	7.7
25	103	26	48.5	23	5	0.7
1	103	28	47.1	23	5	15.8

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Ábrego pertenece al Organismo de Cuenca VII Cuencas Centrales del Norte, al Consejo de Cuenca Nazas-Aguanaval, instalado el 1 de diciembre de 1998, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Zacatecas. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda: en la mayor parte de su superficie rige 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 Diario Oficial de la Federación (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 doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales. En el extremo suroeste del acuífero rige 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.

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 varios estudios hidrogeológicos de exploración y evaluación, algunos de carácter regional; a continuación, se citan los más importantes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA DE VALPARAÍSO, ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por la empresa Servicios Geológicos S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en el año 1980. Abarcó una superficie de 12,000 km², tomando como centro el Valle de Valparaíso y sólo la porción sur de Abrego. Su objetivo fue conocer las posibilidades acuíferas del valle de Valparaíso y región de Ábrego, identificando áreas favorables para la perforación de pozos. Las actividades de campo más importantes consistieron en la realización de levantamientos geológicos, censo de aprovechamientos, piezometría, muestreo de agua para análisis físico-químico, descripción de unidades hidrogeológicas y definición del funcionamiento hidráulico superficial y subterráneo. El estudio concluye que el acuífero regional está alojado en sedimentos arenotobáceos, que tienen un espesor superior a 200 m, cuyo basamento está representado por rocas andesíticas de edad cenozoica. No incluye la realización de un balance de aguas subterráneas

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y DE CALIDAD DE AGUA, EN LOS ACUÍFEROS EL PALMAR, SAIN ALTO Y ÁBREGO, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 2009. Los trabajos contemplaron actualizar el conocimiento del flujo subterráneo y mediciones piezométricas en pozos de la red de monitoreo para elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución de los niveles del agua subterránea. Consideró además la nivelación de brocales y toma de muestra de agua para análisis físico-químico; con la información generada se determinó que los niveles del agua subterránea registraron una recuperación promedio de 0.25 m durante el periodo 2000-2009. El estudio no contempló la actualización del balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual y su disponibilidad.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica totalmente dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), el acuífero se ubica en territorio de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos.

La Sierra Madre Occidental se extiende en parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco. Es un gran sistema montañoso que tiene su origen en el Cenozoico Inferior o Medio, cuando se inició la extrusión de gigantescos volúmenes de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores oscilan entre 1,500 y 1,800 m; en ella predominan rocas ácidas, ricas en sílice, e intermedias. Por su parte, la subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos se caracteriza por sus sierras altas, de 2,300 a 2,700 msnm, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección. Los pisos de los valles son de pendientes suaves, con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos. El drenaje se dirige a través de los valles hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Grande de Santiago. En la zona está representada por un complejo de derrames de composición riolítica que conforman mesetas con las mayores elevaciones de la región, entre las que destacan la Cordillera Cinco Pinos y Sierra de Chapultepec.

Los sistemas de topofomas presentes en el área, son los siguientes: en la parte central predomina un piso amplio de valle, que se encuentra delimitado al norte y oriente por lomeríos con bajadas y una sierra alta con mesetas que es conocida como Sierra de Chapultepec; en la parte occidental se encuentra bordeado por una sierra baja y mesetas escalonadas con cañadas; al sur predominan los lomeríos con bajadas.

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 superficie del acuífero predomina el

clima semiseco templado B₅kw Semiárido, templado, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22 °C. Régimen de lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. Es clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (i), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), es una característica establecida considerando las temperaturas medias anuales del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido. El régimen de lluvia (w), define el comportamiento de la lluvia durante el año, indica la temporada en la que se concentra la mayor cantidad, en este caso es en verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año. El último término (w) indica que su porcentaje de lluvia invernal (cantidad de lluvia que cae en este periodo con respecto a la total anual), varía entre 5 y 10.2.

Al norte y occidente del acuífero, en las zonas topográficamente más altas, representadas por las sierras Chapultepec y Moneda de Cinco Pesos, se presenta un clima de tipo templado subhúmedo C(w0), con lluvias en verano, mesotérmico, es decir, intermedio en cuanto a temperatura.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 7 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Corrales, Leobardo Reynoso, Felipe Ángeles, Mesillas, Milpillas de la Sierra, San Jose de Llanetes y Saín Alto. Con los registros obtenidos para diferentes periodos de años, el más grande 1947-2016 y el más corto 1981-2016, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anuales de **467.0 mm, 15.7 °C y 1,884.6 mm**, respectivamente.

Las mayores precipitaciones se registran en las porciones oeste y suroeste. La precipitación a lo largo del año tiene variaciones considerables, siendo los meses de julio a septiembre los más lluviosos y de marzo a mayo cuando se presentan menores precipitaciones. El periodo de mayor calor se registra de mayo a agosto y enero es el mes más frío. La región presenta hasta 60 heladas al año.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza dentro de la Región Hidrológica No. 36 Nazas-Aguanaval, Subregión Hidrológica El Salado, cuenca del Río Aguanaval, subcuenca Presa

Leobardo Reynoso o del Río Los Lazos. La corriente superficial de mayor importancia es el Río San Francisco, que es afluente del Río Aguanaval, es de carácter intermitente, drena de norte a sur, por la parte central de la zona, hacia la presa Leobardo Reynoso; sus principales afluentes son los arroyos Cerro Blanco y Paso de Arena, que drenan la porción norte de la región. Otra corriente de importancia es el arroyo Ábrego conocido también como Los Lazos, el cual fluye de oeste a este, drenando la porción suroccidental de la zona. Todos los escurrimientos son de régimen intermitente y drenan a la presa Leobardo Reynoso.

La infraestructura hidráulica para el aprovechamiento de las aguas superficiales está representada por algunas presas, de las cuales la más importante es la presa Leobardo Reynoso, que tiene una capacidad de 118 hm³, para el riego agrícola en el acuífero Aguanaval. Otros almacenamientos de menor importancia son las presas San José, que se encuentra localizada al noroeste de la comunidad San Antonio de las Huertas, sobre el Arroyo El Sotolar; la Presa El Saucillo, localizada al norte de la misma comunidad, sobre el arroyo del mismo nombre; la Presa El Valle, que se ubica al Sur de San Antonio de las Huertas y aprovecha las aguas del Arroyo La Noria; todas ellas en la porción suroccidental de la zona; y la Presa Refugio de Ábrego que se ubica al sur del área, en las cercanías de la comunidad del mismo nombre. Estas cuatro presas suman una capacidad de almacenamiento de 1.4 hm³.

3.4 Geomorfología

Las unidades geomorfológicas identificadas en el área se clasifican como valles, lomeríos, mesetas y sierras. El valle presenta una forma irregular alargada, que tiene una orientación NE-SW, con una longitud aproximada de 18 km, ubicado a una altitud entre los 2,130 y 2,200 msnm y está representado por depósitos aluviales con bajo grado de consolidación. La unidad geomorfológica de lomeríos se ubica en la porción norte y sur del valle, está representada por formas de relieve moderado, constituidas por rocas volcánicas representadas por derrames de composición riolítica y esporádicas coladas de basalto. Las mayores altitudes alcanzan 2,250 msnm.

Las mesetas se observan principalmente en la porción sur y oriental del acuífero, están conformadas por derrames riolíticos e ignimbritas y presentan elevaciones de 2,150 a 2,200 msnm; con pendientes abruptas en sus límites laterales. Por último, la unidad de sierras se extiende a lo largo de las porciones norte y occidental del acuífero, con elevaciones que varían de 2,500 a 3,000 msnm; dentro de este conjunto geomorfológico sobresalen las sierras Moneda de Cinco Pesos, Chapultepec y Fresnillo.

Los principales sistemas montañosos están formados por rocas volcánicas ácidas, y están representados por la Sierra de Chapultepec, que presenta elevaciones máximas del orden de 2,950 msnm, delimitando la zona al norte y oriente; y la Cordillera La Moneda de Cinco Pesos, que se ubica al occidente del área y presenta elevaciones de 2,900 msnm. Las elevaciones mínimas, del orden de 2,130 msnm, se presentan en el valle. El patrón del drenaje es del tipo dendrítico. Las características geomorfológicas que se representan en la zona corresponden a una etapa de madurez temprana, caracterizada por mesetas que presentan escarpes y lomeríos producto de la erosión.

4. GEOLOGÍA

El marco geológico regional de la zona en la que se ubica el acuífero está representado por los eventos relacionados con el establecimiento de la Sierra Madre Occidental y la evolución del Terreno Guerrero, que fue definido por Campa et al. (1983), que presentan características litoestratigráficas diferentes. De esta manera, del Terreno Guerrero se presentan unidades metamorfozadas de edad Cretácico, y unidades de origen volcánico del Cenozoico pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Completan la columna unidades de edad cuaternaria que consisten en basaltos y materiales aluviales. La secuencia estratigráfica está conformada por unidades afines del Terreno Guerrero, y una cubierta de rocas ígneas de composición ácida y básica; las rocas cristalinas identificadas sólo afectan a las unidades del Terreno Guerrero.

La unidad más antigua corresponde al Jurásico y está representada por la Formación Chilitos, que consiste de una secuencia vulcanosedimentaria de andesitas y areniscas, foliadas y propilitizadas que afloran en las inmediaciones de Fresnillo y de manera aislada en la porción central del acuífero. Sobreyaciendo discordantemente en la porción noroccidental, se presentan afloramientos de la Formación Mezcalera que consiste de una alternancia de arenisca y lutitas de edad cretácica, que lateralmente de interdigitan con el miembro de calizas y lutitas. También del Cretácico ese presenta un paquete de sedimentos de origen marino del Grupo Proaño constituido por grauvacas, lutitas arcillosas, lutitas carbonosas y calcáreas, y calizas; esta unidad está cubierta por la Formación Papantón que es una secuencia de calizas estratificadas y que presentan horizontes de areniscas. Este conjunto estratigráfico se encuentra subyaciendo a la Formación Indidura que consiste en intercalaciones de calizas arcillosas y lutitas calcáreas de estratificación laminar a delgada. También de edad Cretácico es la Formación Caracol, la cual consta de areniscas líticas (grauvacas), con granos finos y medios, grado de redondez que varía de anguloso a subanguloso, dispuestas en capas de espesor delgado y medio, que se intercalan con lutitas calcáreas y calizas arcillosas, estas últimas de estructura lenticular. La unidad se

encuentra conformando frecuentes lomeríos y porciones planas, que por la baja resistencia a la erosión frecuentemente se presentan cubiertos por materiales recientes.

La base de la Formación Mezcalera no aflora, pero ambos miembros están cubiertos discordantemente por rocas clásticas de origen continental, así como por un potente paquete de rocas félsicas del llamado Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental. Dicho grupo aflora ampliamente y hacia su base presenta tobas riolíticas en pseudoestratos de delgados a gruesos: la parte media la constituyen ignimbritas y en la cima están expuestos derrames riolíticos con marcada estructura fluidal asociada a domos. En la sierra de Chapultepec se estima que afloran 800 m de este Grupo Volcánico cuya edad se considera Oligoceno-Mioceno, ya que está cubierto discordantemente por rocas continentales y derrames basálticos del Pleistoceno. Las unidades anteriores están afectadas por pórfidos riolíticos de textura porfídica, intensamente silicificados, caolinizados y argilizados. Dentro de esta etapa volcánica se tiene la unidad que se presenta en forma de domos exógenos y derrames de riolita, en flujos bandeados delgados a medianos, con vesículas elongadas y semicirculares, algunas rellenas de calcedonia, que cubren al paquete de ignimbritas y riolitas y a la Formación Chilitos.

Sobreyace en forma discordante a las unidades anteriores el conglomerado polimíctico de la Formación Santa Inés, conformado por fragmentos de roca volcánica, de edad Mioceno-Plioceno. De la misma edad, pero depositándose en un ambiente de planicie aluvial, se depositaron areniscas-conglomerados polimícticos, integrados por clastos volcánicos de 5 mm a 4 cm de diámetro. También se presentan rocas ígneas intrusivas cuarzo-monzoníticas del Cenozoico que afectan a las calizas cretácicas, y que afloran al norte de la Ciudad de Fresnillo y al sur del poblado Monte Mariana.

El último evento ígneo está representado por emisiones de basaltos calco-alcalinos, al parecer durante una fase distensiva ocurrida durante el Plio-Cuaternario. Se presenta en forma de mesetas, lomas redondeadas y conos cineríticos cuyos taludes y suelos son de color rojizo.

La roca es de textura afanítica con olivino y plagioclasas, en matriz compacta con vesículas rellenas de calcedonia. Cubre discordantemente a las rocas riolíticas del Oligoceno-Mioceno y a las calizas y lutitas del Cretácico Inferior, y está igualmente cubierta por depósitos continentales. Los depósitos aluviales conforman terraza y rellenan las márgenes y cauces de ríos y arroyos, se trata de clastos sin consolidar de muy diversa granulometría, y de arena, limo y arcilla (figura 2). (Cartas Geológico-

Mineras F13-B46 Presa Gobernador Leobardo Reynoso y F13-B36 El Baluarte. Escala 1:50,000, SGM, 2009 y 2010, respectivamente) (figura 2).

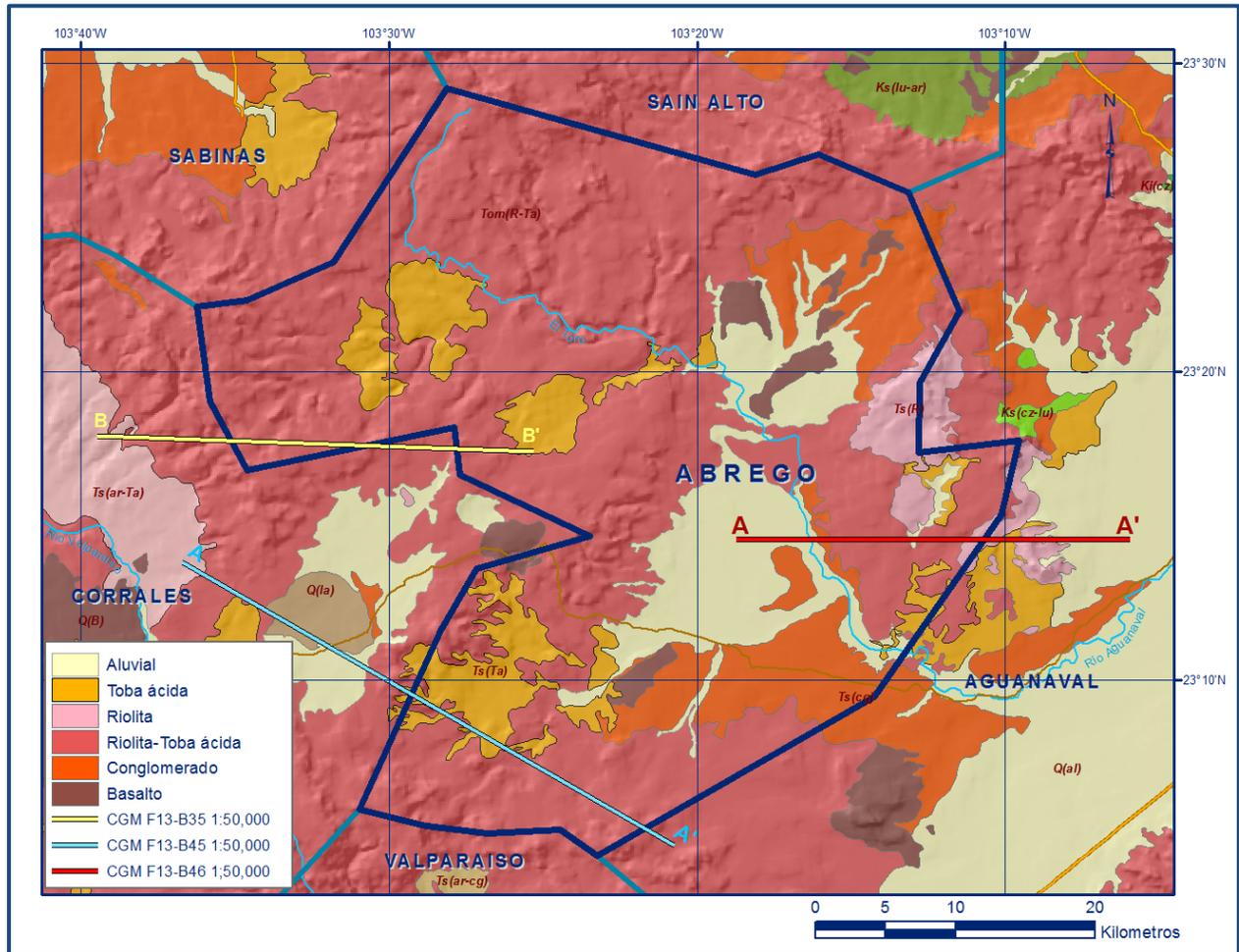


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En la región en la que se ubica el acuífero afloran rocas ígneas y sedimentarias cuyo registro estratigráfico varía del Jurásico al Reciente. Debido a la existencia de los elementos tectonoestratigráficos definidos, la estratigrafía del área presenta diferencias notables en conformación. Por esta razón la descripción de las unidades se realiza de manera separa por elemento.

Terreno Guerrero

Jurásico-Cretácico Inferior

Formación Chilitos

Término informal propuesto por De Cserna (1972) para denominar a una secuencia vulcanosedimentaria conformada por lavas masivas y almohadilladas de composición

basáltica-andesítica, con intercalaciones de rocas sedimentarias, vulcanoclásticas y calcáreas, metamorizadas en facies de esquistos verdes, que cabalgan a la Formación Zacatecas, cuya edad tentativamente se le asignó al Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Esta unidad es la principal receptora de los yacimientos de oro, plata y polimetálicos. Posteriormente Cuevas (1977) lo propuso informalmente y utilizado por el Consejo de Recursos Minerales (CRM, 1991), para denominar la secuencia de material vulcanosedimentario metamorfoseado que aflora 2.5 km al sur de la ciudad de Fresnillo Zac. En dichos afloramientos, la unidad se compone de lavas y aglomerados de composición basáltica y andesítica que se intercalan con limolitas, areniscas, lentes de margas, calizas y lutitas; todo el conjunto de estos materiales exhibe un metamorfismo regional de bajo grado. Las rocas volcánicas exhiben una estructura de tipo almohadillada (pillow lavas), de textura porfídica conformada por cristales de plagioclasas y ferromagnesianos. Existen amígdalas rellenas de cuarzo, calcita y calcedonia; la roca se encuentra alterada por cloritización y en menor grado silicificación. Le sobreyace una secuencia de areniscas (grauvacas), que en su porción intermedia contiene capas de calizas y lutitas carbonosas, y que se ha denominado grupo Proaño (CRM, 1998). No se ha medido el espesor de esta secuencia, sin embargo, López R. (1985) estima que éste supera los 700 m.

La columna litológica de la Formación Chilitos se encuentra sobreyaciendo, por medio de falla inversa a sedimentos calcáreos probablemente del Cretácico Superior, en tanto que en la columna descrita por López R. (op. cit.) se encuentra sobreyacida por las calizas de mar abierto de la Formación Tamaulipas Superior. Su edad, de acuerdo con el CRM (1998) varía del Kimmeridgiano al Valanginiano; edad que ha sido extendida hasta el Hauteriviano, con base en la presencia de las amonitas *Distoloceras mexicanoceras* y *Distoloceras taraisites* (López R., op. cit.). Por su posición stratigráfica, esta unidad se correlaciona con las formaciones jurásicas La Casita y la Caja que afloran en el sector de la Sierra de Parras, así como con la Formación Taraises del Cretácico Inferior, la parte superior de la unidad puede corresponder en tiempo y espacio con la Formación Tamaulipas Superior.

Cuenca Mesozoica del Centro de México

Cretácico Inferior

Grupo Proaño

Nombre propuesto informalmente por De Cerna en 1976, para designar un paquete de sedimentos de origen marino, localizados en las inmediaciones de la ciudad de Fresnillo, Zac. En la región aflora en las inmediaciones de Plateros y Fresnillo. López R. (1985) menciona que el Grupo Proaño se compone de tres miembros constituidos de

la base a la cima por 600 m basales de grauvacas y lutitas arcillosas; la parte media consta de 180 m de espesor de lutitas carbonosas y calcáreas; el miembro superior lo componen 300 m de grauvacas, lutitas y calizas. La cartografía elaborada por el SGM (1998), presenta a esta unidad en contacto tectónico con la Formación Chilitos, la cual le sobreyace a través de una falla de cabalgadura, en tanto que, al norte de Fresnillo, la relación que guarda con la unidad superior correspondiente con las calizas de la Formación Papantón no se encuentra definida, sin embargo, de acuerdo a su posición estratigráfica se considera que es de carácter concordante.

Formación Papantón

Término propuesto informalmente por Cuevas (1980), para designar al conjunto litológico compuesto, de manera general, por una secuencia de calizas de estratificación delgada, media, gruesa y en ocasiones masivas, que en algunos intervalos estratigráficos presentan horizontes de areniscas. Este conjunto estratigráfico presenta sus mejores exposiciones en la porción noreste de la ciudad de Fresnillo; afloramientos más restringidos se observan al sur de la sierra Chapultepec e inmediaciones de Sombrerete.

La Formación Papantón se encuentra constituida por tres miembros: el basal consta de intercalaciones de calizas de capas delgadas (10-15 cm de espesor), con lutitas y areniscas de estratificación laminar y delgada (menor de 20 cm); las calizas son de color gris con lentes y bandas de pedernal negro, los sedimentos arcillosos forman paquetes hasta de 10 cm de espesor y muestran un color gris oscuro; las areniscas son de capas delgadas (20 cm) y de color ocre amarillento. La parte media de la unidad consta de calizas de estratificación delgada a masiva (10 cm a 2 m), de color gris que intemperiza a color rosa y rojizo; con esporádicas interestratificaciones de paquetes de 10 a 20 cm de espesor de lutitas que presentan estructura laminar y algunos nódulos de pedernal. El miembro superior está compuesto por calizas de estratificación delgada a masiva, de color gris claro y rojizo; presentan nódulos y lentes de pedernal, que se intercalan con estratos laminares y delgados de areniscas y lutitas.

En general la unidad se encuentra afectada por un fuerte plegamiento e intrusión, lo cual impide la observación plena de sus características litológicas, así como su espesor, sin embargo, CONAGUA (1993), estima que sobrepasa los 500 m. Las relaciones estratigráficas de la Formación Papantón deben ser concordantes con la unidad inferior, representada por el Grupo Proaño. Subyace concordantemente a la Formación Indidura; Cuevas (op. cit.), en la localidad tipo de la unidad, reporta la presencia de *Turrilites schencheerianus*, *Crinóceras s.p.*, *Calciesferula innominata*,

Pithonella ovalis, *Pithonella trejoi* y *Rotalipora s.p.*, fósiles que le asignan un rango de edad Albiano-Cenomaniano, correlacionable con la Formación Cuesta del Cura. Es importante hacer mención que la posición paleogeográfica de la zona de estudio, se ubica en la transición de facies entre la cuenca post-arco al sureste y la cuenca del Centro de México al noreste (Pacheco y otros, 1988), por lo que la Formación Taraises puede estar representada en el occidente del sector cartografiado por la parte superior de la Formación Chilitos.

Cretácico Superior

Formación Indidura

Unidad definida por Imlay en el año de 1938, en los afloramientos localizados en la porción central de la Sierra de Parras, Coah. En la zona sus afloramientos son restringidos y consisten de una secuencia de intercalaciones de calizas arcillosas y lutitas calcáreas de estratificación laminar a delgada hacia la cima, además se intercalan calizas de capas delgadas a gruesas, el color de las rocas varía de gris a gris oscuro e intemperiza en gris claro pardusco, en ocasiones verdoso. Generalmente esta unidad se presenta con abundantes pliegues debido a su naturaleza plástica, es de fácil erosión y las lutitas son muy fisiles. 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; de manera local descansa de manera concordante y transicional sobre la Formación Papantón, y subyace a 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

Definida por Imlay en 1937, en afloramientos expuestos en el Arroyo el Caracol, ubicado en la porción central de la Sierra de Parras, Coah. Esta formación se distribuye ampliamente en el sector nororiental del área estudiada, teniendo sus mejores exposiciones al poniente del poblado de Cañitas de Felipe Pescador, en tanto que sus afloramientos más restringidos se encuentran expuestos al noroeste del acuífero en donde conforman lomeríos y porciones planas, que por la baja resistencia a la erosión frecuentemente se presentan cubiertos por materiales recientes. La Formación Caracol consta de areniscas líticas (grauvacas), con granos finos y medios con grado de redondez que varía de anguloso a subangulosos, se disponen en capas de espesor delgado y medio, y se intercalan lutitas calcáreas y calizas arcillosas, estas últimas de

estructura lenticular. Los colores de la roca son gris oscuro y negro que por intemperismo cambia a gris claro verdoso y amarillo ocre.

Sobreyace de manera transicional y concordante a la Formación Indidura, en tanto que su cima no se observa, aunque generalmente se encuentra cubierta por depósitos continentales del Cenozoico y Cuaternario o por derrames volcánicos cenozoicos. Su estratificación ondulante indica una deposición 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. Por su posición estratigráfica y contenido fósil, se le asigna una edad Coniaciano-Maastrichtiano.

Cenozoico

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. Sus afloramientos fueron identificados por el CRM (1998), en las inmediaciones de la ciudad de Fresnillo, asociados a la presencia de rocas marinas cretácicas. Condiciones similares se observan bordeando los cerros de calizas en las inmediaciones de San José de La Parrilla, por lo que se optó por asociarlos a esta unidad. Está representada por depósitos continentales constituidos por fragmentos bien redondeados de calizas y pedernal, compactos y de color gris rojizo. En el área del acuífero se estima que su espesor máximo es de aproximadamente 250 m. Su edad se considera del Eoceno-Oligoceno, debido a su posición estratigráfica y origen, el cual se relaciona con los primeros depósitos continentales, formados como consecuencia de la emersión del continente generada por la Orogenia Laramide.

Terreno Sierra Madre

Ignimbritas y riolitas

Con este nombre se identifica a un grupo de flujos piroclásticos soldados (ignimbritas), asociados con flujos de lava riolítica que se encuentran aflorando en las porciones sur y noroccidental del acuífero, que se asocian Serie Volcánica Superior de la Sierra Madre Occidental, que en la carta geológica Fresnillo el SGM (op. cit.) reporta en las Sierras de Chapultepec y Fresnillo, constituidas por ignimbritas, derrames riolíticos y tobas, secuencia de rocas que conforman espesores de 600 a 800 m. La edad asignada a este conjunto de rocas volcánicas en la carta referida es Oligoceno- Mioceno.

Las ignimbritas presentan color gris o pardo con un aspecto masivo, frecuentemente con oquedades o vesículas producidas por la alteración de los feldespatos, además de un incipiente bandeamiento; en una matriz afanítica, aunque es posible observar fragmentos de pómez aplanados. Las ignimbritas están emplazadas en forma de cuerpos tabulares de unos cuantos metros de espesor, que conforman mesetas de escasa altura con un fracturamiento vertical intenso que da lugar a los típicos escarpes de ignimbritas. Las riolitas se caracterizan por presentar estructura fluidal, en ocasiones en forma de bandas muy finas, de color rosa grisáceo o rosa pardusco, con pequeñas vesículas producidas por el escape de gases; con matriz afanítica que contiene abundantes fenocristales de cuarzo y en menor proporción plagioclasas. Su espesor estimado es de aproximadamente 100 m, los más potentes se observan en las áreas donde se presentan los derrames de riolitas asociadas a las estructuras dómicas. Esta unidad se puede observar entre la comunidad El Refugio de Abrego, el cerro La Daga y la comunidad La Salud, y en afloramientos de mediana extensión al noreste de la comunidad Felipe Ángeles.

Pórfido riolítico

Contemporánea a la actividad que dio origen a la secuencia de riolitas e ignimbritas, tuvieron lugar las intrusiones hipabisales ácidas e intermedias que afectaron a la secuencia e influyeron en los procesos mineralizantes de la región (SGM, 1997). Por otro lado, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (1996), menciona que, en el Cerro la Bufa, localizado al norte de la Ciudad de Zacatecas, se encuentra un domo riolítico de textura fluidal, el cual está expuesto en una distancia vertical de 40 m, y visto en planta abarca una superficie de 1150 x 100 m, en el área del acuífero afora al este de la Presa Leobardo Reynoso y al sur del poblado San José del Alamito.

Conglomerado Polimíctico

Formación Santa Inés

El término formacional de esta unidad fue propuesto por Pantoja (1963) para designar a las rocas conglomeráticas de origen continental que afloran en las cercanías de San Pedro El Gallo, Dgo. En la región se encuentran distribuidas en la mayor parte de las sierras formadas por rocas volcánicas cenozoicas (series volcánicas inferior y superior). Está constituida por conglomerados de rocas volcánicas, que en su contacto con las rocas subyacentes presenta capas arenosas de color rojizo, así como limos de color blanquecino, secuencia que paulatinamente cambia a conglomerados hacia la cima. Los constituyentes del conglomerado presentan fragmentos cuya granulometría varía desde arenas hasta bloques de 50 cm de diámetro, el grado de redondez varía de redondeado a subredondeado, el cementante es escaso, aunque en ocasiones puede

estar bien cementado; generalmente presenta matriz arenosa y la compactación varía con la profundidad del material, por lo que en superficie se presenta con baja compactación.

El espesor de la unidad es muy variable y depende de su distribución geográfica; los espesores mínimos se encuentran en las bases de las sierras, en tanto que en las porciones más bajas del valle su espesor rebasa los 300 m. De acuerdo con su génesis y características litoestratigráficas, a esta unidad se le considera una edad Plioceno-Pleistoceno, aunque si se considera que los basaltos interestratificados son del Paleógeno, su edad puede abarcar desde el Mioceno. Por la similitud litológica y relación estratigráfica, estos depósitos se correlacionaron con la Formación Los Llanos, asignándole una edad correspondiente al Plioceno Tardío.

Cuaternario

Basaltos

Las rocas de esta unidad se encuentran expuestas en pequeños afloramientos en la porción poniente, sur y suroeste del acuífero, cerca de los poblados Vicente Guerrero y Urite. Por su constitución litológica, se les clasifica como basaltos de olivino de edad pliocuaternaria asociados con conos cineríticos que cubren a las rocas volcánicas cenozoicas.

Depósitos Aluviales

Los sedimentos que coronan la secuencia estratigráfica de los valles de la cuenca alta del río Aguanaval, están representados por materiales aluviales depositados en cauces de arroyos, abanicos, depósitos de talud y suelos residuales. Los suelos residuales se encuentran distribuidos en toda el área de estudio, presentando su mayor exposición en la porción central del valle. Los depósitos aluviales en los cauces de arroyos están conformados por fragmentos de diversos tamaños, cuya composición es también heterogénea, distinguiéndose fragmentos de calizas, rocas volcánicas félsicas, intermedias y máficas, generalmente no consolidados. Los abanicos aluviales se desarrollan principalmente en las desembocaduras de las cañadas orientadas hacia el valle. La granulometría y composición de los constituyentes es heterogénea ya que varía de limos a bloques, presentando fragmentos de la mayoría de las rocas preexistentes. Los taludes se distribuyen en los flancos de las porciones montañosas y se componen de fragmentos subredondeados y redondeados, de tamaño y composición muy variable; de compactación baja a media, que presentan alto grado de porosidad. Aflora ampliamente en los alrededores de los poblados El Rosario, La Florida y al noreste del río San Francisco.

4.2 Geología estructural

Gran parte de los rasgos estructurales de las rocas mesozoicas, derivados de una tectónica compresiva, dentro de la Cuenca Alta del Río Aguanaval, se encuentran enmascarados por la cubierta volcánica cenozoica, en donde la complejidad estructural de la región, asociada con la sobreposición de los terrenos tectónicos Guerrero y Parral sobre el terreno Sierra Madre se encuentra en localidades aisladas. Dentro del área de estudio, las estructuras generadas por los efectos de la Orogenia Laramide están representadas por los afloramientos de rocas sedimentarias cretácicas, expuestos en la Sierra Chapultepec e inmediaciones de la ciudad de Fresnillo. La carpeta sedimentaria en estas localidades presenta abundantes pliegues recostados principalmente al NE, en donde sus planos axiales se encuentran orientados en una dirección N20° a 30°W; geoméricamente corresponden con pliegues estrechos y elongados (tipo chevron), con un buzamiento general al SE.

Por otra parte, la presencia de una falla de cabalgadura al sur de Fresnillo cuya orientación es N74°E representa el cabalgamiento del Terreno Guerrero (Formación Chilitos) sobre la Secuencia Mezcalera (Terreno Parral), representada por rocas calcáreas arcillosas del Cretácico Superior. Se estima que la continuación de esta cabalgadura hacia el poniente del área con un trend sensiblemente E-W establece el límite tectónico entre los Terrenos Guerrero y Parral (CRM, 1998). A su vez la falla de cabalgadura que establece el límite tectónico entre los Terrenos Parral y Sierra Madre se localiza al norte del acuífero, presentando una orientación N60°W. Sin embargo, las estructuras que predominan en la zona, corresponden con un conjunto de fallas y fracturas asociadas a un evento distensivo, las cuales configuraron el bajo estructural de la Cuenca Alta del Río Aguanaval, así como una serie de pequeñas depresiones orientadas en una dirección NNW, las cuales se unen al valle en su borde noroccidental. Dentro del conjunto de estructuras, destacan las tendencias preferenciales de fracturamiento en las direcciones EW, N30°-40°E y N10°E; la segunda concentración de fracturas guarda un paralelismo con la orientación de la fosa principal de hundimiento (graben), en tanto que las dos concentraciones restantes se pueden considerar como un sistema conjugado dentro del esquema distensivo.

La interpretación estructural está relacionada con los procesos tectónicos que afectaron la región occidental y la Cuenca mesozoica del Centro de México. Durante el Jurásico Superior se establecen dos facies de depósitos, una marina y otra continental, ambas alternando con rocas volcánicas dentro de un régimen tectónico constituido por un sistema de fosas y cuencas asociadas a una zona de subducción hacia el poniente del Estado de Sinaloa, dando origen a una cuenca post-arco en la

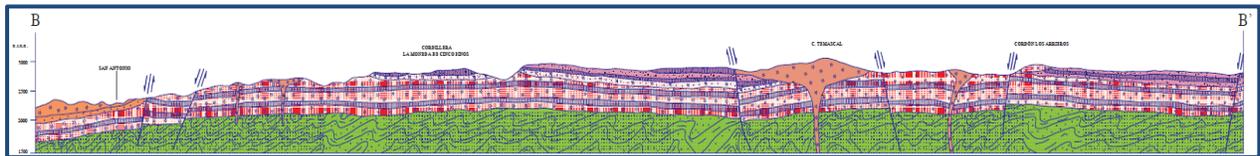
región de Fresnillo. En el Jurásico Inferior se ha reportado la presencia de rocas marinas, donde se forma un arco constituido de andesita-arenisca con horizontes de limolitas de la Formación Chilitos y al mismo tiempo se forma una cuenca restringida. Durante el Jurásico medio-tardío se inicia la subsidencia de la cuenca, provocando una transgresión generalizada, originándose una serie de fosas sujetas a sedimentación de tipo calcáreo-arcillosa sobre un paleorelieve irregular en un ambiente de aguas someras, en el Jurásico Superior el mar se profundiza y favorece el depósito de una secuencia calcáreo-arcillosa. Durante el Cretácico Inferior-Superior se registran eventos geológicos que muestran la acumulación de una etapa de sedimentación calcárea en una cuenca de lento hundimiento y el relleno de material terrígeno sobre sedimentos calcáreos. Hacia el occidente de la cuenca, en la región de Fresnillo, se presenta un cambio de facies arcillosas, de tipo turbidítico, relacionado a rocas volcánicas máficas, que son el reflejo de un arco volcánico que actuó en el poniente desde el Jurásico Superior. La subducción de la corteza oceánica en contra del continente, en una posición casi paralela, dio origen a una actividad volcánica calcoalcalina, que migró hacia el este durante el Cenozoico Inferior. Para el Oligoceno la intensidad del ángulo de la placa fue mayor, retrocediendo el arco hacia el oeste. Como respuesta a esta serie de acontecimientos, la corteza continental sufrió una serie de fragmentaciones, originando un conjunto de fosas y pilares tectónicos, siendo estas zonas de debilidad los conductos preferenciales para la emisión del grueso paquete de ignimbritas-riolitas y el emplazamiento de los cuerpos subvolcánicos de composición riolítica del Oligoceno-Mioceno (Carta Geológico-Minera F13-B46 Presa Gobernador Leobardo Reynoso. Escala 1:50,000. SGM, 2009).

Tectónicamente las rocas presentan deformación compresiva dúctil y frágil. Los anticlinales El Ahijadero y La Leona son manifestaciones de pliegues dúctiles, que también se observan a nivel de afloramiento. Algunas cabalgaduras y fallas inversas intraformacionales no tiene la extensión suficiente para ser cartografiadas, y son producto de una etapa de deformación dúctil-frágil, como es el caso de la falla La Aduana que afecta a rocas del Cretácico Inferior. Al cese del régimen compresivo, inicia un proceso distensivo dúctil, que genera fallas normales y componente lateral. Se interpretaron dos patrones de fallamiento normal, el primero con dirección NW-SE que afecta principalmente a la riolitas-ignimbritas del Oligoceno-Mioceno, acompañado también por fallas de componentes laterales. El segundo tiene orientación NE-SW y afecta al paquete volcánico félsico y a las rocas del Cretácico Inferior. Las fallas normales delimitan fosas y pilares, como los de Chapultepec y Los Cuatillos y las fosas Monte Mariana, Baluarte y Valparaíso, y la semifosa La Casita (Carta Geológico-Minera F13-B36 El Baluarte. Escala 1:50,000. SGM, 2010).

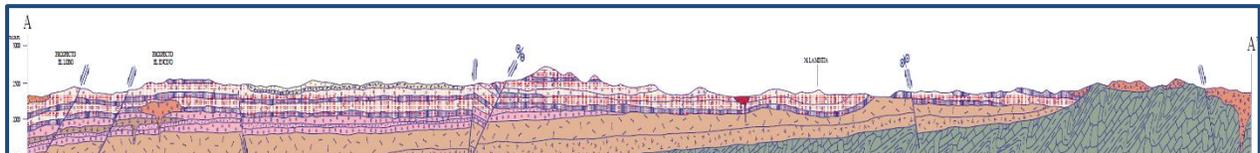
4.3 Geología del subsuelo

Con base en el análisis de la información de las unidades geológicas que afloran en el acuífero, así como de la información proporcionada por los cortes litológicos de pozos y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los depósitos granulares de origen aluvial y fluvial de granulometría variada y conglomerados polimícticos que rellenan los valles tectónicos. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica, entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, y rocas sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. A mayor profundidad las calizas y areniscas representan un acuífero potencial que puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas por lutitas y limolitas.

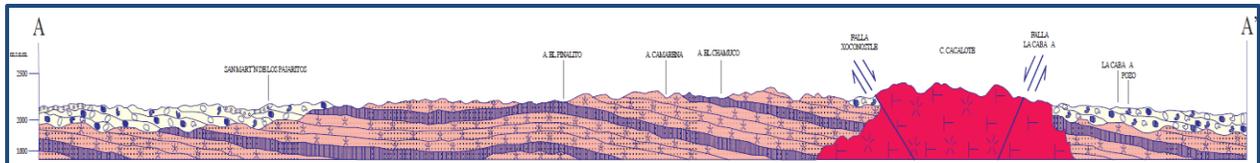
Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento, por rocas vulcanosedimentarias de la formación Chilitos y las rocas arcillosas del Cretácico Inferior y localmente por rocas intrusivas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera F13-B35, "Mesillas". Esc. 1:50,000 (SGM, 2001)



Fuente: Carta Geológico-Minera F13-B45, "Corrales". Esc. 1:50,000 (SGM, 2001)



Fuente: Carta Geológico-Minera F13-B46, "Gobernador Leobardo Reynoso". Esc. 1:50,000 (SGM, 2009)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y piezométrica existente, y por correlación con otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y

constitución geológica, se puede establecer 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 polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar hasta 300 m en el centro del valle tectónico. 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 puede presentar condiciones de semiconfinamiento, debido a que están sobreyacidas y alternadas con lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

No existe información de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en este acuífero. Sin embargo, se pueden adoptar los valores de 75 pruebas de corta duración en etapas de abatimiento y recuperación, realizadas en estudios previos en el acuífero vecino Aguanaval, que tiene el mismo origen, evolución y constitución geológica. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **5.0×10^{-4}** a **$13.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , predominando valores mayores a $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; si consideramos un espesor saturado promedio de 200 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **2.5×10^{-6}** a **$6.75 \times 10^{-5} \text{ m/s}$** (**0.2** a **5.8 m/d**).

Adicionalmente, se cuenta con información de 15 aforos realizados en los últimos años, mediante los cuales se obtuvo el caudal específico (Q_e), como una estimación aproximada de la transmisividad (T), según la relación siguiente: $Q_e \text{ (lps/m)} \approx T (\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s})$. Los valores obtenidos varían de **0.5** a **2.0 lps/m**, los valores máximos se presentan en la región centro-occidental del acuífero, y los valores más bajos se presentan en las cercanías de las comunidades El Jagüey y La Blanquita.

Para el caso del rendimiento específico, atendiendo el tipo y características de los materiales que constituyen el subsuelo de la región, se adoptó un valor de **0.07**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada por la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2016, que es el que tiene mayor y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2016 mostró valores que varían, de manera general, de 30 a 100 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde la porción suroriental del acuífero, en la zona aledaña a la presa Leobardo Reynoso, hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan. Los niveles estáticos menos profundos, de 30 a 40 m, se presentan en la zona noroccidental de la presa; en tanto que los más profundos, de 90 a 100 m, se registraron en la región occidental y norte del área de explotación, hacia las localidades Vicente Guerrero y El Centro, respectivamente (figura 4).

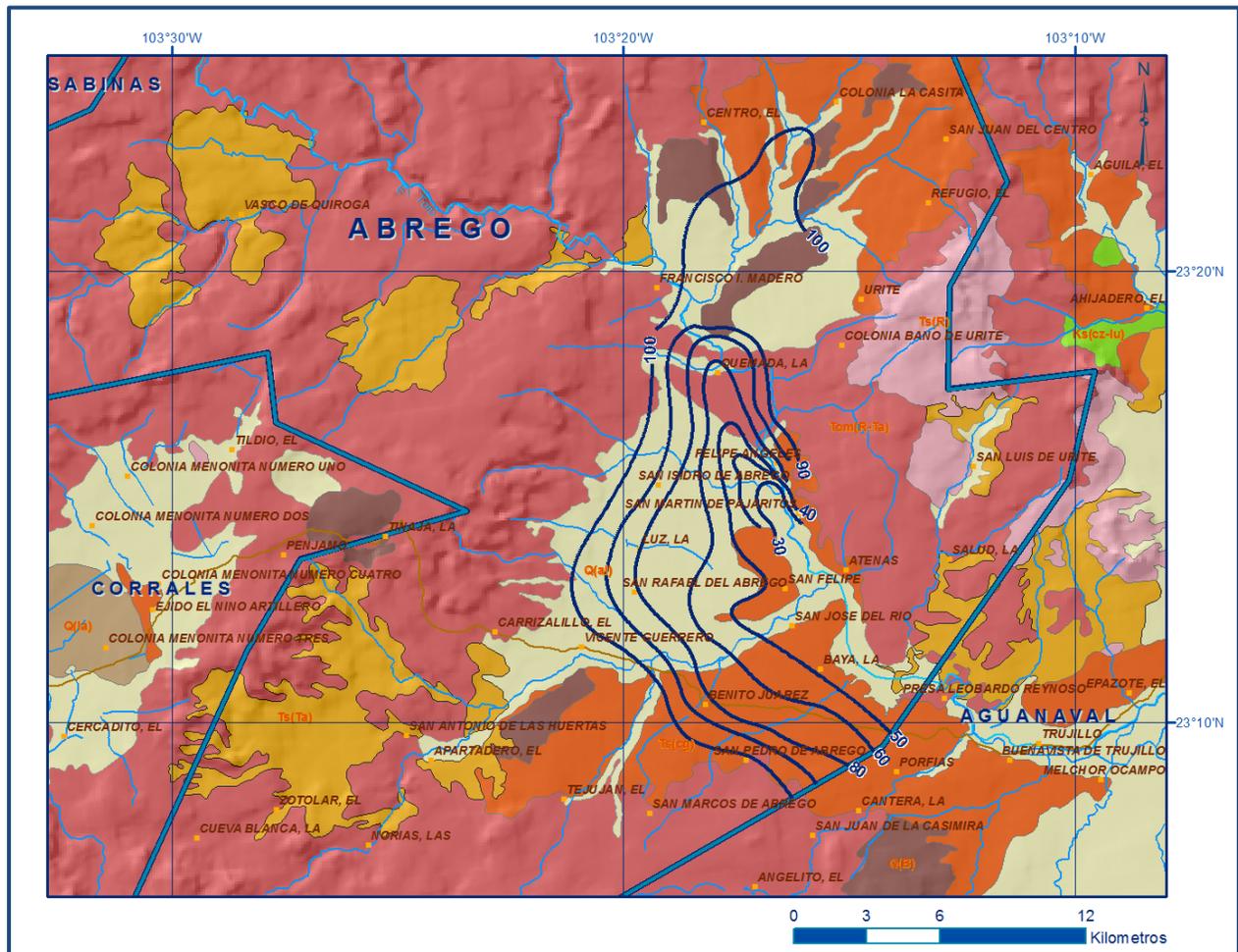


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2016)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2016 se registraron valores que variaron de 2,115 a 2,090 msnm, los cuales decrecen gradualmente desde los cuatro puntos cardinales hacia el valle aluvial localizado en la región central,

drenando a través de los materiales subálveos del cauce del río San Francisco, mostrando de esta manera una red de flujo radial y concéntrica hacia la presa Leobardo Reynoso. Las menores elevaciones, de 2,090 a 2,100 msnm, se registran en la zona que rodea a la presa y se incrementan hacia los flancos de las sierras limítrofes. Los valores más altos de carga hidráulica se presentan en las regiones norte y occidental, asociados a la topografía del terreno, al igual que los valores de profundidad al nivel estático (figura 5).

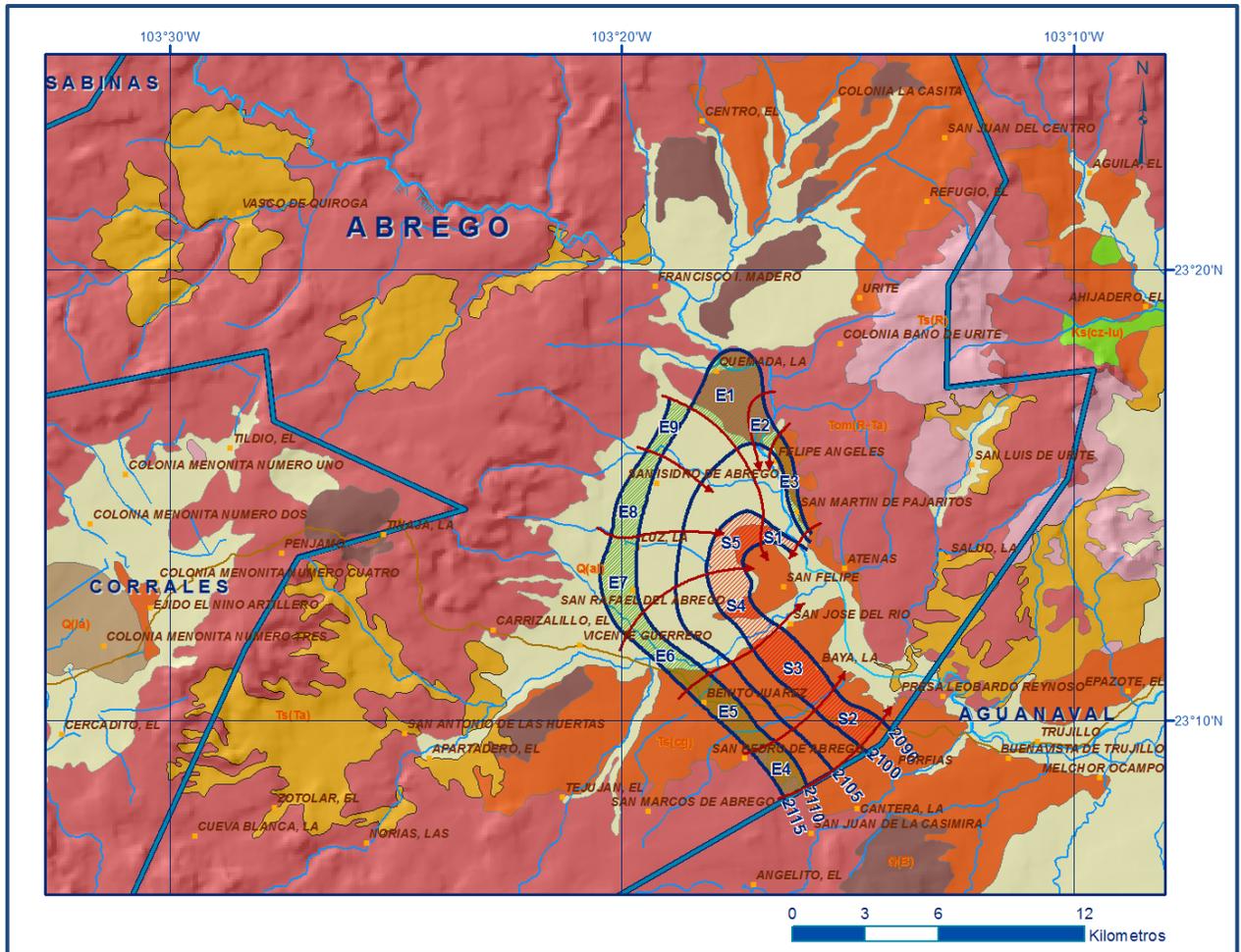


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2016)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2016 registró valores de abatimiento en la zona de explotación, que varían de 6 a 1 m, es decir 0.9 a 0.1 m anuales, que se incrementan de la porción central hacia los flancos de las sierras. Los valores máximos se presentaron en los alrededores de las comunidades La Florida y Santo Niño, y los menores en toda la periferia localizada entre los poblados San Pedro de Ábrego, Benito Juárez, Vicente Guerrero, San Rafael del Ábrego, San Isidro de

Ábrego y La Quemada. Valores medios de 4 a 5 m, 0.6 a 0.7 m anuales, se observaron en zona ubicada entre las comunidades El Refugio de Ábrego, San Felipe y San José del Río. En la mayor del acuífero no se registraron cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

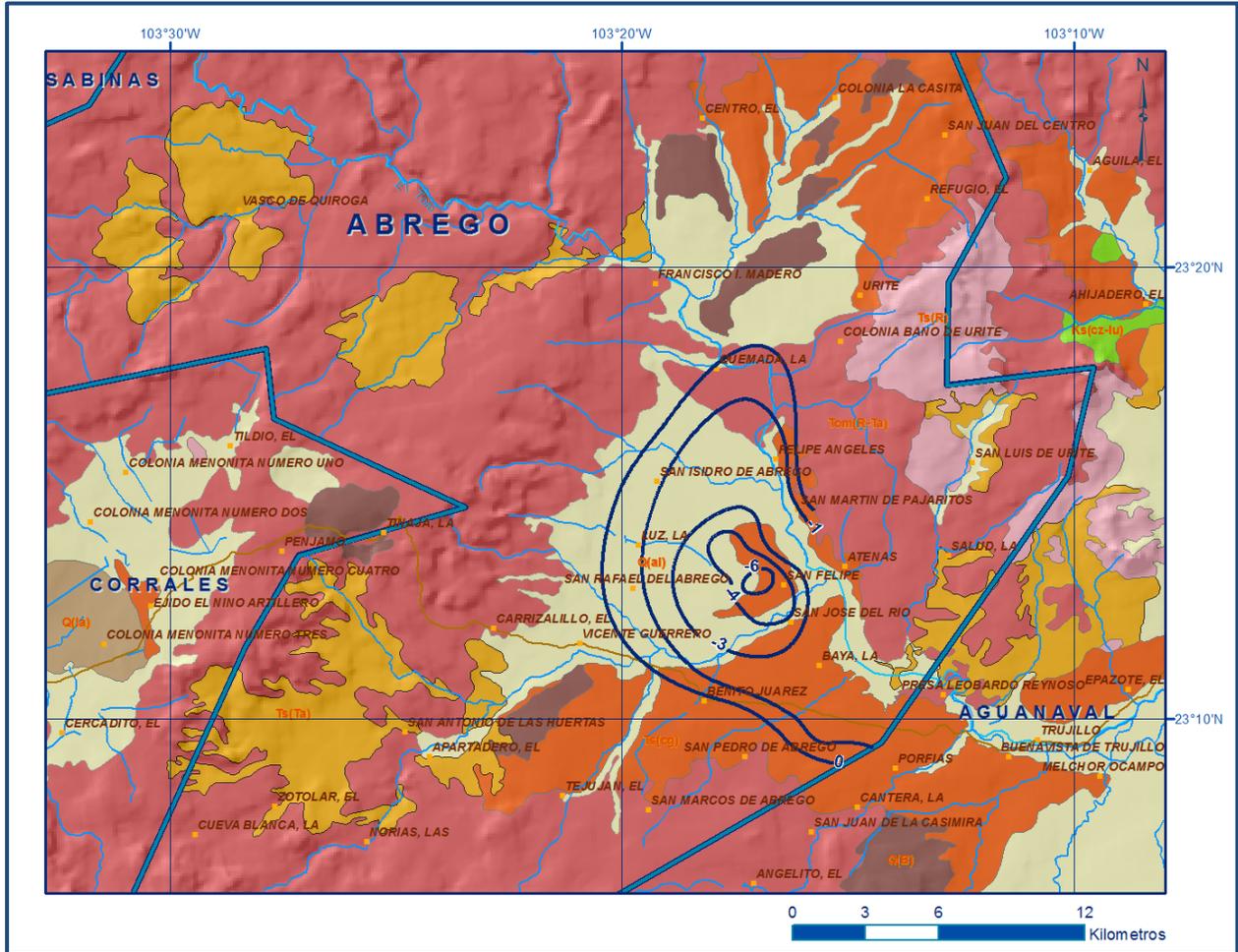


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2016)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizado en 2009, se tomaron 11 muestras de agua subterránea, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD), potencial de hidrógeno (pH), dureza total, alcalinidad, así como iones principales y flúor. En cuatro de ellas se determinó la concentración de arsénico, mercurio y cianuro. Adicionalmente se tomaron tres 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 los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determina que los valores de concentración de SDT varían de 164 a 403 mg/l, que no superan 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. De acuerdo con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica son inferiores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y presentan valores extremos de 146 a 570 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de SDT y conductividad eléctrica se registran en la porción central y oriental, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Las temperaturas registradas varían de 21.4 a 30.9 °C, en tanto que el pH medido fluctúa entre 7.3 a 8.24. La concentración de fluoruro rebasa el LMP establecido por la norma referida en 5 de las 14 muestras tomadas.

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 más abundante es la bicarbonatada-sódica-potásica ya que se presentó en 11 aprovechamientos analizados, que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas ácidas. Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayoría de las muestras de agua se clasifican como 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; solo 3 muestras presentaron clasificación de agua con salinidad baja C_1S_1 , baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable, que también es apta para el riego agrícola.

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 2009 y complementada con información 2017 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), se tienen registradas un total de 140 obras que aprovechan el agua subterránea, 134 son pozos y 6 norias; todas están activas. Del total de obras, 87 se destinan al uso agrícola y 53 para uso público-urbano.

El volumen de extracción asciende a **25.7 hm³ anuales**, de los cuales 25.4 hm³ (98.8 %) se destinan al uso agrícola y 0.3 hm³ (1.2 %) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2009-2016, en una superficie de **101.0 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:

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

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

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

7.1 Entradas

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

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 (R_i). Debido a que el volumen de agua subterránea para uso público-urbano es pequeño, para el balance de aguas subterráneas sólo se considera la recarga incidental originada por los retornos del riego agrícola.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

$$R_v + E_h + R_i - B - S_h = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v = Recarga vertical

E_h = Entradas por flujo subterráneo horizontal

R_i = Recarga Incidental por retornos de riego

B = Bombeo

S_h = Salidas por flujo subterráneo horizontal

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

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

$$R_v = B + S_h + \Delta V(S) - E_h - R_i \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas 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 la llanura y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2016 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

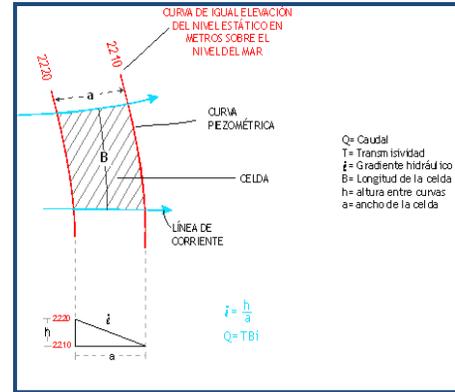
Donde:

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 **11.6 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2016)

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	2890	3940	10	0.0025	0.0020	0.0147	0.5
E2	1600	1220	10	0.0082	0.0020	0.0262	0.8
E3	3960	470	10	0.0213	0.0010	0.0843	2.7
E4	2200	1100	5	0.0045	0.0010	0.0100	0.3
E5	3650	1100	5	0.0045	0.0020	0.0332	1.0
E6	3400	950	5	0.0053	0.0030	0.0537	1.7
E7	3680	1360	5	0.0037	0.0040	0.0541	1.7
E8	3750	1000	5	0.0050	0.0030	0.0563	1.8
E9	2300	650	5	0.0077	0.0020	0.0354	1.1
TOTAL							11.6

7.1.3. Recarga incidental (R_i)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que 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, dependiendo de la profundidad al nivel estático, de las características del suelo y de las condiciones climáticas.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se considera que el 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea en las

zonas agrícolas que varía de 30 a 70 m y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera, si para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 25.4 hm³ de agua subterránea; al aplicar el 10% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 2.5 hm³ de los excedentes del riego. Por tanto, **Ri = 2.5 hm³ anuales.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B), y en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh).

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 **25.7 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 2016, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal asciende a **5.4 hm³ anuales.**

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2016)

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	1500	500	10	0.0200	0.0020	0.0600	1.9
S2	2300	1150	10	0.0087	0.0010	0.0200	0.6
S3	3350	1560	10	0.0064	0.0010	0.0215	0.7
S4	3300	1200	10	0.0083	0.0015	0.0413	1.3
S5	2700	1400	10	0.0071	0.0015	0.0289	0.9
TOTAL							5.4

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 2009-2016 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.07, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS = Cambio de almacenamiento en el período analizado

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

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

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

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -13.8 hm^3 , es decir, un promedio anual de **-2.0 hm^3 anuales**.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2016)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-6	-6	0.9	0.07	-0.4
-4 a -6	-5	6.1	0.07	-2.1
-3 a -4	-3.5	15.2	0.07	-3.7
-1 a -3	-2	46.7	0.07	-6.5
0 a -1	-0.5	31.9	0.07	-1.1
	TOTAL	100.8	TOTAL	-13.8
	Promedio anual			-2.0

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:

$$R_v = B + Sh - \Delta V(S) - E_h - R_i$$

$$R_v = 25.7 + 5.4 - 2.0 - 11.6 - 2.5$$

$$R_v = 15.0$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 15.0 + 11.6 + 2.5$$

$$R = 29.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como retorno de riego. Para este caso su valor es **29.1 hm³ anuales**, de los cuales 26.6 hm³ son recarga natural y 2.5 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 **5.4 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas por flujo subterráneo que tienden a descargar hacia la presa Leobardo Reynoso y hacia el acuífero Aguanaval.

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 **20'542,018 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea que 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 29.1 - 5.4 - 20.542018 \\ \text{DMA} &= 3.157982 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **3'157,982 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2009. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Ábrego, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua. 2009. Reactivación de redes de monitoreo piezométrico y de calidad del agua en los acuíferos El Palmar, Saín Alto y Ábrego, en el estado de Zacatecas. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C.

Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2018. Piezometría e hidrometría del acuífero Ábrego, Zacatecas.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Valparaíso, estado de Zacatecas. Realizado por Servicios Geológicos S. A.

Servicio Geológico Mexicano, 2001. Carta Geológico-Minera F13-B35 "Mesillas". Escala 1:50,000

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

Servicio Geológico Mexicano, 2009. Carta Geológico-Minera F13-B46 "Presidencia Leobardo Reynoso". Escala 1:50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2010. Carta Geológico-Minera F13-B36 "El Baluarte". Escala 1:50,000.