

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO AGUANAVAL (3214), ESTADO DE
ZACATECAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	5
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	6
3	FISIOGRAFÍA.....	8
3.1	Provincia fisiográfica.....	8
3.2	Clima.....	10
3.3	Hidrografía.....	11
3.4	Geomorfología.....	12
4	GEOLOGÍA.....	12
4.1	Estratigrafía.....	15
4.2	Geología estructural.....	23
4.3	Geología del subsuelo.....	25
5	HIDROGEOLOGÍA.....	26
5.1	Tipo de acuífero.....	26
5.2	Parámetros hidráulicos.....	27
5.3	Piezometría.....	27
5.4	Comportamiento hidráulico.....	27
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	27
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	28
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	30
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	31
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	32
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	32
7.1	Entradas.....	32
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	33
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	33
7.1.3	Recarga incidental (Rr).....	35
7.2	Salidas.....	35
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	35
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	35
8	DISPONIBILIDAD.....	36
8.1	Recarga total media anual (R).....	37
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	37
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	37
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	38
9	BIBLIOGRAFÍA.....	39

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 Aguanaval, definido con la clave 3214 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Zacatecas, entre los paralelos 22°40' y 23°41' de latitud norte y 102°44' y 103°24' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,804 km². Limita al norte con el acuífero El Palmar, al noreste con el acuífero Guadalupe de las Corrientes, al este con Calera, al sur y sureste con Jerez, al suroeste con Valparaíso, al oeste con Abrego y al noroeste con el acuífero Saín Alto, todos ellos pertenecientes al estado de Zacatecas (figura 1).

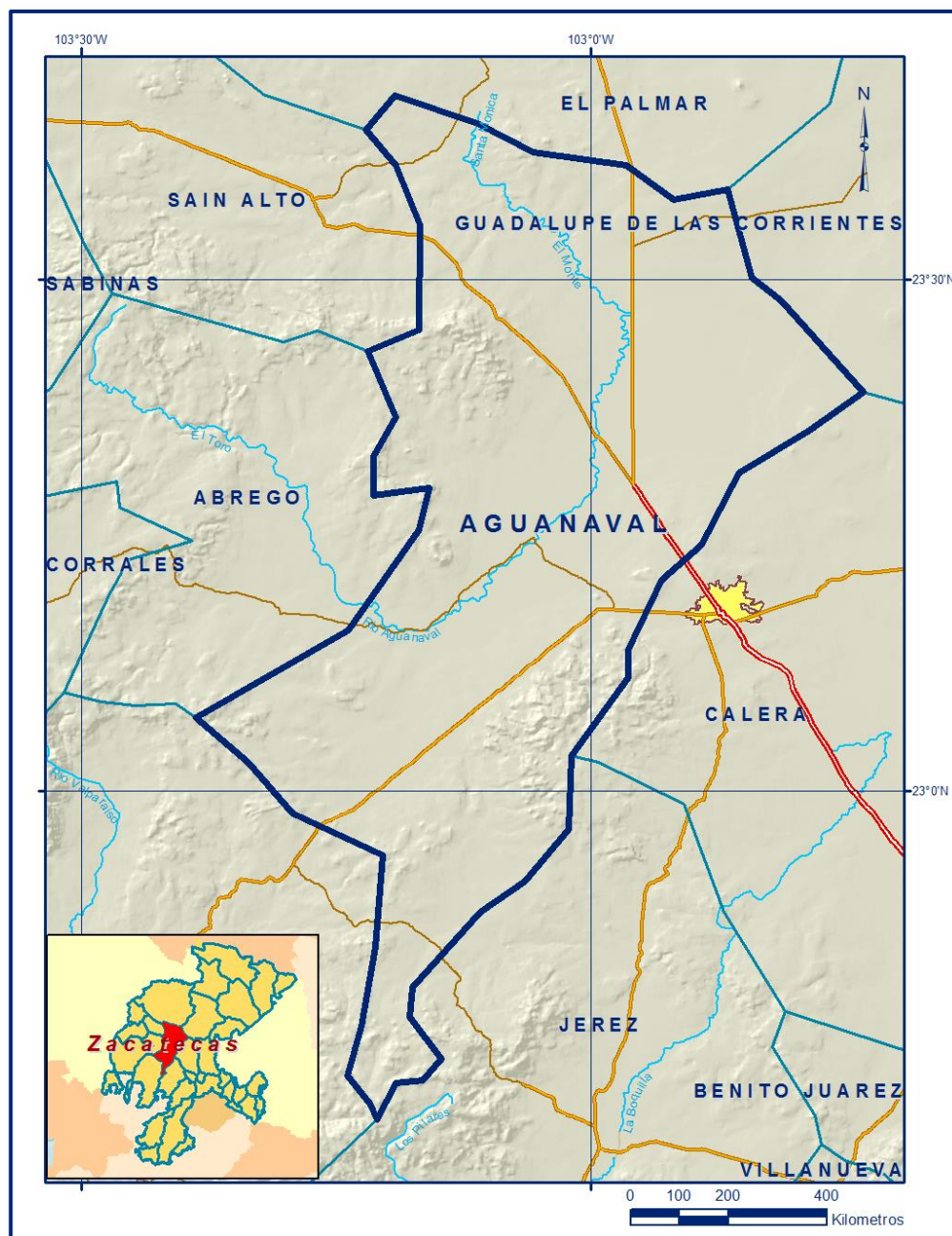


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la mayor parte del área que cubre el acuífero se ubica dentro del municipio Fresnillo, de manera parcial comprende el municipio Saín Alto así como porciones menores de Río Grande, Cañitas de Felipe Pescador, Valparaíso, Jerez y Susticacán.

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 3214 AGUANAVAL						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	14	215	22	43	16.1
2	103	13	315	22	46	10.3
3	103	12	42.1	22	50	51.1
4	103	12	14.9	22	56	14.9
5	103	17	34.1	22	58	40.2
6	103	20	10.9	23	1	43.0
7	103	23	14.5	23	4	17.2
8	103	14	16.0	23	9	27.5
9	103	10	8.0	23	15	21.7
10	103	9	33.1	23	17	46.5
11	103	12	48.4	23	17	22.0
12	103	12	46.8	23	19	38.6
13	103	11	29.7	23	21	57.5
14	103	13	8.3	23	25	49.6
15	103	10	7.7	23	27	5.7
16	103	10	5.2	23	33	14.5
17	103	11	31.1	23	36	44.9
18	103	13	13.4	23	38	50.2
19	103	11	33.1	23	40	49.7
20	103	6	40.2	23	39	13.3
21	103	3	26.1	23	37	29.7
22	102	57	57.7	23	36	45.6
23	102	55	9.9	23	34	43.5
24	102	51	59.1	23	35	18.9
25	102	50	35.1	23	30	9.3
26	102	48	52.9	23	28	48.9
27	102	44	2.3	23	23	26.2
28	102	47	12.7	23	21	10.2
29	102	51	22.4	23	18	40.8
30	102	53	32.1	23	14	27.2
31	102	55	51.7	23	12	23.3
32	102	57	52.0	23	8	17.0
33	102	57	50.5	23	6	39.0
34	103	1	10.1	23	2	4.9
35	103	1	18.9	22	57	44.3
36	103	3	53.9	22	54	42.5
37	103	6	30.4	22	52	54.7
38	103	10	29.9	22	48	27.0
39	103	10	40.9	22	46	45.0
40	103	8	49.0	22	44	14.7
41	103	9	53.2	22	43	2.5
42	103	11	29.5	22	42	51.3
43	103	12	33.7	22	40	42.8
44	103	13	2.9	22	41	40.2
1	103	14	215	22	43	16.1

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero 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 en el estado de Zacatecas. Su territorio completo se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda; en la mayor parte de su superficie rige el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona del Estado de Zacatecas, que comprende la cuenca media del río Aguanaval y otros”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 16 de mayo de 1960, el cual cubre las porciones central y oriental. 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.

En la porción occidental y parte de las regiones norte y sur, está en vigor 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 6 de abril de 1981.

Esta veda es tipo 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 los extremos norte y sur del acuíferos 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 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 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola.

En la superficie del acuífero se localiza parte del Distrito de Riego 034 “Estado de Zacatecas”; los usuarios se encuentran organizados en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero Aguanaval, A.C., instalado el 24 de noviembre de 2000.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios de exploración minera y otros estudios hidrogeológicos de evaluación, algunos de cobertura regional, entre los más importantes y recientes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA CUENCA MEDIA DEL AGUANAVAL, ZAC. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), en el año 1973. Realiza uno de los primeros censos del acuífero, identificando 387 aprovechamientos; incluye además hidrometría de las extracciones, piezometría y la realización de 26 pruebas de bombeo. Concluye que la extracción era de 17 hm³ anuales, que la profundidad al nivel estático variaba de 2 a 60 m, con una dirección preferencial del flujo subterráneo de sur a norte y un abatimiento promedio anual de 0.4 m para el periodo 1971-1973. Se obtuvieron valores de transmisividad de 0.4 a 21.0 x10⁻³ m²/s y coeficiente de almacenamiento que varían de 0.1 a 0.001. La recarga se estimó en 10 hm³ anuales, por lo que la región evaluada mostraba un desequilibrio en su relación recarga-extracción. Recomendaba restringir la perforación de pozos de explotación, continuar con las mediciones piezométricas e instalar dos estaciones de aforo sobre los ríos Chico y Aguanaval, a la altura del Rancho La Soledad, para cuantificar la descarga del acuífero.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA CUENCA MEDIA DEL AGUANAVAL, EDO. DE ZACATECAS. Realizado por Consultores S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en el año 1981. Analiza la constitución geológica del acuífero y mediante sondeos geofísicos determina que el espesor de los sedimentos granulares varía de 100 a 600 m. Determina que, de manera general, a profundidades mayores de 250 m los sedimentos presentan baja resistividad, que se atribuyó al mayor contenido de sedimentos de granulometría más fina. Concluye que el acuífero se encontraba en condición geohidrológica de equilibrio o ligeramente subexplotado.

El agua presentaba bajas salinidades que la hacían apta para el consumo humano y para todos los usos, predominando iones de calcio, sodio y bicarbonatos.

ACTUALIZACIÓN DE ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE AGUANAVAL, ZAC. Realizado por Construcciones Díaz Perez S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en el año 1992. Plantea el balance de aguas subterráneas en una superficie de 430 km², que corresponde con la principal zona de explotación.

Calcula una extracción de 102.0 hm³ anuales y una recarga de 80.3 hm³, con un abatimiento promedio anual de 0.6 m para el periodo 1981-1990 y un coeficiente de almacenamiento regional de 0.1. Menciona que fuera del área de balance existe equilibrio geohidrológico y disponibilidad de aguas subterráneas, especialmente en la porción suroccidental, con amplias planicies potencialmente agrícolas

ESTUDIO PARA LA REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE: CALERA-BENITO JUÁREZ, CHUPADEROS, GUADALUPE BAÑUELOS, CUENCA DEL AGUANAVAL, OJOCALIENTE Y LA BLANCA, EN EL ESTADO DE ZACATECAS. Realizado por Estudios y Proyectos Moro S.A. de C.V. en 1997 para la Comisión Nacional del Agua. Define la red de monitoreo piezométrico, integrada por 45 pozos y propone la perforación de 11 piezómetros localizados en las zonas en las cuales se carece de información.

De esta manera, la red propuesta queda integrada por 56 sitios de medición o nodos, separados entre sí a distancias que varía de 4 a 8 km. Incluye configuraciones de los niveles estáticos para los años 1980 y 1997 con las que se identificaron las zonas de recarga y descarga del acuífero, las áreas de concentración de la extracción y las direcciones preferenciales del flujo subterráneo. Finalmente, con la información piezométrica de años previos, se definen las zonas en las que se presentan los mayores abatimientos, así como otras en las que no se registran cambios en la posición de los niveles del agua subterránea, como ocurría en las zonas localizadas al sur de Rancho Grande y al noroeste de San José de Lourdes.

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO AGUANAVAL, ZAC. Elaborado por Ariel Consultores, S.A. para la Comisión Nacional del Agua, en el año 1999. Como todo modelo de simulación, su objetivo principal simular diferentes escenarios de extracción del acuífero, para conocer su efecto en los abatimientos y con ello proponer el más adecuado para lograr el manejo óptimo del recurso. Mediante el conocimiento de la geología del subsuelo y la geología estructural del acuífero, identifica tres unidades hidrogeológicas y dos tipos de capas almacenadoras de aguas subterráneas: la primera asociada con presencia de sedimentos granulares, y la segunda se asocia con un medio fracturado. Debido a la heterogeneidad de los materiales que constituyen el acuífero, éste se comporta como libre a semiconfinado. Confirma la baja salinidad del agua subterránea, que la hace apta para todos los usos. Mediante el balance de cloruros determina una recarga de 90 hm³ anuales; debido al incremento de la extracción, reporta un incremento en el déficit de la relación extracción-recarga.

PLAN DE MANEJO INTEGRAL DEL ACUÍFERO AGUANAVAL, ESTADO DE ZACATECAS. Realizado Ingeniería y Gestión Hídrica S.C., en el año 2010. Su objetivo fue formular un Plan de Manejo Integrado de los acuíferos Calera, Chupaderos y Aguanaval, que adecue el desarrollo sustentable de la región a la disponibilidad del agua.

Enmarcado en el contexto de la política nacional hidráulica. Recopila información general y entre sus actividades más importantes destacan la caracterización y proyección de la demanda por uso, la proyección del volumen de agua utilizable y el balance integral del agua. El plan de manejo definido establece opciones de manejo de la demanda y de la disponibilidad, así como acciones para las diferentes alternativas o escenario hasta el año 2040, utilizando el modelo de simulación construido previamente. Identifica la conveniencia de invertir alrededor de 1,459 millones de pesos, en el horizonte de planeación al año 2040, los cuales constituyen el creciente costo del agua por efecto de su agotamiento.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO AGUANAVAL, ZACATECAS. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Zacatecas, 2015. Se utilizó la información piezométrica reciente para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

El último estudio y la piezometría obtenida por la Dirección Local Zacatecas, son la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se ubica en la zona de conjunción de dos Provincias Fisiográficas.

La mayor parte de su territorio pertenece a la Sierra Madre Occidental, en tanto que la porción norte y nororiental se ubican en la Mesa Central.

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 las Provincias Fisiográficas Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos, y la provincia Mesa del Centro, Subprovincias Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas y Sierras y Llanuras del Norte.

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.

En el área del acuífero, 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, Sierra de Fresnillo y Sierra de Chapultepec.

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.

En la Subprovincia Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas dominan extensos terrenos áridos con lomeríos en la porción noreste y sierras bajas en la región sureste. En la región suroccidental existen dos llanuras aluviales de extensión considerable, pero lo que caracteriza a esta subprovincia, especialmente a su porción occidental, es la gran llanura desértica que se extiende en territorio del límite entre los estados de Zacatecas y San Luis Potosí, con piso de caliche, que se localiza a una altitud promedio de 2,000 msnm.

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. En esta zona sobresale la presencia de los cerros La Hormiga, El Algodón, La Tinaja, La Quemada y la loma La Cruz.

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 prevalece el clima semiseco templado B_s1kw.

Es clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (1), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura).

Su condición de temperatura (k), es una característica establecida considerando las temperaturas media anual 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 se precipita en este periodo con respecto a la total anual), varía entre 5 y 10.2. 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.

En las zonas topográficamente más altas, como las sierras Chapultepec, Moneda de Cinco Pesos y Fresnillo, así como los cerros Colorado, Pelusas y Campana, el clima es templado subhúmedo C(w0), con lluvias en verano, mesotérmico, es decir, intermedio en cuanto a temperatura.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 6 estaciones climatológicas con influencia en el área del acuífero: Fresnillo, Presa Santa Rosa, Cueva Grande, El Sauz (Presa Leobardo Reynoso), Cazadero y San José de Llanetes. Con los registros obtenidos para el periodo 1980-2009, y utilizando el método de configuración de líneas de igual valor, se determinaron valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial media anual de **443 mm**, **16.3 °C** y **2,000 mm**, respectivamente.

La temporada de lluvias se presenta de manera general de junio a septiembre, con lluvias aisladas en invierno y estiaje de octubre a junio, el periodo de mayor calor se registra de mayo a agosto y enero es el mes más frío. Mayo es el mes de mayor índice de evaporación media y diciembre el de menor.

3.3 Hidrografía

El acuífero se localiza dentro de la Región Hidrológica No.36 Nazas-Aguanaval, en las cuencas Presa Santa Rosa y Presa Cazadero. La porción nororiental se ubicada en la Región Hidrológica No. 37 El Salado, Cuenca Fresnillo-Yescas. El acuífero está alojado en una cuenca topográficamente abierta, de forma irregular, ligeramente alargada con orientación norte-sur. Al este se encuentra delimitada por la Sierra de Fresnillo, al oeste por la Sierra Chapultepec, al sur por la Sierra Los Cardos y al norte por algunos cerros y lomeríos de poca elevación.

La principal corriente superficial es el Río Aguanaval, el cual cruza el acuífero de sur a norte y para finalmente descargar en la Región Lagunera de los estados de Durango y Coahuila. El río es de carácter intermitente con transición a temporal, y tiene como afluentes numerosos arroyos intermitentes y de carácter torrencial, que descienden de las serranías

La Presa Leobardo Reynoso es la de mayor capacidad de la región, con 118 hm³, almacena un volumen 8.5 veces mayor que de la segunda presa más importante, Presa Santa Rosa, que cual tiene una capacidad de 14 hm³.

Dentro de los límites del acuífero se ubican 8 presas, Leobardo Reynoso (Trujillo) Santa Rosa, Carta de los Deberes y Derechos (Cabrales), San Juan Casimira (La Casimira), San Juan de Hornillos (Los Hornos), San Cristóbal de Abajo, El Sauz (Fresnillo) y Guadalupe Trujillo,, que en conjunto suman una capacidad de almacenamiento de 149 hm³, que se utilizan para el riego de 6,457 hectáreas.

La Presa Leobardo Reynoso aporta agua para regar el 75 % de la superficie total beneficiada.

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 80 km, ubicado a una altitud entre los 2,000 y 2,100 msnm y está representado por depósitos aluviales con bajo grado de consolidación.

La unidad geomorfológica de lomeríos se ubica en la porción oriental y norte de la zona, está representada por formas de relieve moderado, constituidas por rocas sedimentarias y volcánicas; las primeras pertenecientes a la secuencia marina del Cretácico que corresponden con calizas, areniscas y lutitas. Las rocas volcánicas están integradas por derrames de composición riolítica y esporádicas coladas de basalto. Las mayores altitudes alcanzan 2,300 msnm.

Las mesetas se observan principalmente en la porción occidental del acuífero, están conformadas por derrames riolíticos e ignimbritas que afloran en la base; en la región noroccidental se asocian a derrames basálticos y rocas sedimentarias cretácicas. Presentan elevaciones superiores a 2,000 msnm, llegando a alcanzar hasta 2,500 msnm, generalmente, en su parte más alta las pendientes son muy suaves, mientras que sus límites laterales son muy abruptos, con pendientes que pueden superar los 40°.

Por último, la unidad de sierras se extiende a lo largo de las porciones occidental y suroriental del acuífero, con elevaciones que varían de 2,500 a los 2800 msnm; dentro de este conjunto geomorfológico sobresalen las sierras Moneda de Cinco Pesos, Chapultepec y Fresnillo. El patrón de drenaje es variable. En las zonas con pendientes abruptas constituidas por rocas volcánicas, el drenaje comúnmente es de tipo dendrítico con un desarrollo moderado. En los cañones es subparalelo con tributarios poco desarrollados; mientras que en las partes más bajas prácticamente no existe, aunque es ocasiones se presentan algunas corrientes intermitentes.

4 GEOLOGÍA

El marco geológico regional de la zona en la que se ubica el acuífero está representado por los eventos relacionados con la conformación de la Sierra Madre Occidental y la evolución del Terreno Guerrero, definido por Campa et al. (1983), que presentan

características litoestratigráficas diferentes. De esta manera, del Terreno Guerrero se presentan unidades metamorizadas de edad Cretácico, y unidades de origen volcánico del Terciario pertenecientes a la Sierra Madre Occidental. Completan la columna unidades de edad cuaternaria que consisten en basaltos y materiales aluviales (figura 2).

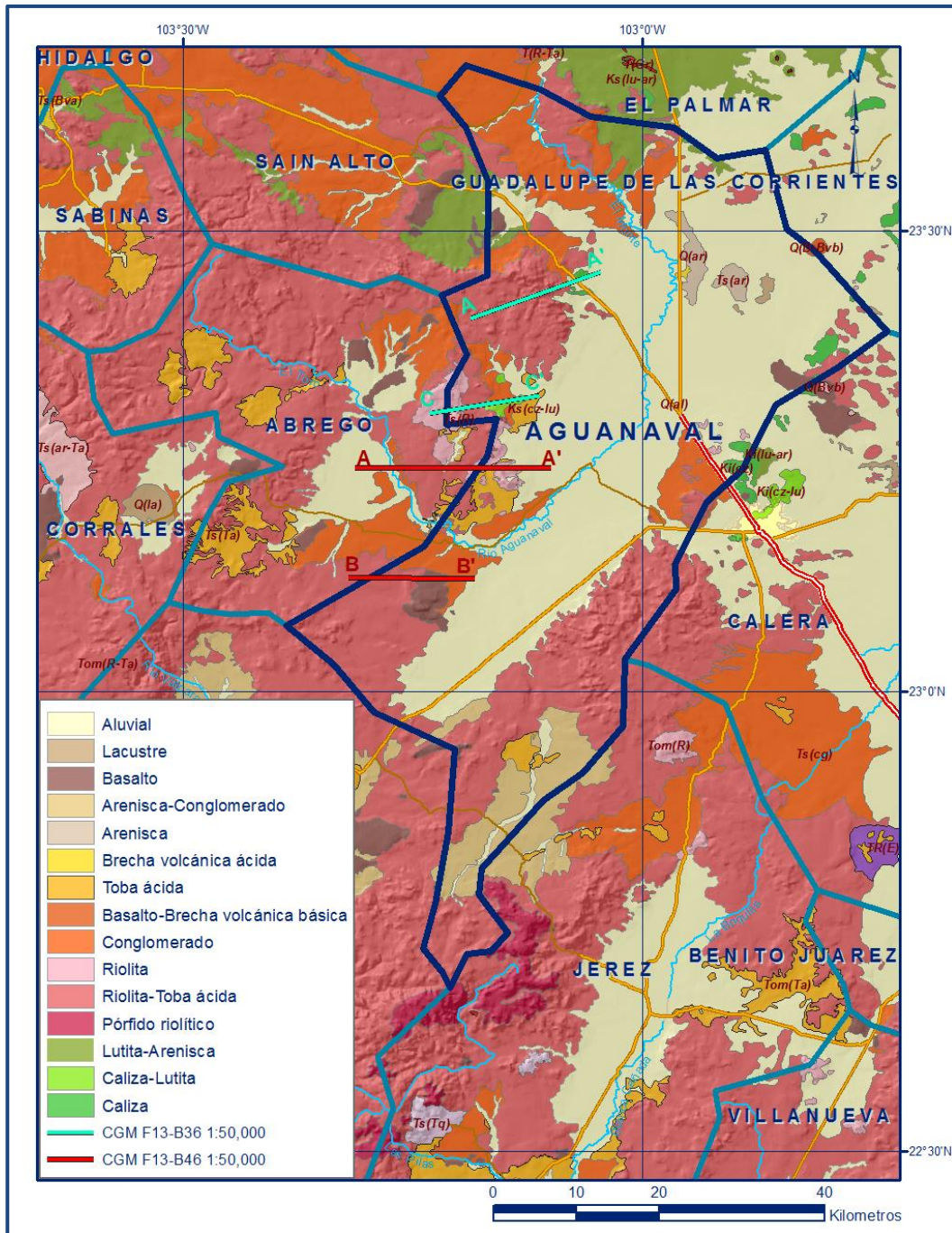


Figura 2. Geología general del acuífero

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 se interdigitan con el miembro de calizas y lutitas. También del Cretácico se 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 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 conforma 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 se 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 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 Terciario que afectan a las calizas cretácicas y 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; igualmente cubierta por depósitos continentales. Su edad es Pleistoceno.

Finalmente, los depósitos aluviales conforman terrazas 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. (Cartas Geológico-Mineras F13-B46 Presa Gobernador Leobardo Reynoso y F13-B36 El Baluarte. Escala 1:50,000, SGM, 2009 y 2010, respectivamente).

4.1 Estratigrafía

En la zona en la que se ubica el acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas cuyo registro estratigráfico varía del Jurásico al Reciente (figura 2). 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, metamorfizadas 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 presentan un metamorfismo regional de bajo grado. Las rocas volcánicas tienen 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, que el Consejo de Recursos Minerales (CRM) denominó en 1998 Grupo Proaño. No se ha medido el espesor de esta secuencia, sin embargo, López R. (1985) estima que 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 estratigráfica, 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 Cserna en 1976, para designar un paquete de sedimentos de origen marino, localizados en las inmediaciones de la ciudad de Fresnillo, Zac.

En la zona en la que se localiza el estudio sólo se encuentra en las inmediaciones de las localidades 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; en tanto que 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 del poblado 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 (1992), 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 imnominata*, *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 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 dispuestas en 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 físis. 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

Unidad formacional definida por Imlay en 1937, en afloramientos expuestos en el Arroyo el Caracol, ubicado en la porción central de la Sierra de Parras, Coahuila. 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, dispuestas en capas de espesor delgado y medio, entre las que 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 ha estimado, aunque generalmente se encuentra cubierta por depósitos continentales del Terciario y Cuaternario o por derrames volcánicos terciarios. 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 y Parras

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.

TERCIARIO

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, asociados a la 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 geológica mencionada 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.

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 parduzco, 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.

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, Durango. En la región se encuentran distribuidas en la mayor parte de las sierras formadas por rocas volcánicas terciarias (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, generalmente con escaso cementante, aunque en algunas localidades 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, se considera de 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, se correlaciona con la Formación Los Llanos, asignándole una edad correspondiente al Plioceno Tardío.

CUATERNARIO

Basaltos

Las rocas de esta unidad se encuentran expuestas en la porción poniente del acuífero, cerca de los poblados Matías Romero, Vicente Guerrero y Urite; y de manera restringida las inmediaciones de la ciudad de Fresnillo y sur de El Quemado. Por su constitución litológica, se les clasifica como basaltos de olivino de edad pliocuaternaria, asociados con conos cineríticos que cubren a las rocas volcánicas terciarias.

Depósitos Aluviales

Los sedimentos que coronan la secuencia estratigráfica del valle 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 sus 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.

Depósitos lacustres

Depósitos continentales que se localizan principalmente al norte del acuífero, en torno de la Laguna La Salada, en la que se han acumulado sedimentos arcillosos finos, así como depósitos de limos, que rellenan los valles, depresiones y zonas topográficamente más bajas.

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 terciaria, 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; geométricamente 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 calcáreo 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, que 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 Terciario 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 tienen 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).

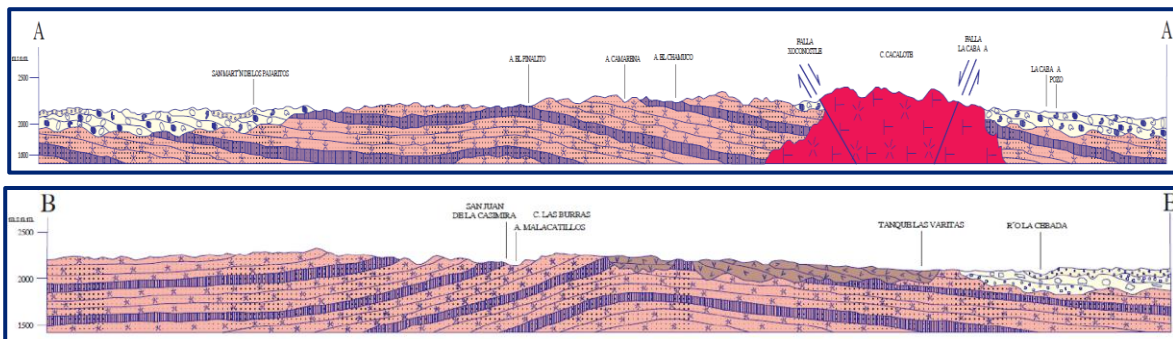
4.3 Geología del subsuelo

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, conglomerados polimícticos y depósitos lacustres que rellenan los valles tectónicos.

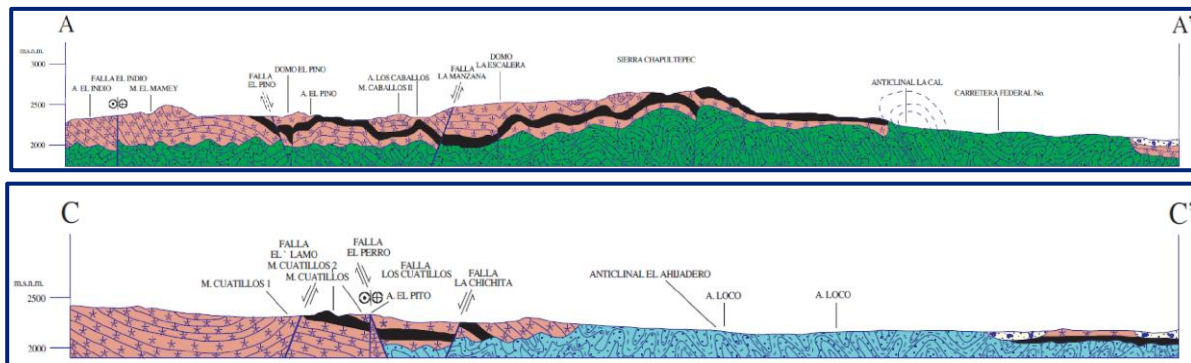
La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas de composición riolítica, entre las que predominan las tobas ácidas, riolitas e ignimbritas, y rocas sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

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 sedimentarias y volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento. Por rocas metamórficas y metasedimentarias, las secuencias vulcanosedimentarias de formaciones Zacatecas y Chilitos, las rocas arcillosas del Cretácico Inferior y localmente por rocas intrusivas (figura 3).



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



Fuente: Carta Geológica-Minera F13-B36, El Baluarte. Esc. 1:50,000 (SGM, 2010)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica, geofísica, 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, conglomerados y depósitos

lacustres, cuyo espesor puede alcanzar hasta 500 m 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 puede presentar condiciones de **semiconfinamiento**, debido a que están sobreyacidas y alternadas con lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los parámetros hidráulicos de las unidades litológicas que constituyen el acuífero, se cuenta con información de pruebas de bombeo de corta duración distribuidas en toda la cuenca, realizadas en estudios previos, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad obtenidos 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)**. 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 promedio de **0.04**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades de los estudios previos, así como la piezometría recabada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 1997-2015, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático para el año 2015 muestra que los valores variaban, de manera general, de 30 a 110 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el centro de los valles hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan. Los niveles estáticos menos profundos, de 30 a 40 m, se presentan en las zonas centro y norte del acuífero, al este de la zona comprendida entre Altamira, Lázaro Cárdenas y la Laguna La Salada; y de 40 a 50 m en la porción suroriental, en el área aledaña a las comunidades Trujillo y San José Nueva Tapia; en tanto que los más profundos, de 100

a 110, se registran en la porción oriental y suroccidental del valle, hacia las estribaciones de las Sierras Chapultepec y Fresnillo, respectivamente. En la porción occidental los valores de profundidad al nivel del agua subterránea varían de 80 a 100 m; en todos los casos, influenciados por la topografía del terreno (figura 4).

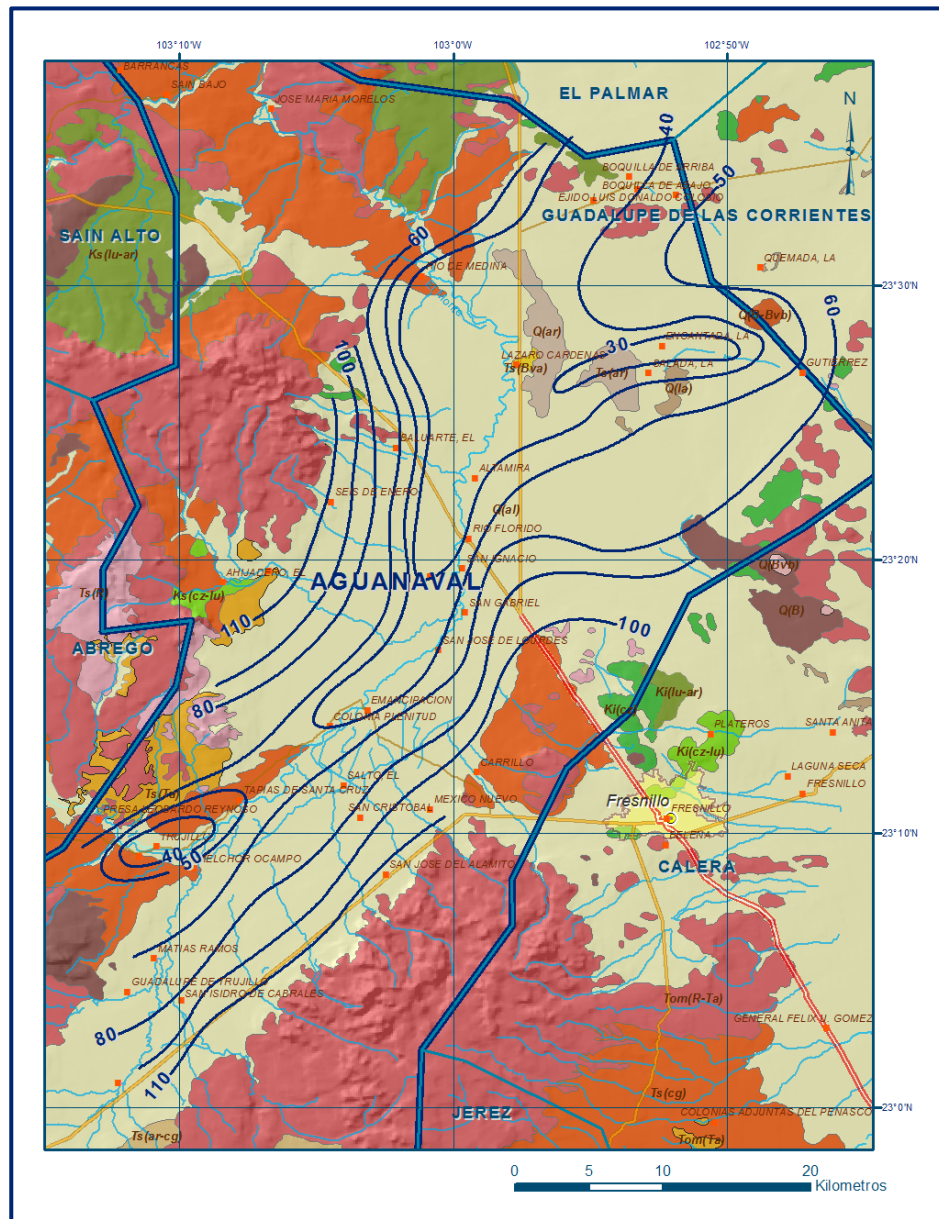


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2015)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2015 se registraron valores que variaron de 2,090 a 1,990 msnm, los cuales decrecen gradualmente desde los cuatro puntos cardinales hacia el valle aluvial localizado en la región central. Es

posible identificar la dirección preferencial del flujo subterráneo suroeste-noreste, con alimentaciones provenientes de los flancos norte, este y oeste, para finalmente dirigirse hacia la porción central del acuífero, donde la extracción intensiva para uso agrícola ha formado un extenso cono de abatimiento, a lo largo del curso del Río Aguanaval, desde El Salto, en el sur, hasta la zona ubicada al suroeste de la Laguna La Salada y Lázaro Cárdenas, en el norte. Las menores elevaciones, de 1,990 a 2,000 msnm, se registran en la porción central y norte, conformando el cono de abatimiento mencionado; en tanto que las mayores elevaciones, de 2050 a 2090 msnm, se presentan en la porción suroccidental del acuífero, entre las comunidades Guadalupe de Trujillo y Rincón de la Florida (figura 5).

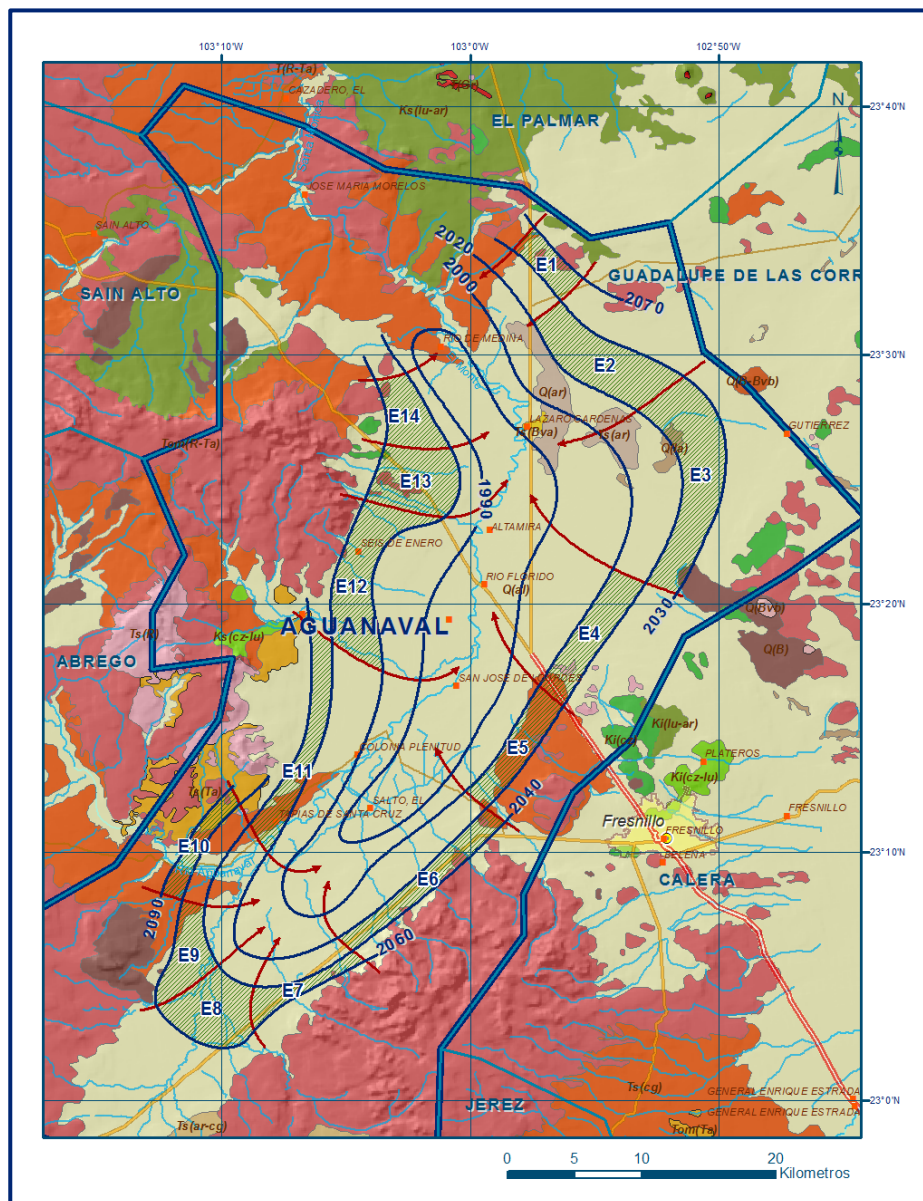


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2015)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 1997-2015 registra valores de abatimiento en la mayor parte de la superficie del acuífero, que varían de 5 a 30 m. Se registran conos de abatimiento en las zonas de concentración de la extracción para uso agrícola, ubicadas en la porción centro-norte entre Colonia José María Morelos, San José de Lourdes, El Salto y Agua Zarca. En estas zonas el abatimiento medio anual varía de 1.0 a 1.5 m. En la superficie restante del acuífero el abatimiento varía de 2 a 12 m, con un ritmo promedio de 0.6 m anuales (figura 6).

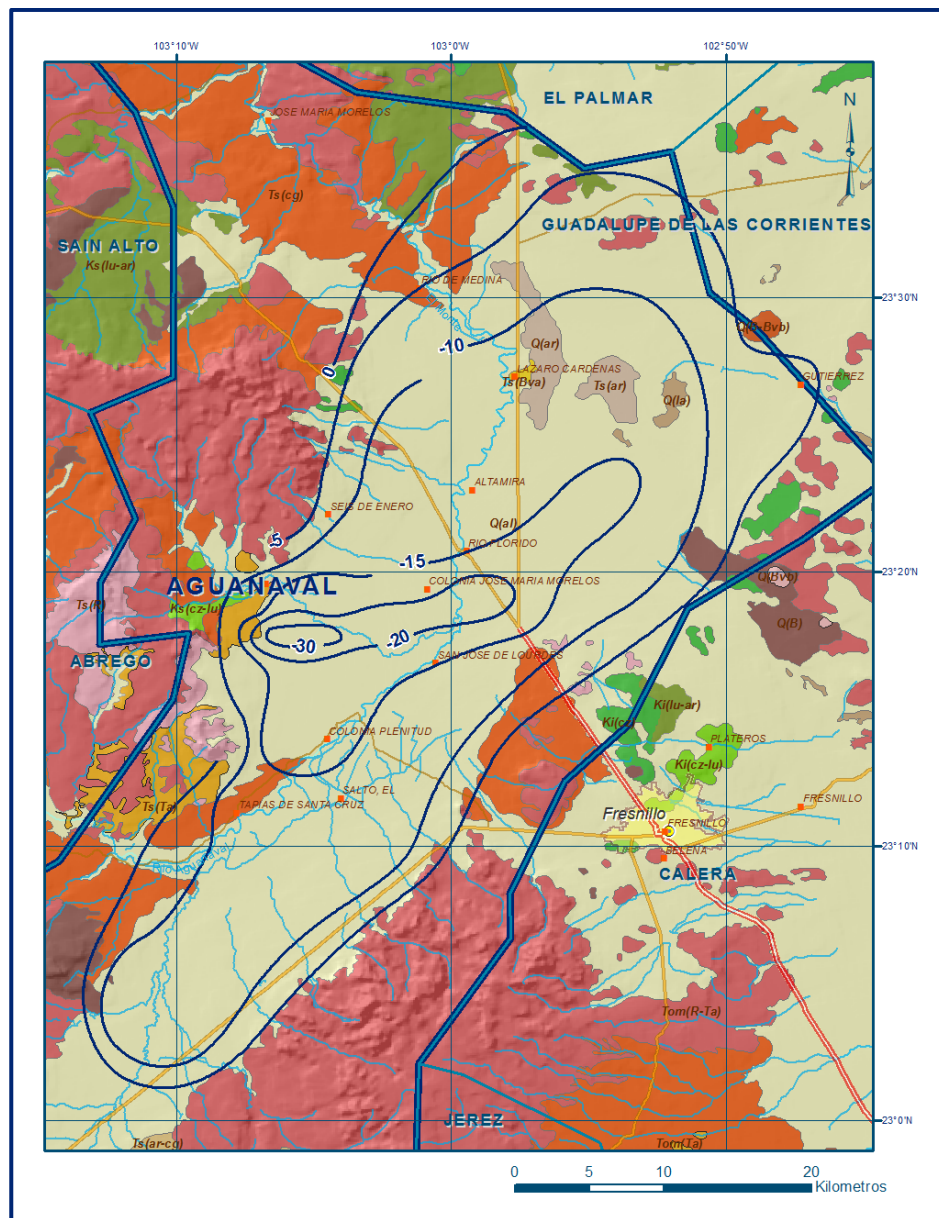


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (1997- 2015)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en el estudio realizado en 1981, se tomaron 69 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.

De los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, se determinó que los valores de concentración de sólidos totales disueltos (STD) variaron, de manera general, de 200 a 750 mg/l, que no superaban 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.

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 varían de 200 a 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores más altos de STD y conductividad eléctrica se registraron en la porción norte del acuífero y se incrementan en dirección general sur-norte paralela a la dirección de escurrimiento del Río Aguanaval, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Las temperaturas registradas variaron de 20 a 35 °C, predominando los valores de 24 a 26 °C, en tanto que el pH medido fluctuaba entre 6.6 a 8.4; las mínimas temperaturas se presentan en la zona central del valle, en donde raramente exceden de 24 °C. De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó que las familias del agua que predominaba era la bicarbonatada-mixta y bicarbonatada-sódica-mixta que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas y calcáreas.

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_2-S_1 que representa contenido medio de sales y baja concentración de sodio intercambiable, y C_2-S_2 que presenta contenido medio de sales y concentración media de sodio, ambas se consideran aptas para el uso agrícola, ésta última requiere suelos con buen drenaje para evitar su salinización o lavados periódicos.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos más reciente llevado a cabo como parte del estudio realizado en 2010, se registraron un total de 1371 obras activas que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 1121 son pozos y 250 norias. Del total de obras, 905 se utilizan para uso agrícola, 302 para dotación de agua potable a las comunidades de la región, 109 para uso doméstico-abrevadero y 55 para otros usos.

El volumen de extracción conjunto calculado asciende a **117.2 hm³ anuales**, de los cuales 109.5 hm³ (93.4 %) se destinan al uso agrícola y 7.7 hm³ (6.6%) para abastecimiento de agua potable. El volumen para usos doméstico-pecuario e industrial es muy pequeño.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 1997-2015, en una superficie de **1300 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento 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 la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (R_i). Para este caso, debido a que los volúmenes utilizados para uso público-urbano son incipientes, solo se considera la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r).

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

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

Donde:

R_v : Recarga vertical

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

R_r : Recarga Incidental por retornos de riego

B : Bombeo

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

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

$$R_v = B \pm \Delta V(S) - E_h - R_r \quad (2)$$

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 el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2015 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

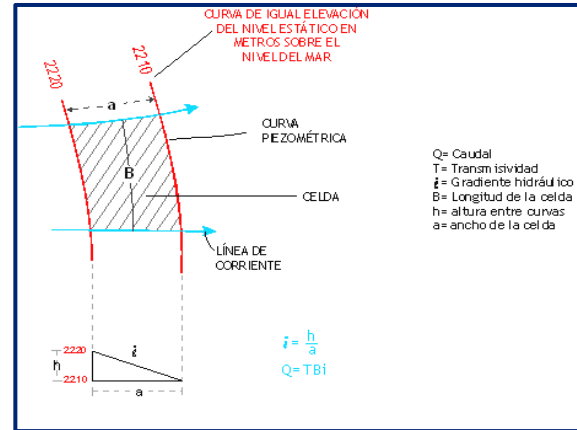
Donde:

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 **45.5 hm³/año**. Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas subterráneas, fueron obtenidos de pruebas de bombeo realizadas estudios previos, adaptados al espesor saturado de las zonas.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2015)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i	T (m²/s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
E1	4125	2200	40	0.0182	0.0020	0.1500	4.7
E2	12375	3300	10	0.0030	0.0010	0.0375	12
E3	15950	3025	10	0.0033	0.0015	0.0791	2.5
E4	9900	2750	20	0.0073	0.0018	0.1296	4.1
E5	10450	1650	20	0.0121	0.0020	0.2533	8.0
E6	13750	1790	20	0.0112	0.0008	0.1229	3.9
E7	8525	1925	20	0.0104	0.0008	0.0709	2.2
E8	6325	4535	20	0.0044	0.0020	0.0558	1.8
E9	3435	2750	20	0.0073	0.0010	0.0250	0.8
E10	8250	1375	30	0.0218	0.0015	0.2700	8.5
E11	13750	1650	20	0.0121	0.0008	0.1333	4.2
E12	14300	3575	20	0.0056	0.0005	0.0400	1.3
E13	3850	3710	20	0.0054	0.0010	0.0208	0.7
E14	5500	2200	20	0.0091	0.0010	0.0500	1.6
TOTAL							45.5

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 5% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a 40 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo.

De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 134.6 hm³ anuales, de los cuales 109.5 hm³ corresponden a agua subterránea y 25.1 hm³ a aguas superficiales, el retorno agrícola es de 6.7 hm³ anuales. **Rr = 6.7 hm³ anuales**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B).

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 **117.2 hm³ anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático registrada durante el periodo 1997-2015 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.04, 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)

Como consecuencia de la explotación del recurso, la posición de los niveles piezométricos ha descendido propiciado una variación negativa del almacenamiento.

El volumen de agua drenado en el intervalo 1997–2015, fue de -588.5 hm^3 , que representa un promedio anual de **-32.7 hm^3** (tabla 3).

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (1997-2015)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km^2)	Sy	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
0 a -5	-2.5	78.0	0.04	-7.8
-5 a -10	-7.5	414.9	0.04	-124.5
-10 a -15	-12.5	613.2	0.04	-306.6
-15 a -20	-17.5	151.4	0.04	-106.0
-20 a -30	-25.0	36.9	0.04	-36.9
-30	-30	5.6	0.04	-6.7
Área de balance		1300.0	TOTAL	-588.5
Promedio anual				-32.7

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:

$$\begin{aligned}
 R_v &= B \pm \Delta V(S) - E_h - R_r \\
 R_v &= 117.2 - 32.7 - 45.5 - 6.7 \\
 R_v &= 32.3
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 R &= R_v + E_h + R_i \\
 R &= 32.3 + 45.5 + 6.7 \\
 R &= 84.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

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 **84.5 hm³/año**, de cuales 77.8 hm³ son recarga natural y 6.7 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 están comprometidos como agua superficial, alimentados por un acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar la alimentación de acuíferos adyacentes, sostener el uso ambiental y prevenir la inmigración de agua de mala calidad al acuífero. Para el caso de este acuífero no existen descargas naturales comprometidas, por lo que **DNC = 0.0 hm³/año**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **174,038,741 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 84.5 - 0.0 - 174.038741 \\ \text{DMA} &= -89.538741 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **89,538,741 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1992. Actualización del Estudio Geohidrológico del Valle del Aguanaval, Zac. Realizado por Construcciones Díaz Perez S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 1997. Estudio para la Revisión de Redes de Monitoreo de los Acuíferos Valles de Calera-Benito Juárez, Chupaderos, Guadalupe Bañuelos, Cuenca del Aguanaval, Ojocaliente y La Blanca, en el estado de Zacatecas. Realizado por Estudios y Proyectos Moro S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2002. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Aguanaval, estado de Zacatecas.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Diseño del Plan de Manejo Integral del Acuífero Aguanaval, estado de Zacatecas. Realizado por Ingeniería y Gestión Hídrica S.C.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1973. Estudio Geohidrológico Preliminar de la Cuenca Media del Aguanaval, Zac. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Actualización del Estudio Geohidrológico de la Cuenca Media del Aguanaval, estado de Zacatecas. Realizado por Consultores S.A.