

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO BACOACHI (2627), ESTADO DE
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización	2
1.2. Situación Administrativa del Acuífero	4
2. ESTUDIOS TECNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFIA.....	6
3.1. Provincia Fisiográfica	6
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrografía.....	8
3.4. Geomorfología.....	9
4. GEOLOGIA	10
4.1. Estratigrafía	13
4.2. Geología Estructural	21
4.3. Geología del subsuelo	22
5. HIDROGEOLOGÍA.....	23
5.1. Tipo de Acuífero.....	23
5.2. Parámetros Hidráulicos.....	24
5.3. Piezometría	24
5.4. Comportamiento hidráulico.....	25
5.4.1. Profundidad al Nivel Estático	25
5.4.2. Elevación del Nivel Estático.....	27
5.4.3. Evolución del Nivel Estático	29
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 (Ri)	35
7.2. Salidas.....	35
7.2.1. Bombeo (B).....	35
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	35
7.2.3. Evapotranspiración (ETR)	35
7.3. Cambio de Almacenamiento (ΔV_S)	37
8. DISPONIBILIDAD	38
8.1. Recarga total media anual (R)	39
8.2. Descarga natural comprendida (DNC).....	39
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	39
8.4. Disponibilidad de agua subterránea (DMA).....	40
9. BIBLIOGRAFÍA	41

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 Río Bacoachi, definido con la clave 2627 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción norte del estado de Sonora, entre los paralelos 30°12'57" y 31°00'57" de latitud norte, y entre los meridianos 109°45'06" y 110° 23'24" de longitud oeste, cubriendo una superficie de 2,324 km².

Limita al norte con el acuífero Río San Pedro, al este con Río Frontera, al sur con el acuífero Cumpas, al suroeste con Río Sonora y al oeste con el acuífero Río Bacanuchi, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero abarca casi la totalidad del municipio Bacanuchi, parcialmente Cananea y Arizpe, así como porciones pequeñas de los municipios Fronteras y Cumpas.

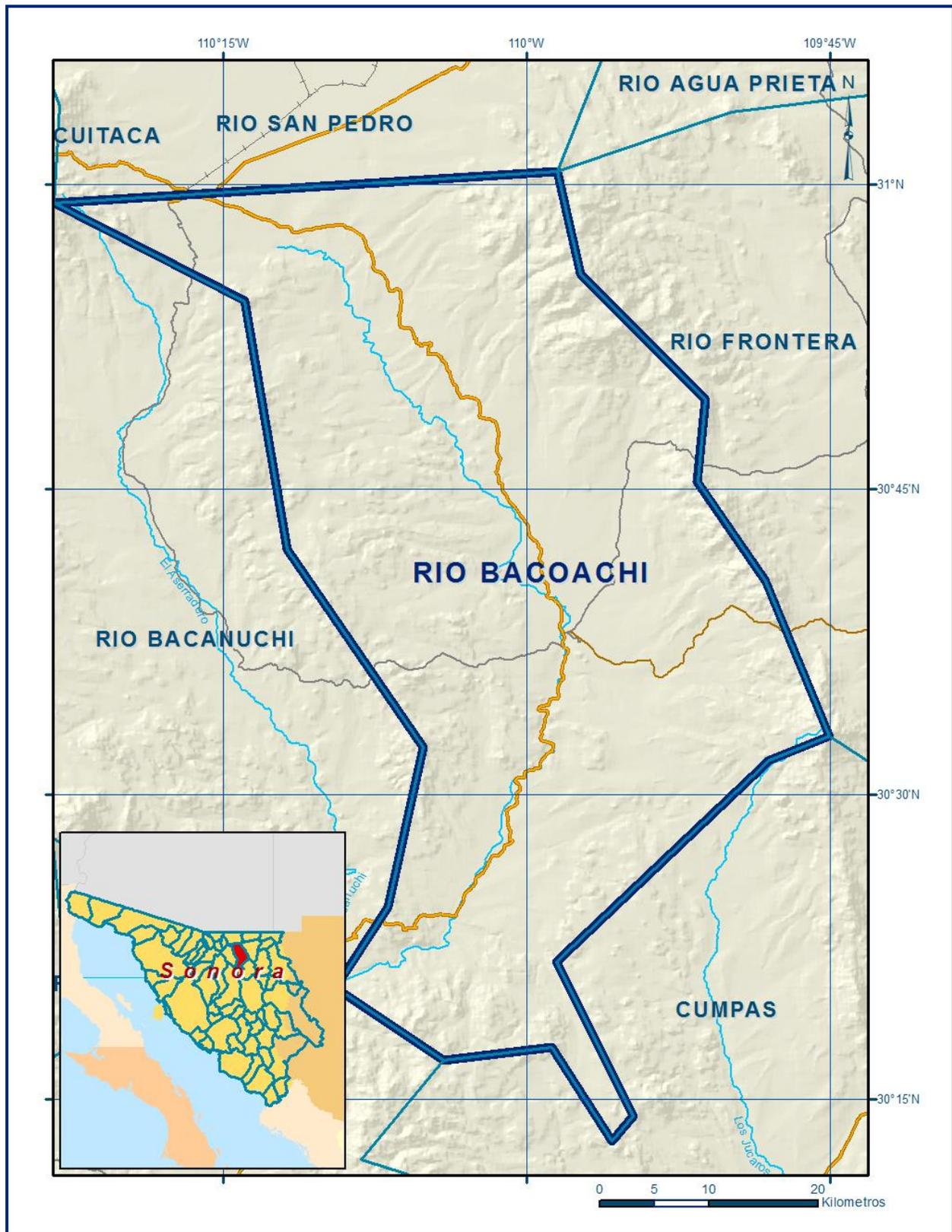


Figura 1. Localización del acuífero Río Bacoachi

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla No. 1.

Tabla No.1 Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero.

ACUIFERO 2627 RIO BACOACHI						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	109	55	45.7	30	12	56.2
2	109	58	44.9	30	17	32.8
3	110	4	5.6	30	16	55.8
4	110	9	25.0	30	20	27.8
5	110	6	50.7	30	24	27.2
6	110	5	5.9	30	32	20.4
7	110	11	49.0	30	42	2.4
8	110	13	55.0	30	54	16.8
9	110	23	21.1	30	59	6.8
10	109	58	27.6	31	0	39.8
11	109	57	19.6	30	55	37.4
12	109	51	8.7	30	49	26.1
13	109	51	32.7	30	45	24.2
14	109	48	12.2	30	40	29.4
15	109	45	2.7	30	32	52.1
16	109	48	1.0	30	31	39.8
17	109	58	30.3	30	21	45.1
18	109	54	43.3	30	14	9.4
1	109	55	45.7	30	12	56.2

1.2. Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y al Consejo de Cuenca Alto Noroeste, instalado el 19 de marzo de 1999. Su territorio se encuentra parcialmente vedado. En la mayor parte de él, que comprende las porciones norte, sur y oeste rige el *“Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Sonora”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de junio de 1967.

La región oriental está sujeta a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en diversos municipios del estado de Sonora”*, publicado en el DOF el 24 de septiembre de 1984. Ambos decretos son de tipo II que solo permiten extracciones para uso doméstico.

En la superficie restante, que comprende los extremos noreste y sureste, no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada está sujeta a las disposiciones del *“ACUERDO General por el que se suspende*

provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

El uso principal del agua subterránea es el industrial para la actividad minera. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TECNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DE LOS VALLES DE LOS RÍOS SAN MIGUEL, SONORA, ZANJÓN, BACOACHI Y MÁTAPE, SONORA. Realizado en el año 1970 por Ariel Construcciones, S.A., para la Dirección de Aguas Subterráneas de la Secretaría de Recursos Hídricos (SRH). Entre sus conclusiones más importantes destaca que las corrientes de los ríos Sonora, San Miguel y Bacoachi presentaban escurrimiento durante todo el año, aunque en algunos tramos se perdía por infiltración; el conglomerado Báucarit es el principal acuífero de la región, funciona de manera general como acuífero libre y sólo cuando presenta interdigitaciones de lentes de arcillas adquiere un carácter semiconfinado.

Los volúmenes medidos fueron del orden de los 221.1 hm³, de los cuales 168.5 hm³ correspondieron a las avenidas que se presentaron durante la temporada de lluvias. Recomienda aumentar el número de estaciones hidrométricas, la precisión y continuidad de la toma de datos, así como la construcción de secciones geofísicas perpendiculares a los cauces de los ríos Sonora, Zanjón y San Miguel.

ESTUDIOS GEOELÉCTRICOS EN DIVERSAS ZONAS DEL ESTADO DE SONORA. Realizado por Ingeniería y Desarrollo, S.A. en 1974 para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). Aporta información de perfiles geoeléctricos, la mayoría de ellos perpendiculares al Río Sonora, localizados desde Mazocahui hasta Cananea.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS SONORA, ZANJÓN, SAN MIGUEL, MESA DEL SERI-LA VICTORIA Y CUENCA BACOACHITO. Realizado en el año 2005 por la Universidad de de Sonora, para la Comisión Estatal del Agua (CEA) de Sonora. Mediante actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, ejecución de sondeos geofísicos y estimación de parámetros hidráulicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga media anual que reciben los acuíferos. Adicionalmente, se recabaron muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente. Recomienda realizar al prospección geofísica y directa para conocer el potencial de las rocas fracturadas y en la zona cercana a Hermosillo intensificar el monitoreo hidrodinámico e hidrogeoquímico.

ESTUDO DE CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DEL ACUÍFERO BACOACHI, MUNICIPIO DE CANANEA, SONORA. Realizado en el año 2017 por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A. de C.V. (IDEAS) para Buenavista del Cobre, S.A.de C.V. (Minera México). Este trabajo tuvo como objetivo la evaluación superficial y subterránea del acuífero. Entre sus actividades más relevantes destacan el censo e hidrometría de las extracciones, ejecución de pruebas de bombeo, definir una red de monitoreo para el registro piezométrico y de la calidad del agua, así como definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico. Plantea el balance de aguas subterráneas y actualiza la disponibilidad, tomando en cuenta el volumen de extracción de la mina Cananea.

Los resultados y conclusiones de este estudio se utilizaron para la actualización de este documento, por lo que sus resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFIA

3.1. Provincia Fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental. Según la clasificación de INEGI (1989), el área cubierta por el acuífero está ubicada fisiográficamente en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Valles del Norte.

La Sierra Madre Occidental tiene una orientación noroeste-sureste y termina en las colindancias con el Eje Neovolcánico. Limita al oeste con las provincias Desierto Sonorense y Llanura Costera del Pacífico, y al este con las de Sierras y Llanuras del Norte, Sierra Madre Oriental y Mesa del Centro. Comprende parte de los estados de: Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Nayarit, Aguascalientes y Jalisco. Este sistema montañoso se formó a partir de la extrusión a gran escala de los materiales volcánicos que lo integran, cuyos espesores se calculan de 1,500 a 1,800 m, y que cubren rocas sedimentarias más antiguas; ocurrida en el Terciario Inferior o Medio.

Predominan en este sistema rocas ácidas. La sierra, hacia el occidente, muestra pendiente pronunciada imponente, mientras que hacia el oriente tiene un descenso gradual hasta las regiones llanas del centro. Sobre el dorso central de la sierra, que se levanta de 2,500 a 3,000 msnm, los materiales volcánicos se encuentran depositados en amplios mantos tendidos que forman las elevadas mesetas típicas de la provincia.

Una particular conjunción de actividad tectónica, rasgos litológicos, distribución de fracturas y procesos erosivos hídricos, propició la excavación de profundos cañones cuyos ejemplos más espectaculares se presentan sobre la vertiente occidental de la sierra. Los sistemas de topoformas dominantes en toda la provincia son mesetas y mesetas asociadas con cañones. En la franja oriental existen cadenas montañosas y valles con orientación noreste-suroeste, producto de los fallamientos que acompañaron a los procesos de levantamiento durante el Pleistoceno.

La Subprovincia Sierras y Valles del Norte está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur. La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur, de tal forma que en la sierra Los Ajos, ubicada al Este de Cananea, se localiza la mayor altitud, con 2,620 msnm; al norte de Mazocahui gran parte de las elevaciones exceden los 1,000 msnm, mientras que al sur de esta población la mayoría de las cimas presentan una altitud menor.

En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas; sin embargo, un cuerpo ígneo intrusivo aflora desde la sierra Los Locos hasta Mazatán y Nácori Grande, pasando por Mazocahui. En los valles abundan los materiales sedimentarios continentales (conglomerados del Terciario). Al oeste fluyen los ríos San Miguel de Horcasitas y Sonora y al este los ríos Moctezuma y Bavispe, ambos afluentes del Río Yaqui.

Los rasgos del drenaje de la cuenca del Río Sonora son principalmente de tipo subsecuente y consecuente, el primero predomina en las cuencas alta y media con un sistema de drenaje rectangular y enrejado en la cuenca media.

3.2. Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por E. García (1964) para las condiciones de la República Mexicana, el clima que domina en la región es el tipo BSkw(x´), semiseco, templado con verano cálido, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, la del mes más frío entre 3 y 1 °C, con régimen de lluvia de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2 con respecto al anual. En la porción sur domina el clima BSohw(x´), seco, semicálido con invierno fresco, temperatura media anual mayor de 18 °C, la del mes más frío menor de 18 °C, con régimen de lluvias en verano con porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2 con respecto al anual.

Para el análisis climatológico, se consideró la información de dos estaciones climatológicas: Cananea y Arizpe, que se localizan en los extremos norte y sur del acuífero, con un periodo de registro 1964 a 2004. De acuerdo con esta información, la temperatura media anual es de **18.2 °C**, con valor mínimo de 15.5 y máximo de 20.9 °C. Los meses en que se presentan los valores más altos de temperatura son junio, julio y agosto; en tanto que de diciembre a enero se registran las temperaturas más bajas.

La precipitación media anual en las estaciones mencionadas es de 607.4 y 432.1, respectivamente. El valor promedio anual para todo el acuífero es de **550 mm**. Los promedios mensuales de precipitación muestran que, de acuerdo al inicio del año hidrológico, que principia en el mes de julio, al igual que la temporada de lluvias, los meses más lluviosos son julio, agosto y septiembre, con valor máximo de 284.1 registrados en la estación Cananea. La lluvia que se presenta en la zona está bien distribuida geográficamente. Con respecto a la evaporación potencial media, su valor promedio es de **2,180 mm**, que se incrementa al aumentar la temperatura y disminuye al aumentar la altura del terreno. Su valor es mayor que la precipitación y por lo tanto no existe una recarga efectiva hacia el acuífero.

3.3. Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica RH-9 "Sonora Sur", dentro de la cuenca del Río Sonora, subcuenca del Río Bacoachi. Su corriente principal es el río Sonora, que tiene un área de captación de 2291 km² hasta el límite sur del acuífero, en la población de Arizpe. nace a la altura de Cananea y presenta escurrimientos la mayor parte del año en algunos lugares, como en la zona norte de la región de Bacoachi, y desaparece en otros.

En los lugares en que el gasto del río se mantiene casi todo el año se presentan manantiales estacionales de bajo caudal. Hacia la parte de final de la cuenca, en la población de Buena Vista, el río mantiene un régimen intermitente, que escurre sólo

en época de lluvias, mantiene un rumbo NW-SE, paralelo al río Bacanuchi, hasta llegar a la población de Bacoachi, ubicada en la parte central de la subcuenca, donde cambia el rumbo a NE-SW hasta la población de Buena Vista. 2 km al norte de la población de Arizpe, se une con el río Bacanuchi, en el límite con el acuífero Río Sonora. El drenaje es de tipo detrítico y los almacenamientos de agua superficial principales son las presas de jales ubicadas al SE de la ciudad de Cananea; el resto de los almacenamientos superficiales son pequeños bordos.

Esta cuenca limita al norte con la cuenca del río San Pedro, que se origina en territorio mexicano y fluye hacia los Estados Unidos de América; al norte y oriente limita con las cuencas de los ríos Bavispe y Moctezuma, afluentes del Yaqui; al sureste con el río Mátape y el arroyo La Bandera; al noroeste con la cuenca del río Asunción y al suroeste con la del río Bacoachi. La topografía de su cuenca es accidentada, salvo en su cuenca baja y en la de su afluente el río zanjón. La cuenca alta es rica en yacimientos minerales y la principal explotación se localiza cerca de los orígenes de la corriente, en la zona de Cananea, Sonora, donde se extrae cobre principalmente; los yacimientos se prolongan hacia el sur a lo largo de la Sierra El Manzanal, que divide al río Sonora de su afluente Bacanuchi y en ella existen yacimientos de oro, plata, cobre y zinc tanto en la margen derecha del río Bacanuchi, como en la izquierda del río Sonora, hasta las cercanías de Sinoquipe, Sonora.

Por correlación con los gastos medios diarios registrados en la estación hidrométrica El Orégano, en el municipio de Hermosillo, se concluye que durante los meses de julio, agosto y septiembre se presentan los máximos gastos en el Río Sonora, en tanto que el periodo de estiaje se presenta en los meses de abril, mayo y junio principalmente.

3.4. Geomorfología

Según la carta de Unidades Geomorfológicas de México (Lugo Hubp *et al.*, 1990) el acuífero se ubica dentro de las Provincias Sierras Sepultadas de Sonora, Sierras y Valles y Sierra Madre Occidental; dentro de esta última, en las Subprovincias de Planicies y Montañas Residuales y Sierras Volcánicas Paralelas.

La región se encuentra ubicada en la vertiente del pacífico y está drenada por corrientes intermitentes dispuestas en patrones de drenaje integrado. Los valles presentan una etapa de rejuvenecimiento, evidenciado por la erosión de los depósitos terciarios y la presencia de terrazas aluviales recientes.

4. GEOLOGIA

En el área del acuífero se presenta una complejidad estratigráfica debido a la presencia de dos Terrenos Tectoestratigráficos diferentes que son el Terreno Caborca y el Terreno Norteamérica. El primero tiene un basamento constituido por esquistos y gneises de origen ígneo y sedimentario de edad Proterozoico Inferior conocido como Complejo Metamórfico Bamori (Longoria et al., 1978) y granitoides del Complejo El Alamito (Rodríguez, 1984). Estas dos unidades están intrusionadas por una granodiorita-cuarzomonzonita que aflora en la Sierra El Rajón, a la que Anderson (1978) le determinó una edad de 1740-1745 Ma y por la granodiorita El Jacalón (Castillo, 1978) que aflora en la Sierra El Jucaral, la cual tiene una edad de 1700 Ma (Anderson, 1989). También las intrusiona el Granito Santa Margarita con 1100 Ma (Anderson, 1989) que está expuesto también en la Sierra El Jucaral (figura 2).

Descansando en discordancia sobre las unidades anteriores, se encuentran dolomitas y cuarcitas del Proterozoico Superior, denominadas Capas Gamuza (Longoria y Pérez, 1978) que se presentan frecuentemente en relación tectónica sobre el Precámbrico metamórfico. Al oriente de la zona, Rodríguez (1984) reporta la presencia de afloramientos de cuarcitas de posible edad Cámbrico, que denomina Cuarcita Los Changos, la cual cabalga a las rocas jurásicas y se encuentra en contacto tectónico con el Complejo Metamórfico El Alamito, en forma de remanentes sobre granitos del Terciario.

El Terreno Norteamericano está formado en la zona por rocas metamórficas de la Sierra Los Ajos, correlacionables con los Esquistos Pinal que afloran en el sur de Arizona. En la región de Cananea, aflora un granito con edad de 1440 ± 15 Ma (Anderson y Silver, 1977) que intrusiona este terreno.

Su cubierta paleozoica la componen calizas y areniscas que afloran en el área de Cananea y en la Sierra Los Ajos. Valentine (1936) y más recientemente otros autores han definido cinco formaciones cuya edad varía del Cámbrico al Pensilvánico: la Formación Bolsa del Cámbrico Inferior-Medio, constituida por cuarcitas; Formación Abrigo, del Cámbrico Medio-Superior, conformada por una secuencia de calizas; Formación Martín del Devónico Medio-Superior, formada por calizas y calizas arcillosas; Formación Escabrosa, del Missisípico, constituida por calizas arenos-arcillosas y la Formación Horquilla del Pensilvánico, conformada por calizas arenosas y areniscas. Estas secuencias afloran en la Sierra Los Ajos y al sur del Cerro Las Mesteñas.

A partir del Jurásico Inferior los basamentos descritos comparten su evolución geológica. El Jurásico Inferior está representado por rocas vulcanosedimentarias metamorfizadas, formadas por las andesitas y areniscas de la Formación Santa Rosa (Hardy, 1973), y al oriente por las rocas ácidas de la Formación Pinito (Gilmont, 1978); mientras que en la porción central cambia a facies más sedimentarias constituidas por las calizas y areniscas de la Formación Caracahui (Erben, 1956). Las rocas metamórficas del Jurásico Medio, están representadas por esquistos, metaareniscas y metaconglomerados, dentro de este mismo periodo se emplaza un intrusivo de composición granítica que afecta a toda la secuencia pre-jurásica. Las rocas del Jurásico Superior están representadas por rocas vulcanosedimentarias del Grupo Chino (Longoria y otros, 1979), que afloran en la porción suroccidental.

Este último episodio que abarca el Jurásico y principio del Cretácico fue la denudación detrítica de toda la columna prejurásica, dando lugar a la formación del Conglomerado Glance, Sobreyaciendo concordantemente a esta unidad afloran rocas correlacionables con el Grupo Bisbee del sur de Arizona, Formación Represo (Salas, 1968) en el área de Santa Ana y Formación Los Tanques (Rodríguez, 1994) en el área de Tuape, que consisten de calizas, lutitas y areniscas que están cubiertas en discordancia erosional, en la porción occidental, por un importante paquete vulcanosedimentario de andesitas, lutitas, areniscas y calizas intercaladas, denominado Grupo Chanate (Jacques A., 1993). Sobre ellas descansa en forma concordante el Grupo Chaparro, que consiste de brechas andesíticas, lavas, tobas riolíticas y andesíticas, conglomerados y areniscas; mientras que, en la porción oriental, estas rocas cambian a facies más tobáceas, conocidas como Formación el Tuli (Rodríguez, 1994). En el Cretácico Superior-Terciario Inferior se emplaza un cuerpo intrusivo conocido como Batolito Laramide que incluye a todas las rocas calcoalcalinas de esta edad, constituidas por granodioritas, cuarzomonzonitas y granitos. En el Oligoceno, rocas volcánicas de composición andesítica cubren discordantemente a toda la secuencia preterciaria. Sobreyaciendo a estas se presentan coladas andesíticas y riolíticas rematadas por ignimbritas que coronan las partes altas de la Sierra Madre Occidental. Durante el Mioceno se depositaron sedimentos detríticos continentales de la Formación Báucarit y Tubutama; interestratificadas con derrames volcánicos. Sobre ella yace una segunda generación de paquetes de conglomerados y areniscas que se consideran de edad Pleistoceno El Cuaternario consiste de conglomerados polimícticos, gravas y arenas. Finalmente, en el Cuaternario se depositaron arenas y limos y tuvo lugar un importante episodio de vulcanismo basáltico (Cartas Geológico-Mineras Cananea H12-5 y Nacozari H12-6. Escala 1:250,000, SGM, 1999 y 1998, respectivamente).

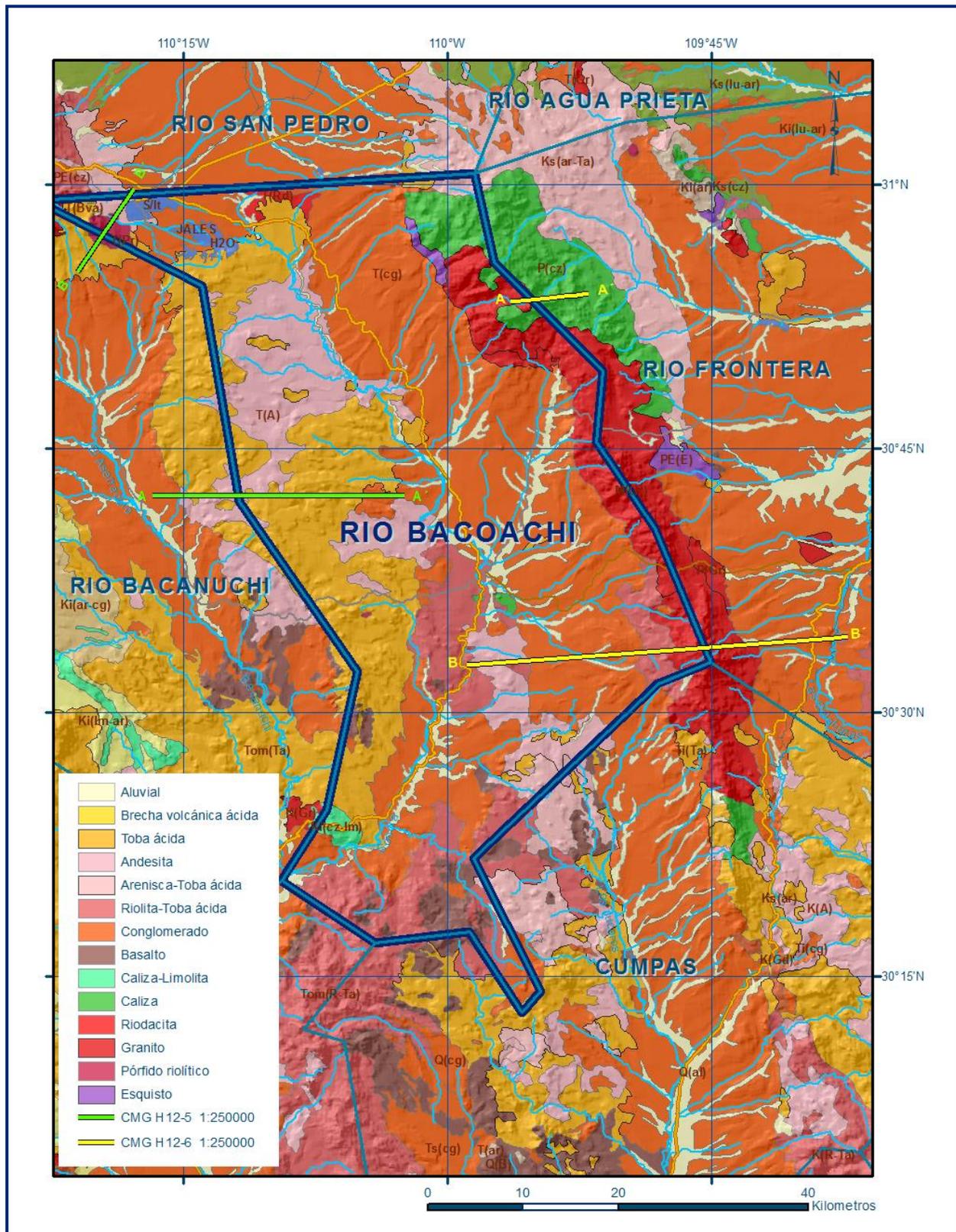


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

En la región en la que se ubica el acuífero afloran secuencias de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, cuya edad varía del Precámbrico al Reciente (figura 2). A continuación, se describen brevemente las distintas unidades, en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente.

PRECÁMBRICO

Está representado por rocas metamórficas constituidas principalmente por esquistos micáceos, filitas, anfibolitas, cuarcitas, mármol y gneis. En el flanco suroeste de la Sierra Los Ajos, estas rocas presentan una textura esquistosa lepidoblástica con muscovita, cuarzo, sillimanita, clorita, epidota, zircón, piritita y hematita, afectadas por metamorfismo regional de bajo grado en facies de esquistos verdes.

El Precámbrico Medio está representado por un complejo ígneo metamórfico (granito porfídico, gneis milonítico, augengneismilonítico) correlacionable con el Complejo Metamórfico Bamori. Este complejo aflora en el flanco suroeste de Sierra Los Ajos, al NE del Poblado de Bacoachi. En la región localizada al oeste de Cananea los esquistos están intrusionados por rocas graníticas que fueron datadas por Anderson y Silver (1977), determinando una edad de 1425 a 1475 Ma.

Esquistos Pinal

Ransome (1904), definió al Esquisto Pinal como *“una potente serie de rocas metamórficas, representadas por esquistos de color gris oscuro verdoso, presentando como principales constituyentes cuarzo, sericita y ocasionalmente turmalina y anfíboles”*. Sus principales afloramientos se encuentran en el sureste del estado de Arizona, en el flanco occidental de las montañas Pinal. Taliaferro (1933), reporta el Esquisto Pinal en el sureste de las montañas Morita, municipio de Agua Prieta, Sonora. Gómez Tagle (1967), reconoce esta unidad en la Sierra Las Mesteñas, dentro del municipio de Fronteras.

PALEOZOICO

El Paleozoico en el área se encuentra representado por una secuencia detrítico-carbonatada que fue depositada en un ambiente de plataforma somera, cuyas edades varían del Cámbrico al Pérmico. Esta secuencia de calizas y areniscas aflora principalmente en el flanco noroeste de la sierra Los Ajos, al este de Cananea y en menor proporción al sur del poblado de Bacoachi.

Cuarcita Bolsa

Ransome (1904), define con este nombre a rocas del Cámbrico Medio, cuya localidad tipo se ubica en el Cañón Bolsa, localizado en el flanco SW de la Sierra Escabrosa, localizada al oeste de Bisbee, Arizona. La porción inferior de la Cuarcita Bolsa es conglomerática con una matriz feldespática, que tiende gradualmente a hacerse más arenosa hacia su cima, los clásticos están bien redondeados y algunos son subangulares. Su ambiente de depósito es marino cerca del litoral, definido con base en la presencia de un conglomerado basal y la estratificación cruzada de las capas inferiores, además el carácter arcoso de las areniscas supone que los clastos provienen de algunas vetillas de cuarzo y del cuarzo preferente de la Formación Esquistos Pinal.

Caliza Abrigo

Definida también por Ransome (1904) para referirse a las calizas que sobreyacen a la Cuarcita Bolsa. Gilluly (1937) les determinó una edad Cámbrico Superior por su contenido faunístico, representado principalmente por *Crepicephalos*, *Aphelaspis*, *Elvinia* y *Conaspis*. El contacto de la Caliza Abrigo con la Cuarcita Bolsa es concordante y se inicia con la alternancia de delgadas capas arenosas y arcillosas con la cuarcita que tiende a desaparecer sobre esta zona dominante de lutitas y areniscas, la parte principal de la unidad está representada por calizas de color gris-azuloso, localmente moteadas de amarillo, de estratificación delgada, en capas con un espesor promedio de 10 cm.

Caliza Martín

El término Caliza Martín fue propuesto por Ransome (1904) para una sección de calizas compactas de color gris oscuro, en la que se encuentran algunos fósiles, como braquiópodos, entre ellos *Atrypareticularis* y *Sprifer mungerfordi*, ocasionalmente se presentan algunas capas de lutitas calcáreas. Su localidad tipo es el Monte Martín, en la Sierra Escabrosa, en el Estado de Arizona, presenta un espesor del orden de 100 fue determinado en Bisbee, Arizona.

Litológicamente se divide en dos miembros (Viveros Martínez 1964), el miembro inferior constituido por calizas estratificadas en capas de 60 cm a 1 m, en las que están incluidos abundantes tallos de crinoides; en tanto que el miembro superior está constituido por calizas de estratificación delgada con abundantes lentes de pedernal, el cual al intemperizar adquiere un color gris oscuro. La Formación Martín es litológicamente más variable entre las formaciones de edad Paleozoico en el área, ya que en su localidad tipo las rocas predominantes son calizas con intercalaciones de lutitas color rosado en su porción inferior.

El espesor total de esta formación en la Sierra Cabullona es de aproximadamente 259 m (Viveros Martínez 1964). El contacto superior con la Caliza Escabrosa se diferencia porque existe un notable cambio entre las calizas de estratificación delgada con pedernal oscuro, y las calizas de estratificación gruesa sin pedernal de color gris claro de la Caliza Escabrosa; sus contactos superior e inferior son discordantes. Los sedimentos de esta formación son típicamente marinos; por los fósiles encontrados en ellos, se puede inferir que corresponden a sedimentos depositados en aguas someras.

Caliza Escabrosa

Ransome (1904), propuso el término Caliza Escabrosa para una sección de rocas calcáreas granulares de estratificación gruesa; que presentan un color de casi blanco a gris oscuro; su localidad tipo se encuentra en la Sierra Escabrosa en Arizona, EE.UU; contiene fragmentos de crinoideos; Gilluly, Cooper y Steele (1954) reconocieron como fauna representativa en la Caliza Escabrosa, en el Sureste de Arizona los siguientes fósiles: *Fenestella*, *Spirifer*, *Schuchertella*, *Chonetes*, *Linoproductus*, *Rhipidomela* y *Punctospirifer*. Su espesor máximo es de 234 m, con una gran pureza, aunque en su parte media superior, incluye de manera aislada nódulos de pedernal. En la Sierra Cabullona afloran únicamente en su flanco SW, principalmente en su porción superior. La relativa abundancia de organismos marinos y la pureza de la caliza indican que su depósito se efectuó en aguas de mediana profundidad. Su contacto superior está marcado por una superficie de discordancia sobre la cual se depositaron sedimentos mesozoicos del Conglomerado Glance y La Formación Morita. La diferencia con la Caliza Martín es que ésta presenta abundante pedernal,

Formación Horquilla

Consiste en una serie de calizas dispuestas en estratos delgados que varían de 0.5 a 1 m de espesor, de color gris rosado, que intemperizan en color gris-azul con tonos rojizos. Se intercalan con calizas arcillosas, dispuestas en estratos delgados de 30 cm de espesor, que contienen abundante pedernal, generalmente en nódulos y masas irregulares. Contiene abundantes fósiles, entre los que destacan restos de crinoides, braquiópodos y fusulínidos; que le asignan una edad Pensilvánico. En el distrito minero de Cananea se le determinaron 120 m de espesor.

MESOZOICO

El Mesozoico de Sonora se representa por una secuencia marina, con depósitos zoneados calcáreos, arcillo-calcáreos y arcillo-arenosos y otra unidad continental areno-conglomerática. Afloran también rocas ígneas intrusivas y extrusivas de composición ácida a intermedia.

JURASICO

Está representado por escasos afloramientos de andesitas y areniscas que afloran en el flanco oeste de la sierra Los Ajos, en el cerro La Nevada y al sur del poblado Bacoachi. Flores (1929) reporta en la Sierra Caracahui una secuencia formada por areniscas, calizas y lutitas de edad Jurásico Inferior, denominada Formación Caracahui, correlacionables con la Formación Santa Rosa. Gilmont (1978) reporta una secuencia compuesta por riolitas y riodacitas de edad Jurásico Inferior, que aflora al SE del poblado Sinoquipe. Salas (1968) define una secuencia metamórfica compuesta por esquistos, filitas, metacaliza, cuarcita y gneis de edad Jurásico Medio nombrada como Complejo Metamórfico Santa Ana, que aflora al SE y NW del poblado Cucurpe. Ramsome (1904) describe un conglomerado como Formación Conglomerado Glance de edad Jurásico Superior–Cretácico Inferior, cuyos afloramientos se observan al oeste y suroeste del poblado Bacanuchi. Rodríguez (1986) define la Formación La Colgada, compuesta por lutitas, calizas, areniscas y rocas volcánicas de edad Jurásico Superior, correlacionable con la Formación Cucurpe, la cual aflora al sureste de Cucurpe y al sureste de Bacoachi.

CRETÁCICO

Varios autores han descrito afloramientos de rocas correspondientes al Cretácico Inferior (Taliaferro, 1933; Rangin, 1977 y Viveros 1965) localizados en las Sierras San José, sur de la Sierra Huachuca, La Mariquita y las estribaciones de la Sierra Los Ajos. En la Sierra San José estas formaciones se encuentran intensamente deformadas, desarrollándose fallas de cabalgadura que ocasionan el engrosamiento estructural de la columna sedimentaria.

Grupo Bisbee

En la región de Cabullona, situada al noreste de Cananea, el Cretácico Inferior, está representado por las rocas de este grupo conformado por cuatro formaciones que sobreyacen discordantemente a rocas paleozoicas; litológicamente constituyen una secuencia transgresiva, compuesta por conglomerados, areniscas, lutitas y calizas. En el área las formaciones que se correlacionan con el Grupo Bisbee son las siguientes:

Formación Glance

Consiste de un cuerpo masivo de conglomerados polimícticos y areniscas, dispuestas en capas delgadas, cuyo espesor alcanza 20 m, que sobreyace discordantemente a rocas paleozoicas y subyace a la Formación Morita. Por su posición estratigráfica se le asignó una edad correspondiente al Neocomiano.

Formación Morita

Secuencia de lutitas calcáreas y areniscas de color café, dispuestas en capas de espesor medio y delgado, que hacia la cima tiende a presentar cuerpos de calizas arenosas.

De acuerdo a su contenido faunístico, se le ha asignado una edad Aptiano Superior-Albiano Inferior. Sus contactos inferior y superior con las formaciones Glance y Mural, respectivamente, son concordantes. Su espesor es de 540 m.

Formación Mural

Representa el periodo máximo de la transgresión, en donde se desarrolló un potente cuerpo de calizas de plataforma con desarrollos arrecifales de hasta 200 m de espesor. Las rocas son de color gris claro que intemperizan a gris blanquecino. Su contacto inferior es transicional y concordante con la Formación Morita y el superior es nítido y concordante con las rocas de la Formación Cintura. De acuerdo a su contenido de microfósiles, su edad abarca casi todo el Albiano y la parte Inferior del Cenomaniano.

Formación Cintura

Está constituida por una secuencia de intercalaciones de calizas arcillosas, areniscas y lutitas, dispuestas en estratos delgados que presentan una coloración gris que intemperiza en tonalidades anaranjadas y rojizas, cuyo espesor alcanza 550 m. Debido a su posición stratigráfica y a su carencia de fósiles, se le asigna una edad Cenomaniano Inferior a Medio.

Grupo Cabullona

Se encuentra representado por intercalaciones de lutitas y areniscas de coloración rojiza, de origen continental. Las lutitas son deleznales y se encuentran dispuestas en capas laminares y delgadas, con fracturamiento intenso; en tanto que las areniscas son de grano medio, cementadas por carbonato de calcio.

Estas rocas afloran principalmente en las estribaciones de la Sierra de San José, Sierra Los Ajos, sur de la Sierra Huachuca y al este de la Sierra La Mariquita. La edad asignada es Turoniano-Maestrichtiano. Taliaferro (1933), menciona que el Grupo Cabullona está formado por una serie de sedimentos detríticos continentales y marinos con menor proporción de material piroclástico hacia la cima. De este grupo se han colectado algunos fósiles, tanto de vertebrados continentales como de invertebrados marinos y restos de dinosaurios. Con base en sus características litológicas se ha dividido en cinco formaciones que de la base a la cima son las siguientes:

Formación Snake Ridge, constituida por conglomerados polimícticos compuestos por fragmentos de calizas, esquistos, areniscas y lutitas carbonosas.

Formación Areniscas Camas, constituida por areniscas de estratificación cruzada, ocasionalmente carbonosas y frecuentemente tobáceas, con intercalaciones menores de lutitas.

Formación Lutitas Packard, consistente de lutitas color gris oscuro a negro, con estratos delgados de areniscas y capas delgadas de bentonita.

Formación Capas Rojas Superiores, constituida por lutitas rojas y areniscas de color blanco y rojo.

Formación Tobas Riolíticas, constituida por cenizas volcánicas con tonalidades de color blanco a gris.

Formación El Tuli

Compuesta por conglomerado, tobas ignimbríticas y calizas de edad Cretácico Superior correlacionables con los Grupos El Chanate y El Chorro, los cuales afloran al SW y NE de Bacanuchi y oeste de Sinoquipe.

El Cretácico Inferior está representado por una secuencia de calizas y lutitas que afloran en el extremo noreste del acuífero, en la sierra los Ajos, al este de la población de Cananea y hacia el suroeste de la población de Chinapa. También aflora una secuencia de areniscas y calizas al sur de Bacoachi.

El Cretácico Superior aflora ampliamente en el área del acuífero y está representado por secuencias de andesitas y tobas ácidas en el flanco suroeste de la sierra Los Ajos, al sureste de la población de Bacoachi. Una secuencia volcánica de riolitas y tobas riolíticas afloran en el flanco oeste de la sierra Los Ajos, así como una secuencia vulcanosedimentaria de andesitas y areniscas que afloran ampliamente al sur y al este de la población de Bacoachi.

Del Cretácico Superior al Paleógeno la región fue el escenario de una profunda actividad magmática, actualmente representada por una serie de rocas ígneas de composición granítica, que se separaron en dos grandes cuerpos: uno compuesto por granito con textura hipidiomórfica, holocristalina con cuarzo, microclina y ortoclasa de edad Eoceno; y otro cuerpo de composición granítica (granitos, granodioritas y dioritas) afloran en la sierra Buenos Aires, al este de la población de Bacoachi.

TERCIARIO

El Terciario inicia con una serie de eventos vulcano-plutónicos según Rangin (1978), en la región centro-noreste de Sonora, cuya alineación es NNO–SSE, abarcando desde Cananea a Nacozeni.

Estos afloramientos están constituidos principalmente por rocas volcánicas como riolitas, ignimbritas, andesitas y rocas plutónicas, que corresponden a monzogranitos o pórfidos monzoníticos, que representan una menor proporción con respecto al resto de las rocas cenozoicas. Dumble (1900) y King (1939) reportan rocas sedimentarias clásticas que afloran a lo largo de toda la cuenca del río Sonora, que corresponden a conglomerados polimícticos y areniscas del mismo evento, que pertenecen a la parte distal del abanico aluvial.

Riolitas–Tobas ácidas

Las secuencias conformadas por estas litologías son relativamente abundantes en la zona, se manifiestan fisiográficamente como lomeríos y mesetas. Su constitución es una alternancia irregular de riolitas y tobas riolíticas. Las riolitas son de color rosa, de textura afanítica y porfídica con fenocristales de cuarzo que presentan estructura esferulítica, fluidal y brechoide. Las tobas por lo general presentan pseudoestratificación, textura afanítica, con colores que varían de gris a blanquecino y rojo. La presencia de numerosos fragmentos le da un carácter lítico.

Formación Báucarit

Dumble (1900) la definió como división Báucarit y posteriormente King (1939), denominó Formación Báucarit a una secuencia poco consolidada de areniscas y conglomerados bien estratificados, con algunos horizontes arcillosos en la parte inferior, donde la unidad tiene su desarrollo completo; presenta además algunos flujos de basaltos y otras rocas volcánicas interestratificadas con los sedimentos. Tiene una amplia distribución en todo el estado de Sonora, pero sus mayores manifestaciones se presentan en territorio de los EUA, aflorando en depresiones intermontanas como grandes mesetas casi horizontales y afectadas en algunos lugares por fallas y fracturas recientes que han provocado el basculamiento de grandes bloques.

Está constituida principalmente por conglomerados de color pardo claro, que cambia por meteorización a pardo oscuro; generalmente está bien estratificado; la composición de los clastos es heterogénea, indicando la variación en la fuente de aporte. La composición de los clastos es de ignimbritas, riolitas, andesitas, granitos, arcosas, cuarcitas y en menor proporción rocas metamórficas.

Dentro del conglomerado se observan variaciones a arenisca conglomerática y arenisca; el segundo constituyente más importante lo forman los basaltos interestratificados con los conglomerados, aunque en algunas localidades se observan intercalados con tobas y conglomerados tobáceos. En menor contenido y principalmente hacia su base, en algunas localidades presenta estratos delgados de lutitas y calizas.

Debido a la gran erosión y fallamiento, no se identifica su base en la mayor parte de sus afloramientos y por lo tanto no es posible medir su espesor; se estima que es algunos cientos de metros. La Formación Báucarit prácticamente se encuentra cubriendo a todas las unidades de la columna preterciaria, pero en la mayor parte de los afloramientos sus contactos son por fallamiento; se encuentra cubierta indistintamente por derrames volcánicos, principalmente basaltos del Cuaternario, depósitos de talud y terrazas aluviales recientes.

En las inmediaciones de Magdalena, han sido fechados basaltos interestratificados con conglomerados en la base de esta formación, arrojando una edad del Mioceno, que puede ser correlacionable con el Conglomerado Gila del sur de Arizona.

CUATERNARIO

Basaltos

Unidad constituida por basaltos alcalinos de olivino, de textura afanítica y vesiculares; presenta amígdalas rellenas de calcita y/o zeolitas y fuerte brechamiento en los frentes de los derrames, su fracturamiento da origen a lajas y bloques. Sobreyace en discordancia a rocas volcánicas terciarias y sedimentos clásticos del mismo período. Por sus relaciones de campo y expresión morfológica se les asigna una edad correspondiente al Cuaternario.

Aluvión

Unidad constituida por depósitos aluviales y fluviales no consolidados, constituidos por arenas, gravas y arcillas derivadas de la erosión de las unidades preexistentes. Esta unidad representa el evento de sedimentación más reciente en las cuencas continentales originadas por la distensión terciaria. Sus afloramientos se restringen a los cauces de ríos y arroyos. Las franjas de piedemonte, constituidas de gravas, arenas y limos, que bordean las montañas altas y medias, constituyen las principales zonas de recarga. Estos materiales descansan discordantemente sobre rocas más antiguas, en mayor proporción sobre rocas del Paleógeno y Neógeno.

4.2. Geología Estructural

En la región domina la morfología que presenta patrones geológico estructurales resultantes de la tectónica compresiva y distensiva que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica, de aquí que la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de los principales ríos de la cuenca se deben a grandes fallas y fracturas que siguen los ríos como zonas de debilidad.

Una enorme falla normal se presenta desde Ignacio Zaragoza, al suroeste de Agua Prieta, bordeando los costados occidentales de las sierras Los Ajos, Buenos Aires y La Madera, hasta el extremo sur de esta última, donde termina. Otra de menor longitud se localiza en el Valle de Moctezuma.

La zona se caracteriza por un amplio valle intermontano formado entre sierras semi-paralelas con alineación NW-SE. Las estructuras geológicas más sobresalientes se encuentran en las rocas paleozoicas y mesozoicas, corresponden en primer lugar a un gran alto estructural que de manera regional sobresale en todo el noroeste del estado de Sonora, asociado a la gran intrusión batolítica cretácica que elevó toda la región situada al poniente de la provincia geológica Sierra Madre Occidental.

A toda esta región donde afloran estos granitos cretácicos, asociados con rocas calizas paleozoicas, algunos autores se refieren como la “Cuenca Paleozoica de Sonora” (López Ramos, 1979).

El segundo grupo de estructuras más importantes lo conforman los bloques a fallados que alineados en cordones montañosos en dirección NW-SE, caen de manera escalonada del continente hacia el Golfo de California como consecuencia del agotamiento de la energía que deformó y levantó estos terrenos y que por el fallamiento de tipo normal esculpió este panorama estructural al acomodarse estos gigantescos bloques por efecto de la gravedad.

El tercer grupo de estructuras, cuya importancia es relativamente menor porque no existe continuidad entre los afloramientos, lo conforman los pliegues de las rocas paleozoicas que son el resultado de los eventos tanto compresivos como distensivos a los que estuvieron sometidas estas rocas antiguas posteriormente a su depósito.

En la región se presentan manifestaciones de diversos eventos tectónicos, como resultado de procesos geodinámicos que afectaron al noroeste de México y sureste de Estados Unidos. Estos son, del más antiguo al más reciente:

Orogenias paleozoicas evidenciadas por discordancias angulares existentes entre secuencias paleozoicas y mesozoicas, así como entre el Paleozoico Inferior y Superior. La primera ocurrida por el choque de Laurasia y Gondwana al final del Paleozoico, generó las cadenas de los Apalaches y Ouachita, mientras que la segunda pudiera corresponder a la fase tectónica Taconiana de los Apalaches.

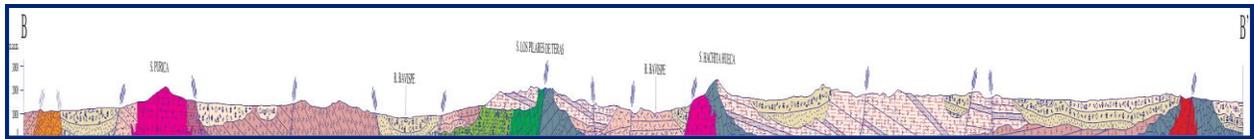
La Orogenia Mesocretácica, manifestada en el área por un plegamiento cerrado y fallamiento inverso de las unidades del Grupo Bisbee. Rangin (1982), considera que esta orogenia se generó debido a la colisión de un arco volcánico insular contra el Arco Alisitos, deformando las cuencas sedimentarias al final de éste último. Orogenia Laramide presentada en la región por plegamiento amplio y fallas inversas visibles en la Sierra Los Ajos y el Cerro Las Mesteñas. Esto se debe al cambio de velocidad de subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Americana, que trajo consigo un aumento notable en la generación de magmas.

Un Episodio de distensión durante el Terciario Medio-Tardío fue el responsable de la formación del Basin and Range, que caracteriza la fisiografía de la zona, y cuya deformación generó una familia de fallas normales y fracturas NW20°-30° en una primera etapa, y otra familia de fallas con orientación de N0° a NW10°, en una etapa posterior. Este episodio fue generado debido al cambio de tipo de margen de placa de una zona de subducción entre la Placa Americana y la Placa farallón, a una de desplazamiento lateral derecho, entre la Placa Americana y la Placa Pacífico, al consumirse en subducción el rift que separaba la Placa Farallón de la Placa Pacífica, ocurrido a partir del Mioceno Tardío. El quinto evento fue la Neotectónica de distensión, probablemente asociada a la formación del rift del Río Grande, que es responsable de la formación de la Falla Pitaycachi, cuyo movimiento en 1887 generó un devastador terremoto en la zona de Bavispe (Carta Geológica-Minera Nacozari H12-6. Escala 1:250,000. SGM, 1998).

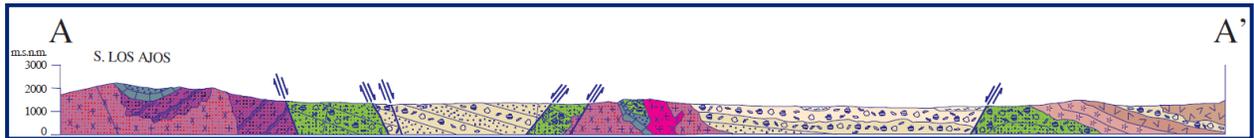
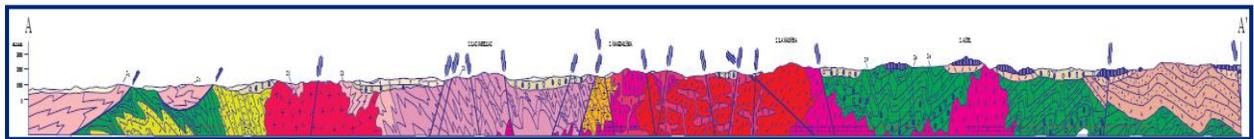
4.3. Geología del subsuelo

Con base en los resultados del análisis de la geología del subsuelo: descripción de cortes litológicos, interpretación de sondeos geofísicos de estudios previos, análisis hidrogeomorfológico, hidrología superficial y la interpretación de pruebas de bombeo, entre otros, es posible establecer la presencia de un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de lentes arcillosos, conformado en su porción superior por un medio granular, y otro fracturado subyacente.

El medio granular está constituido por depósitos aluviales y conglomerados de permeabilidad media que conforman la unidad que actualmente se explota, cuyo espesor alcanza 50 m. El medio fracturado está formado por rocas sedimentarias y volcánicas cretácicas (calizas, tobas y riolitas) así como rocas volcánicas terciarias (riolitas y andesitas), que afloran al este, oeste y sur del acuífero, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, conformando las sierras que lo delimitan. La permeabilidad que presentan estas rocas es media a baja. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas al desaparecer el fracturamiento, así como por las rocas intrusivas y metamórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera H12-6 "Nacoziari" Esc. 1:250.000 (SGM, 1998)



Fuente: Carta Geológica-Minera H12-5 "Cananea" Esc. 1:250.000 (SGM, 1999)

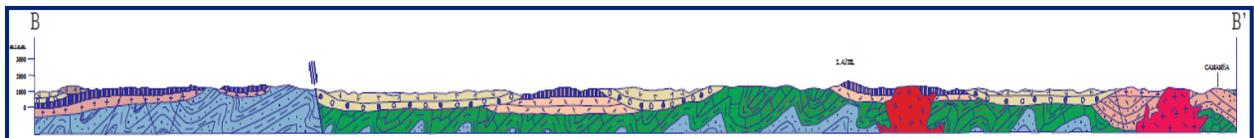


Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de Acuífero

A partir de la información geológica superficial y del subsuelo, recabada en el acuífero así como lo observado en otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen y constitución geológica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, de baja capacidad de almacenamiento, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado; con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de lentes arcillosos.

El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales de granulometría que varía de gravas a arcillas, que constituyen el lecho y la llanura de inundación del río Bacoachi y arroyos tributarios, así como los conglomerados que conforman los pies de monte. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan areniscas, calizas, andesitas, basaltos, tobas y riolitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. El espesor conjunto de estas unidades es en promedio de 130 m.

5.2. Parámetros Hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2017, se realizaron 3 pruebas de bombeo de corta duración tanto en etapa de abatimiento como de recuperación y se tomaron en cuenta los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en el estudio llevado a cabo en el año 1970 (SRH). Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales reportaron valores de transmisividad que varían de **6.7×10^{-5} a $77.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (5.8 a 6653 $\text{m}^2/\text{día}$)**. La conductividad hidráulica varía de **0.15 a 130 m/d (1.7×10^{-5} a $1.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)**. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos, o a zonas de mayor espesor saturado.

Adicionalmente, por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos Bacanuchi, Río San Pedro, Río Frontera, Cumpas y Cocóspera, que presentan la misma litología, evolución y constitución geológica, es posible adoptar los valores de transmisividad que varían de 0.2 a $5.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (17.3 a 440.6 m^2/d), para el medio granular, y de 6.6 a $11.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (570.2 a 1002.2 m^2/d) para el medio fracturado. Los valores de conductividad hidráulica varían de 0.02 a 6.1 m/d (2.3×10^{-7} a $7.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$).

Ninguna de ellas contó con pozos de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento ni el rendimiento específico. Para el objetivo del balance de aguas subterráneas se adoptó un valor de rendimiento específico de 0.1, en los depósitos aluviales y conglomerados.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2005 además de registros históricos durante el periodo 2004-2017.

Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2004-2017 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2017.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al Nivel Estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2017 presentó valores que variaron de 2 a 80 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía, de la planicie de inundación del Río Bacoachi y arroyos hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles, conforme se asciende topográficamente.

Los niveles estáticos más someros, de 2 a 10 m, se registran a lo largo del río Bacoachi; en tanto que las mayores profundidades, de 50 a 80 m, se presentan en la porción nororiental del acuífero, en las estribaciones de la sierra Los Ajos (figura 4).

5.4.2. Elevación del Nivel Estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2017 se registraron valores que variaron de 810 a 1570 msnm, que se incrementan de la porción sur del acuífero, a lo largo del cauce del Río Bacoachi, y hacia las estribaciones de la sierra Los Ajos que lo delimita en su porción nororiental.

Los valores más altos, 1,400 a 1,570 msnm, se registran al sur de Cananea y al oeste de la mina del mismo nombre, en el límite con el acuífero Río Bacanuchi, desde donde descienden gradualmente hacia el este y luego hacia el sur por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad.

Los valores más bajos, de 850 a 810 msnm, se presentan en el extremo sur, hacia el acuífero Río Sonora. La dirección preferencial del flujo subterráneo es norte-sur y noreste-suroeste, paralela al escurrimiento del Río Bacoachi, con alimentaciones del flanco oriental (figura 5).

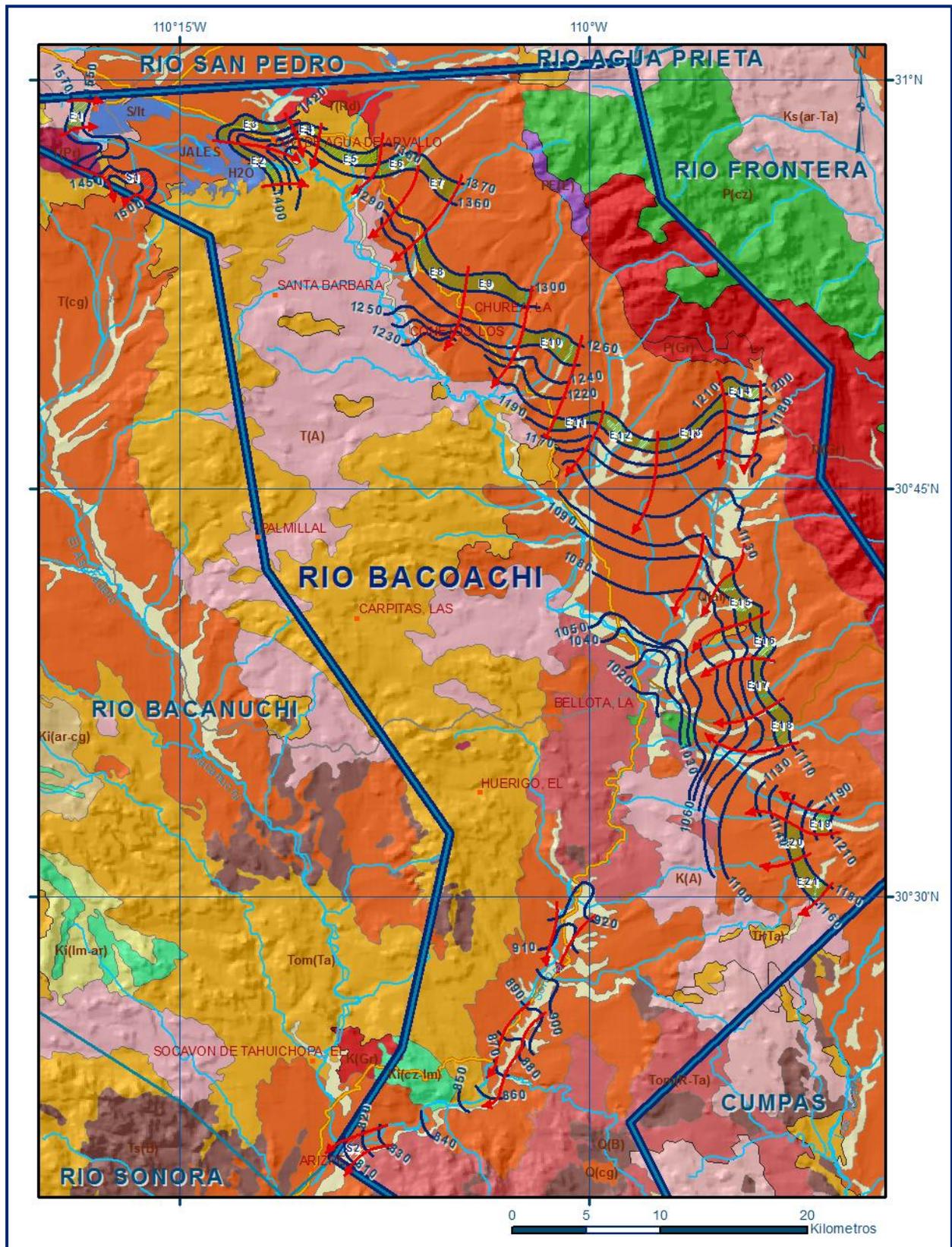


Figura 5. Elevación de nivel estático en msnm (2017)

5.4.3. Evolución del Nivel Estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2004-2017 solo registró valores de abatimiento de 1 a 2 m, que representan 0.1 a 0.15 m anuales, con valores muy locales de 4 m, en algunas regiones a lo largo del curso del Río Bacoachi, en las zonas de niveles freáticos someros. En la mayor parte de la zona de explotación no se registraron cambios importantes en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

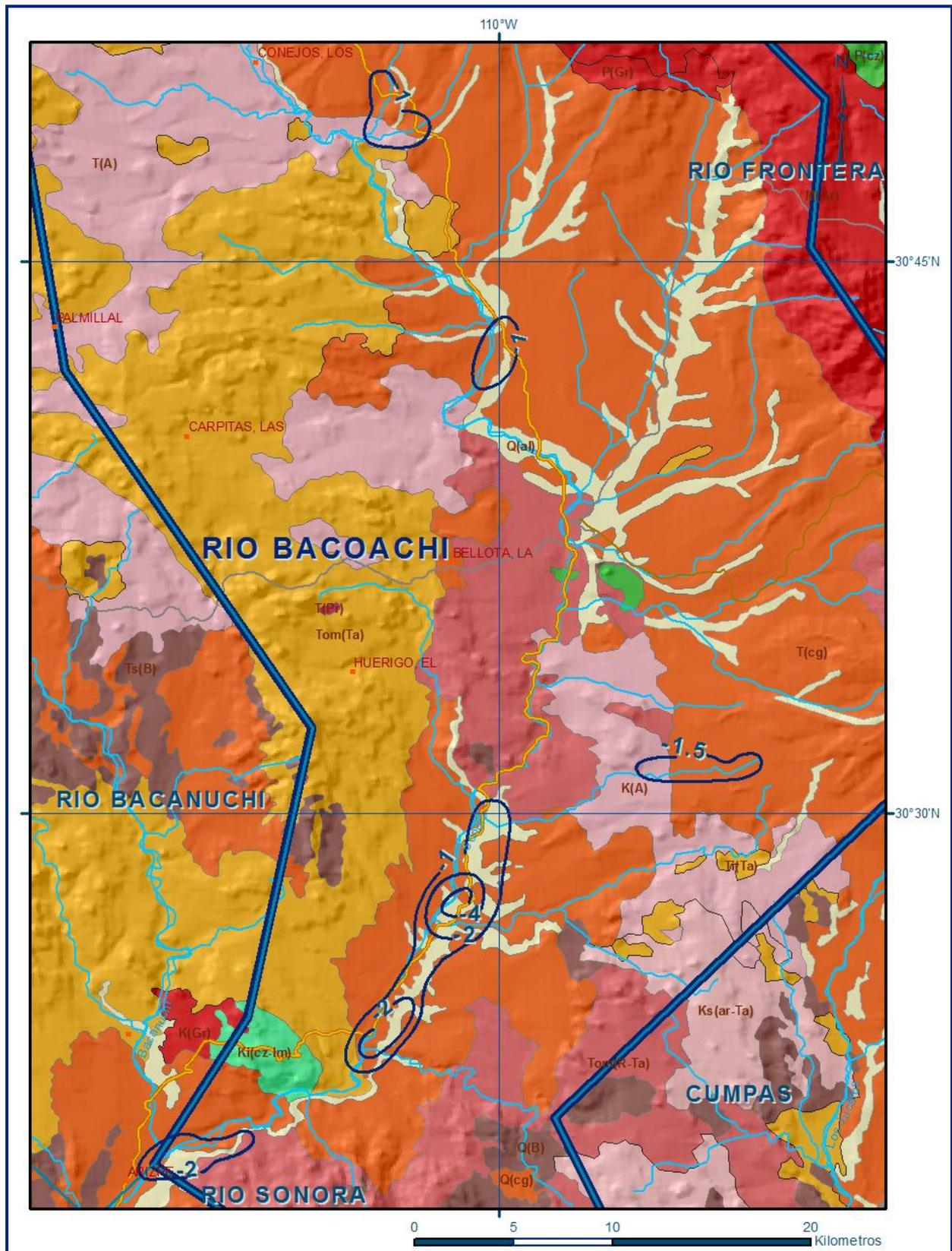


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2004-2017)

5.5. Hidrogeoquímica y Calidad del Agua Subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2005, se tomaron muestras de agua en 8 en aprovechamientos distribuidos en la superficie de explotación y 10 muestras más en 2017 en la batería de pozos que abastecen a la mina Buenavista del Cobre (Cananea), para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, fierro, manganeso, elementos traza como plomo, cobre, cadmio, arsénico y sólidos totales disueltos.

De los resultados de los análisis de laboratorio, se determina que la concentración de Sólidos Totales Disueltos (STD) varía de 470 a 2590 mg/l, 8 de los pozos de la empresa minera presentan valores de 1540 a 2590, que sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l que establece la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano. Dos de las 10 muestras del 2017 registraron valores que rebasan el LMP en la concentración de fierro y 9 en las concentraciones de dureza total, STD y sulfatos.

Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 904 a 2640 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Con respecto a la temperatura del agua muestreada, se registraron valores de 11.5 a 28.7 °C, y el valor del pH varía de 6.9 a 8.4.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS). La mayoría de las muestras analizadas se clasifica como $\text{C}_3\text{-S}_1$, es decir agua de alta salinidad y bajo contenido de sodio intercambiable, y $\text{C}_2\text{-S}_1$, que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable. El agua de la primera clasificación sólo puede utilizarse en suelos de buen drenaje, requerir lavados periódicos del suelo y en cultivos tolerantes a la salinidad. La segunda clasificación puede utilizarse en la mayoría de suelos y cultivos.

De acuerdo con la clasificación de Piper, la familia de agua que predomina es la bicarbonatada-cálcica, que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas volcánicas y calizas.

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 2017, se censaron 179 aprovechamientos más importantes del agua subterránea; 137 están activos y 42 inactivos. Del total de obras 68 son pozos (de los cuales 20 pertenecen a la empresa minera Buenavista del Cobre, S.A. de C.V. y 4 a la CEA de Sonora) y 111 norias. De las obras activas, 106 son para uso doméstico-pecuario, 20 para uso industrial (minería), 5 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 4 para actividades agrícolas y 2 para uso pecuario-agrícola.

El volumen de extracción asciende a **33.4 hm³ anuales**, de los cuales 14.9 hm³ (44.6%) son para uso industrial de las actividades mineras, 9.9 (29.6%) para uso doméstico-pecuario, 7.7 hm³ (23.1%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y 0.9 hm³ (2.7%) para uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2004-2017, en un área de balance de **1,748 km²**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

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 la 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 (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 y arroyos 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 riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Debido a que el volumen de agua subterránea para uso agrícola es muy pequeño, sólo se considera la recarga incidental ocasionada por el uso del agua para abastecimiento de agua a las comunidades de la región.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri:** Recarga incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$:** Cambio en el volumen almacenado

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

$$\mathbf{Rv = Sh + B + ETR - Eh - Ri \pm \Delta V(S) \quad (2)}$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2017 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

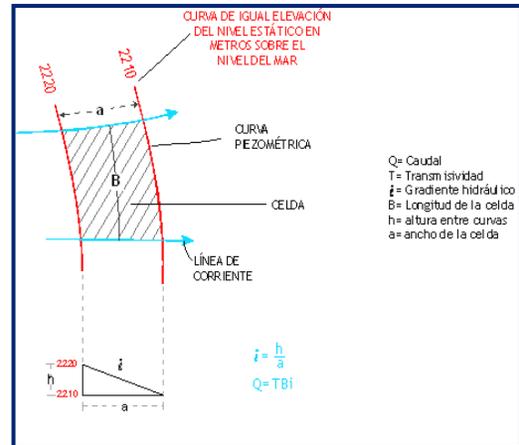
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **29.9 hm³/año**.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1928	885	20	0.0226	0.0005	0.0218	0.7
E2	3911	641	20	0.0312	0.0005	0.0610	1.9
E3	4774	1130	20	0.0177	0.0005	0.0422	1.3
E4	1590	623	20	0.0321	0.0010	0.0510	1.6
E5	3928	826	10	0.0121	0.0008	0.0380	1.2
E6	2582	1156	10	0.0086	0.0015	0.0335	1.1
E7	2995	797	10	0.0125	0.0006	0.0225	0.7
E8	4368	1027	10	0.0097	0.0005	0.0213	0.7
E9	3958	1137	10	0.0088	0.0005	0.0174	0.5
E10	3567	1165	10	0.0086	0.0015	0.0459	1.4
E11	2910	601	10	0.0166	0.0005	0.0242	0.8
E12	3863	1009	10	0.0099	0.0025	0.0957	3.0
E13	5076	648	10	0.0154	0.0005	0.0392	1.2
E14	2359	957	10	0.0104	0.0025	0.0616	1.9
E15	3180	867	10	0.0115	0.0010	0.0367	1.2
E16	3042	670	10	0.0149	0.0010	0.0454	1.4
E17	3448	649	10	0.0154	0.0010	0.0531	1.7
E18	2933	968	10	0.0103	0.0015	0.0454	1.4
E19	1558	1001	20	0.0200	0.0020	0.0623	2.0
E20	2330	909	20	0.0220	0.0005	0.0256	0.8
E21	2886	1057	20	0.0189	0.0020	0.1093	3.4
TOTAL						29.9	

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.1.3. Recarga incidental (Ri)

Para este caso, debido a que el volumen de agua para uso agrícola es muy pequeño solo se considera la infiltración de las fugas en las redes de abastecimiento de agua potable y alcantarillado. De esta manera, si tomamos en cuenta el volumen de 7.7 hm³ anuales para uso público-urbano, la profundidad somera al nivel del agua en los centros de población, la permeabilidad media en estas zonas y que un 30% de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado recarga al acuífero de manera efectiva, la recarga incidental por esta fuente es de 2.3 hm³. **Ri = 2.3 hm³ anuales.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **33.4 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 para el año 2017, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **13.2 hm³/año.**

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2017)

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	4350	681	50	0.0734	0.0012	0.3833	12.1
S2	1398	1157	10	0.0086	0.003	0.0362	1.1
TOTAL							13.2

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que

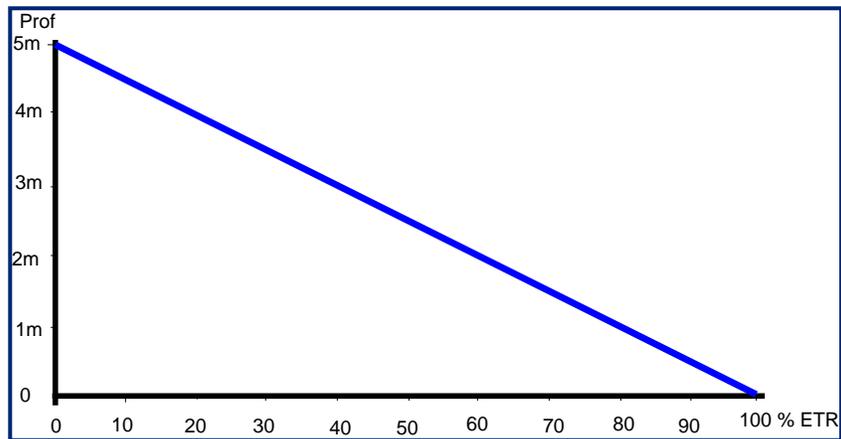
considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 18.2 °C y 550 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 508.2 mm anuales, como se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$
$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	18.2		
P(mm) =	550	P ² =	302500
L =	1056.4284	L ² =	1116040.96
ETR (mm)	508.2		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 3.1 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2016)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
4	4	5.9	0.5082	0.2	0.6
4.5	4.5	3.1	0.5082	0.1	0.2
3	3	5.3	0.5082	0.4	1.1
5 a 3	4	10.0	0.5082	0.2	1.0
5 a 4	4.5	4.7	0.5082	0.1	0.2
Total		29.0			3.1

7.3. Cambio de Almacenamiento (ΔVS)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2004-2017 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.1$ se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

- ΔVS:** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático
- h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -9.3 hm^3 , es decir, un promedio anual de -0.7 hm^3 . Por lo tanto, **$\Delta V(S) = -0.7 \text{ hm}^3$ anuales.**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2004-2017)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-1	-1	11.7	0.1	-1.2
-1.5	-1.5	5.9	0.1	-0.9
-4	-4	1.3	0.1	-0.5
-2 a -4	-3	4.8	0.1	-1.4
-2	-2	10.8	0.1	-2.2
-1 a -2	-1.5	20.5	0.1	-3.1
TOTAL		55.0	TOTAL	-9.3
Promedio anual				-0.7

Solución a 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:

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

$$R_v = 13.2 + 33.4 + 3.1 - 29.9 - 2.3 - 0.7$$

$$R_v = 16.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 16.8 + 29.9 + 2.3$$

$$R = 49.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso

agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

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 con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **49.0 hm³/año**, de los cuales 46.7 hm³ son recarga natural y 2.3 hm³ recarga incidental.

8.2. Descarga natural comprendida (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 del acuífero Río Bacoachi, el valor de la descarga natural comprometida es de **13.2 hm³ anuales**, que corresponden a las salidas por flujo subterráneo; en la cuenca alta hacia el acuífero Río Bacanuchi, y en la cuenca baja hacia el acuífero Río Sonora.

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 **31,805,930 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 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 49.0 - 13.2 - 31.805930 \\ \text{DMA} &= 3.994070 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **3,994,070 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Estatal del Agua (CEA) de Sonora, 2005. Estudio geohidrológico de las subcuencas de los ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Cuenca Bacoachito. Realizado por la Universidad de Sonora.

Buenavista del Cobre, S.A. de C.V. (Minera México), 2017 Estudio de caracterización hidrogeológica del acuífero Bacoachi, Municipio de Cananea, Sonora. Realizado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A, de C.V. (IDEAS).

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1970. Estudio de hidrología superficial de los valles de los ríos San Miguel, Sonora, Zanjón, Bacoachi y Mátape, Sonora. Realizado por Ariel Construcciones, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1974. Estudios geoeléctricos en diversas zonas del estado de Sonora. Realizado por la empresa Ingeniería y Desarrollo, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera Nacozari H12-6. Escala 1:250,000

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera Cananea H12-5. Escala 1:250,000