

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Río Bacanuchi (2628),
Estado de Sonora***

Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE SONORA							
2628	RÍO BACANUCHI	19.0	6.1	12.867849	4.1	0.032151	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO 2628 RIO BACANUCHI, ESTADO DE
SONORA***

México, D.F., Enero de 2010

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	3
Antecedentes	3
1.1. Localización	3
1.2. Situación administrativa del acuífero	5
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	7
3.1. Provincias fisiográficas	7
3.2. Clima	7
3.3. Hidrografía	7
3.4. Geomorfología	8
4. GEOLOGÍA	8
4.1. Estratigrafía	10
4.2. Geología estructural	13
4.3. Geología del subsuelo	14
5. HIDROGEOLOGÍA	15
5.1. Tipo de acuífero	15
5.2. Parámetros hidráulicos	16
5.3. Piezometría	16
5.4. Comportamiento hidráulico	16
5.4.1. Profundidad al nivel estático	16
5.4.2. Elevación del nivel estático	16
5.4.3. Evolución anual del nivel estático	19
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	20
7.1. Entradas	20
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	21
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	21
7.2. Salidas	22
7.2.1. Bombeo (B)	22
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	23
7.2.3. Evapotranspiración (ETR)	23
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	24
8. DISPONIBILIDAD	25
8.1. Recarga total media anual (Rt)	25
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	25
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	26
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	26
9. BIBLIOGRAFÍA	27

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPD).

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 Bacanuchi, definido con la clave 2628 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción norte del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 30° 18' y 30° 59' de latitud norte, y 110° 05' y 110° 34' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1776 km².

Colinda al norte con el acuífero Cuitaca, al este con Río Bacoachi, al sur con Río Sonora, al oeste con Río San Miguel y al noroeste con el acuífero Cocóspera, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1).

Geopolíticamente cubre parcialmente territorio de los municipios Cananea, Arizpe, Bacoachi e Imuris.

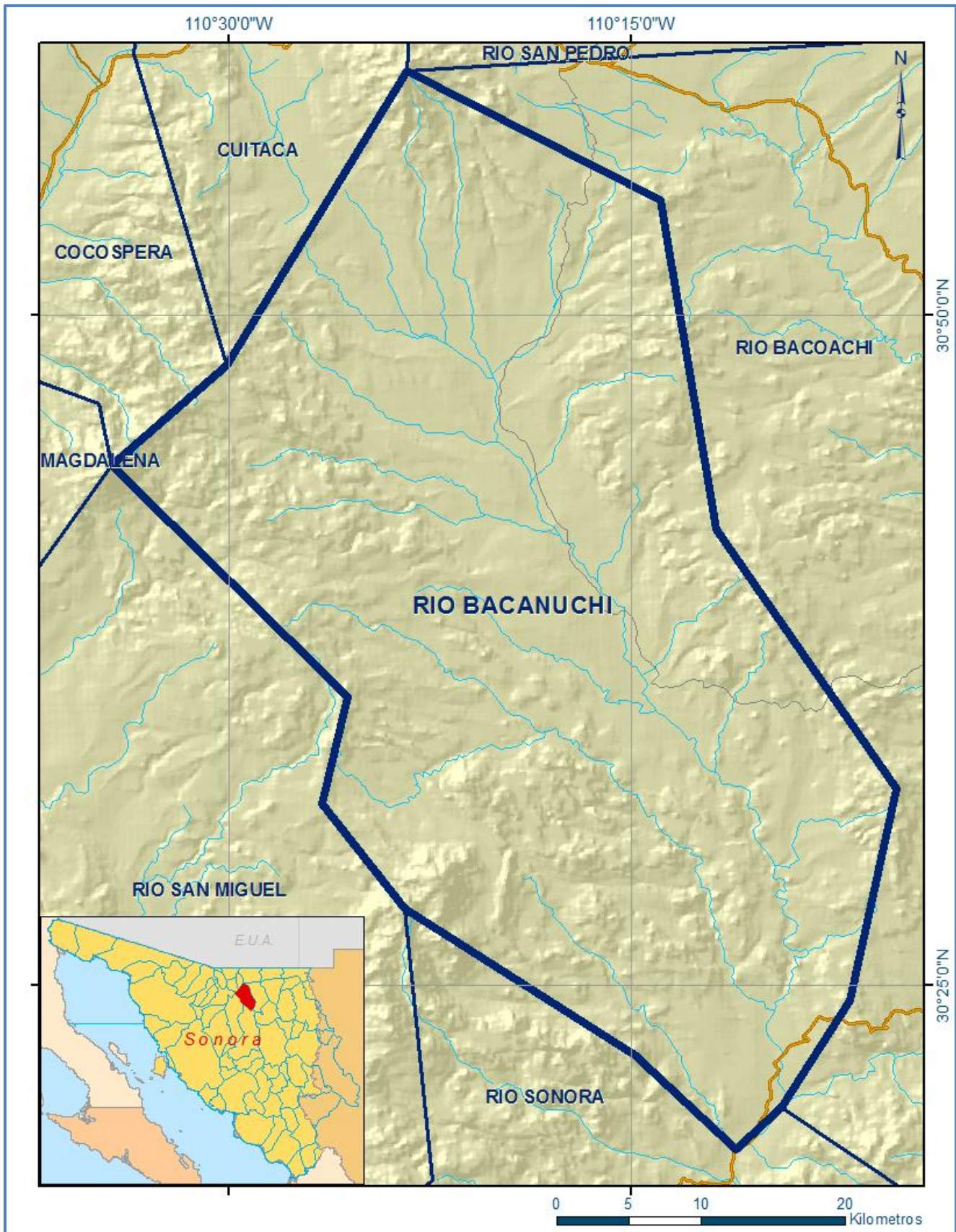


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2628 RIO BACANUCHI						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	110	5	5.9	30	32	20.4
2	110	6	50.7	30	24	27.2
3	110	9	25.0	30	20	27.8
4	110	11	5.3	30	18	55.2
5	110	14	51.6	30	22	25.2
6	110	23	26.0	30	27	52.2
7	110	26	31.4	30	31	47.7
8	110	25	35.0	30	35	46.9
9	110	34	22.4	30	44	23.3
10	110	30	6.0	30	48	9.1
11	110	23	21.1	30	59	6.8
12	110	13	55.0	30	54	16.8
13	110	11	49.0	30	42	2.4
1	110	5	5.9	30	32	20.4

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río Bacanuchi pertenece al Organismo de Cuenca “Noroeste”. La totalidad del acuífero está sujeto a las disposiciones del *“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. Este decreto es tipo II, en el que las capacidades de los mantos acuíferos sólo permiten extracciones para uso doméstico.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2010), el municipio de Cananea se localiza en la zona de disponibilidad 4, los municipios de Arizpe e Ímuris en la zona 6 y Bacoachi en la zona de disponibilidad 7. El usuario principal del agua es el sector pecuario. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos 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, elaborado por la empresa Ariel Construcciones, S.A., para la Dirección de Aguas Subterráneas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), en 1970. Entre sus conclusiones más importantes destaca que las corrientes de los ríos Sonora, San Miguel y Bacoachi presentan escurrimiento durante todo el año, aunque en algunos tramos se pierde 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 millones de m³, de los cuales 168.5 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, elaborado por la empresa Ingeniería y Desarrollo, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), en 1974. Aporta información de perfiles geoeléctricos, la mayoría de ellos perpendiculares al Río Sonora, localizados desde Mazocahui hasta Cananea.

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO DEL ESTADO DE SONORA. UNIVERSIDAD DE SONORA, elaborado para la Comisión Nacional del Agua, en 2005. El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la Gerencia Regional Noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. A parte de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de configuración del nivel estático. Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS SONORA, ZANJÓN, SAN MIGUEL, MESA DEL SERI-LA VICTORIA Y CUENCA BACOACHITO, elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Estatal del Agua (CEA) de Sonora, en 2005. 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.

Del primer estudio solo fue utilizada la información piezométrica como apoyo en la estimación de la evolución del nivel estático. La información generada en el segundo estudio, que corresponde al análisis climatológico, geología, geofísica, piezometría e hidrogeoquímica, es la más completa, por lo

que constituye la base para la elaboración de este documento, de manera que sus resultados y conclusiones se mencionan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo con la clasificación de INEGI (1989), el área cubierta por el acuífero Río Bacanuchi se ubica fisiográficamente en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, Subprovincia de Sierras y Valles del Norte. Esta región está formada principalmente por sierras entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación norte-sur y noroeste-sureste. La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur, las mayores exceden los 1,000 msnm y se encuentran al norte y oeste del acuífero.

En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas; sin embargo, existe un cuerpo ígneo que aflora localmente. En los valles abundan los materiales sedimentarios continentales (conglomerados del Paleógeno-Neógeno). A lo largo de la porción central del acuífero fluye el Río Bacanuchi en el cual drenan diferentes corrientes provenientes de las partes altas que limitan el acuífero. Los rasgos de drenaje de la cuenca del Río Bacanuchi son principalmente de tipo dendrítico y subparalelo, en la región norte, mientras al sur se encuentran corrientes aisladas.

3.2. Clima

De acuerdo a la clasificación utilizada por Köppen, modificado por E. García (1964), el clima que prevalece en la región, es el BS1 kw (x'), que corresponde a clima Semiseco-templado con lluvias en verano (BS1kw(x')). Se caracteriza porque su temperatura media anual es de 12 a 18°C, precipitación total anual entre 400 y 600 mm, verano es cálido y porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2. En general éste clima se ubica en las zonas con una altura sobre el nivel del mar entre 1000 y 2400 m.

Para el análisis climatológico se consideró la información de cuatro estaciones climatológicas: Arizpe, Bacanuchi, Cananea e Imuris, administradas por la Comisión Nacional del Agua. De acuerdo con sus registros para el periodo 1964-2004 y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron los valores promedio anuales de temperatura y precipitación, que son 17.6°C y 530.4 mm respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de 2000 mm anuales.

3.3. Hidrografía

El acuífero Río Bacanuchi, se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 9 "Sonora Sur", cuenca Río Sonora y subcuenca Río Bacanuchi. La cuenca del Río Bacanuchi tiene un área de captación de 1431 km² y su origen es en el parteaguas con el Río Bacoachi que es el primer afluente del Río

Sonora; tiene su nacimiento en las cercanías de Cananea, como producto de los escurrimientos del flanco occidental de la sierra del Manzanal, porción oriental de la sierra Papigochic y parte de la sierra de Cananea. Mantiene un caudal constante hasta su confluencia con el río Sonora. Algunos de sus arroyos tributarios mantienen un gasto constante durante el año debido a la presencia de pequeños manantiales que nacen en las sierras aledañas, además el agua de los mismos que no alcanza a llegar al cauce principal.

El río mantiene un rumbo NW-SE hasta el rancho Santa Elena, donde cambia a casi Norte-Sur hasta su desembocadura, con el Río Sonora, la cual ocurre al norte del poblado de Arizpe. El drenaje es de tipo dendrítico subparalelo y los almacenamientos de agua superficial son mínimos, contando con un volumen menor a 1 millón de m³ que se utilizan con fines pecuarios. Un km al Sur de Cananea, en las cercanías de la mina, nacen dos arroyos que llevan material de desecho hacia las presas de Jales, que se ubican al SE de la ciudad, las cuales pertenecen a la subcuenca Arizpe; dichos arroyos mantienen el gasto constante durante todo el año.

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. En el acuífero se forman estructuras complejas de rocas ígneas y sedimentarias y valles con una alineación NNW-SSE.

A continuación se mencionan las principales geoformas, definiéndose como lomeríos y planicies todos aquellos cuerpos que presentan un nivel menor a los 200m y montaña baja y alta elevaciones menores de 400 y 1150m, respectivamente: **Montaña alta** de pendiente metaestable, constituida de caliza masiva y arcillosa, arenisca, toba, ignimbrita, caliza y conglomerado de edad Cretácico Inferior a Paleoceno; **Montaña baja** constituida por rocas volcánicas de intermedia a ácida, andesita y roca piroclástica del Oligoceno; **Lomerío de pendiente estable** constituido por conglomerado polimíctico y basalto del Mioceno y **Planicie de aluvión** formada por gravas, arenas, limos y arcillas de edad Cuaternario Holoceno. Sus afloramientos se encuentran en los cauces de los ríos y arroyos, limitando con la planicie antrópica.

4. GEOLOGÍA

En el área del acuífero afloran rocas cuyo registro estratigráfico abarca desde el Paleozoico hasta el Reciente. El Paleozoico está formado por esquistos y gneises intrusionados por granodioritas; afloran también rocas mesozoicas constituidas por secuencias de calizas, areniscas y lutitas, rocas intrusivas granodioríticas y graníticas, así como rocas volcánicas riolíticas, andesíticas y tobas ácidas. El Paleógeno y Neógeno está representado por rocas intrusivas graníticas y granodioríticas, rocas

volcánicas andesíticas e ignimbríticas así como rocas sedimentarias conglomeráticas de la Formación Báucarit (figura 2).

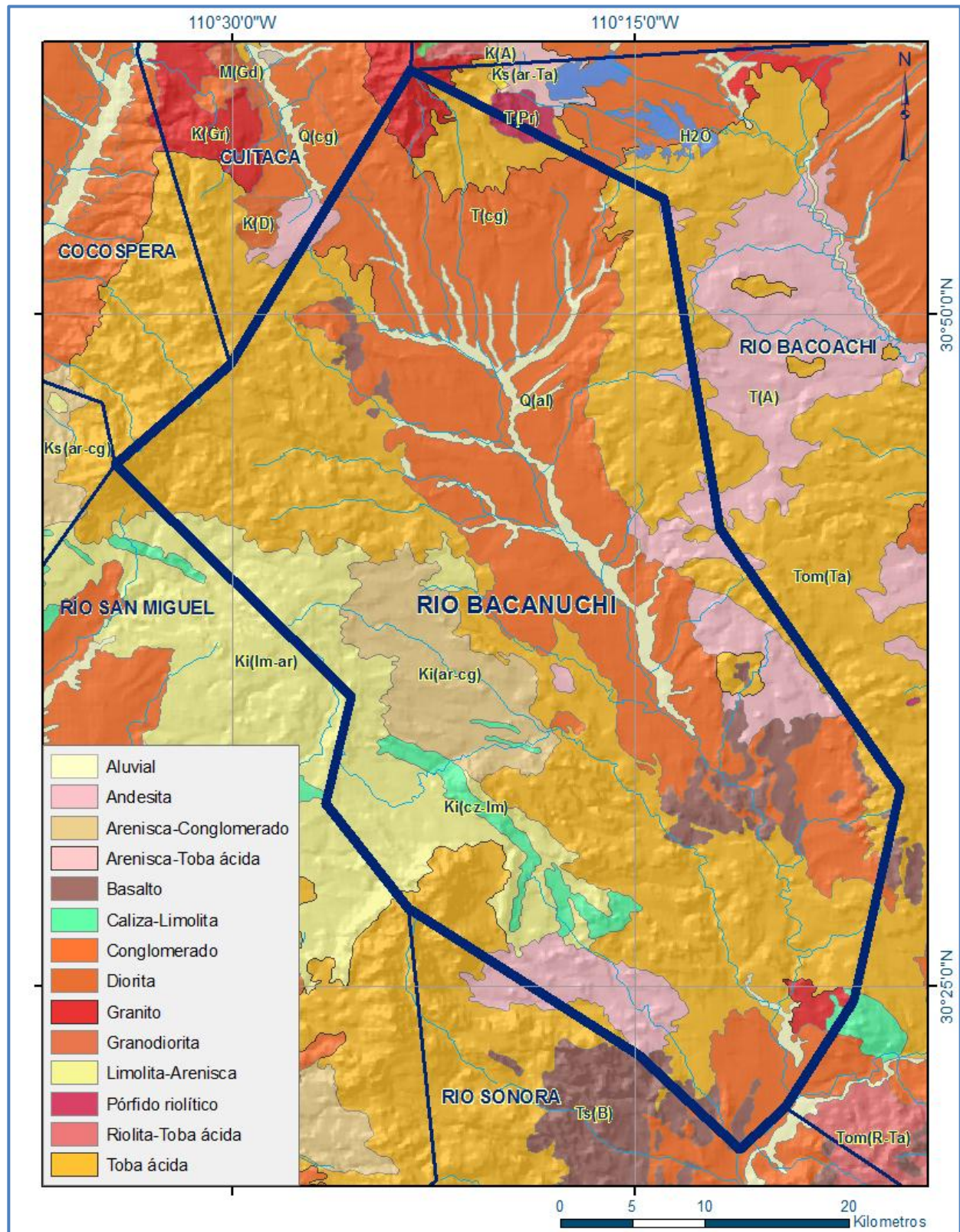


Figura 2. Mapa geológico del acuífero.

4.1. Estratigrafía

La secuencia de rocas expuestas en la región se menciona a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente:

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. Rangin (1978) considera que del Cámbrico al Ordovícico existe una graduación en las facies de plataforma, ya que en el norte del Estado, estas facies son de plataforma externa, mientras que al sur son de facies de plataforma interna. Del Carbonífero al Pérmico, las secuencias carbonatadas presentan facies más homogéneas en todo el estado. Tanto el contacto superior como el inferior de las secuencias paleozoicas se consideran discordantes con las rocas mesozoicas y precámbricas respectivamente. En la Sierra los Ajos Cendeja (1972), reporta una secuencia compuesta por calizas arcillosas y dolomitizadas con lentes arenosos y pedernal (**EmCCz**) del Cámbrico Medio-Carbonífero, correlacionable con Formación Arrojos.

Rangin (1978) considera que del Cámbrico al Ordovícico existe una graduación en las facies de plataforma ya que en el norte del estado estas facies son de plataforma externa, mientras que al sur son de facies interna. Para el periodo Carbonífero al Pérmico las secuencias calcáreas presentan facies más homogéneas en todo el Estado. Dentro del área de estudio también existe una secuencia compuesta por calizas, areniscas y lutitas (PCz-Lu) del Cámbrico al Pérmico Temprano, cuyos afloramientos se localizan al E y SW del poblado de Banachari; así mismo se reportan una secuencia compuesta por calizas y areniscas (**PiCz-Ar**) del Paleozoico Inferior, que aflora en los poblados: sureste de San José de Baviácora, oeste de Ures, noroeste de San Miguel de Horcasitas, este de Carbó, suroeste y sureste de La Junta, sureste de Rancho Viejo y sureste del Molino de Camou.

Mesozoico

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

Triásico

Está representado por areniscas, calizas, limonitas y micro conglomerados, (**TRsCz-Ar**) que afloran al sureste de Hermosillo (Sierra La Flojera), Rodríguez (1981) encontró pelecípodos a los que se les determinó una edad del Triásico Medio – Superior.

Jurásico

Flores (1929) reporta en la Sierra Caracahui una secuencia formada por areniscas, calizas y lutitas de edad Jurásico Inferior, denominada Formación Caracahui (**JiCz-Ar**), correlacionables con la

Formación Santa Rosa. Gilmont (1978) reporta una secuencia compuesta por riolitas y riodacitas (**Ji(?) R-Rd**) de edad Jurásico Inferior (?), que aflora al SE del poblado de Sinoquipe. Salas (1968) define una secuencia metamórfica compuesta por esquistos, filitas, metacaliza, cuarcita y gneis de edad Jurásico Medio (**Jm(?)E-Gn**) nombrada como Complejo Metamórfico Santa Ana, que aflora al SE y NW del poblado de Cucurpe.

Ramsome (1904) describe un conglomerado como Formación Conglomerado Glance (**Js-Cg**) de edad Jurásico Superior – Cretácico Inferior, estos pequeños afloramientos se observan al oeste y suroeste del poblado de Bacanuchi. Rodríguez (1986) define la Formación La Colgada, compuesta por lutitas, calizas, areniscas y rocas volcánicas (**JsLu-Ar**) de edad Jurásico Superior, correlacionable con la Formación Cucurpe, la cual aflora al sureste de Cucurpe y al sureste de Bacoachi.

Cretácico

El Cretácico Inferior en el acuífero, está representado por conglomerado de matriz arenosa, con fragmentos de cuarcitas, dolomitas y limonitas del Cretácico Inferior (**KiCz-Ar**), correlacionable con el Grupo Bisbee. Este aflora en parte oeste de Bacanuchi, noreste de Tuape, oeste de Sinoquip y, suroeste de Rayón.

En el estado de Sonora varios autores han reportado afloramientos del Cretácico Inferior como son: región de Cabullona (Ransome, 1904; Talafierro, 1933; Viveros, 1965; Warzeski, 1983); en la Sierra Azul (Mckee, 1991; Rangin, 1986); en la Sierra del Tigre (Imlay, 1939); en Arizpe (González, 1978); Tuape (Rodríguez Castañeda, 1984); en Huepac (Bojórquez *et al.*, 1988); en Cerro de Oro (González *et al.*, 1988); Monreal (*et al.*, 1994) menciona que en el Grupo Bisbee se encuentra en la mayoría de las áreas donde afloran rocas del Cretácico Inferior en Sonora, inclusive en aquellas donde se han reportado unidades a las cuales le han asignado nombres formacionales diferentes a los comúnmente empleados para este Grupo, por lo tanto concluye que dichos nombres deben de abandonarse para ser reemplazados por la nomenclatura del Grupo Bisbee (Ransome, 1904).

Rodríguez (1994), define a la Formación El Tuli compuesta por conglomerado, tobas ignimbríticas y calizas de edad Cretácico Superior (**Ks Cg-T-Cz**), correlacionables con los Grupos El Chanate y El Chorro, los cuales afloran en SW y NE de Bacanuchi y W de Sinoquipe.

En el Cretácico Superior se presentan dos secuencias 1) una compuesta por andesitas, riolitas y tobas (**Ks A-R**), la cual aflora al oeste del poblado de Tres Álamos, suroeste de La Noria de Aguilar, sur de San Miguel de Horcasitas y 2) otra compuesta por areniscas, limonitas, lutitas y conglomerados (**KsAr-Cgp**) de edad Campaniano-Maastrichtiano (Talafierro, 1933), la cual aflora al sur del poblado de Bacoachi.

En el acuífero aflora una secuencia compuesta por andesitas, tobas, calizas, areniscas (**KsTiA-Cz**) de edad Cretácico Superior – Paleógeno, correlacionable con la Formación Tarahumara, la cual se

puede observar en los poblados: Banachari (al noroeste), Huepac (al oeste), Tres Álamos (al suroeste y sureste), Las Norias de Aguilar (al oeste), San José de Baviácora (al este), Aconchi (al este) y San Felipe de Jesús (al este).

Del Cretácico Superior al Paleógeno la zona del acuífero fue el escenario de una profunda actividad magmática, actualmente representada por una serie de rocas ígneas de composición granítica, que se separaron dos grandes cuerpos: uno compuesto por granito con textura hipidiomórfica, holocristalina con cuarzo, microclina y ortoclasa (**TeGr**), de edad Eoceno (Carta Geológica del Consejo de Recursos Minerales, 2002), que aflora al oeste de Aconchi; el otro cuerpo de composición granítica (granitos, granodioritas y dioritas) (**KsTGr-Gd**) aflora en Rancho Nuevo, Mazocahui, Baviácora y suroeste de Aconchi.

Paleoceno

Se caracteriza por una serie de eventos vulcano-plutónicos según Rangin (1978), localizados en la región centro-noreste de Sonora, cuya alineación es NNW–SSE, desde Cananea a Nacozari. Estos afloramientos de rocas del Paleógeno y Neógeno abarcan más de dos terceras partes del acuífero, están constituidos principalmente por rocas volcánicas como son: riolitas, ignimbritas y andesitas, y rocas plutónicas, que corresponden a monzogranitos o pórfidos monzoníticos, en menor proporción con respecto al resto de las rocas cenozoicas. También se reportan rocas sedimentarias clásticas (Dumble, 1900 y King 1939) que afloran a lo largo de toda la cuenca, conformadas por conglomerados polimícticos, en algunos lugares afloran areniscas del mismo evento que pertenecen a la parte distal del abanico aluvial.

Al sur del poblado de Mazocahui se localizan pequeños afloramientos de rocas volcánicas (riolita, riolacitas y tobas) de edad Eoceno **TeR-TR** (Carta Geológica, CRM, 2002), correlacionables con la Formación Tarahumara. En el Oligoceno, aflora una secuencia, ampliamente distribuida en el área, compuesta por aglomerado, ignimbrita, toba y brecha, **ToTR-A** reportado por McDowell y Claibough (1979), la cual es correlacionable con la Sierra Madre Occidental.

Neógeno

Dumble (1900) reporta dos secuencias conglomeráticas de edad miocénica; una compuesta por conglomerado polimíctico **TmCgp-B** constituido por fragmentos de rocas volcánicas, plutónicas y sedimentarias, en una matriz generalmente arenosa, que presenta compactación que varía de mediana a baja, intercalados con basaltos (denominada como Formación Báucarit). Esta unidad aflora en las márgenes de las montañas altas y medias, formando lomeríos altos y n grandes acantilados hacia las márgenes de los ríos. Aflora en los poblados de Bacoachi, Cucurpe, Bacanuchi y Rayón. La otra secuencia está compuesta por areniscas y conglomerados polimícticos **TmCgp-Ar** que aflora al Este de Baviácora y al Este de Ures. Ambos correlacionables con el Conglomerado Gila en Arizona. En el Mioceno-Pleistoceno se presentó un evento volcánico compuesto por riolitas cubiertas por basaltos (**TmpR-B**), afloran al W del poblado La Junta (Carta Geológica, CRM, 2002).

Cuaternario

Estas secuencias corresponden a depósitos aluviales de granulometría y composición muy diversa. Su granulometría varía de acuerdo a la distancia respecto a la roca madre. Las franjas de piedemonte, constituidas de gravas, arenas y limos, que bordean las montañas altas y medias constituyen zonas de recarga. Las amplias planicies aluviales de las porciones central y occidental han desarrollado terrazas aluviales ocasionadas por eventuales rejuvenecimientos. Estas secuencias de sedimentos afloran en las partes bajas de los valles. Estas secuencias descansan discordantemente sobre rocas más antiguas, pero en mayor proporción sobre rocas del Paleógeno y Neógeno.

En el Cuaternario se depositaron potentes paquetes de sedimentos continentales, con presencia de esporádicos derrames de basaltos y aparatos volcánicos (**QB**) constituidos por basaltos de olivino, andesitas basálticas y conglomerados. Afloran al noroeste de Tuape y suroeste de Bacoachi. En la parte central del área afloran conglomerados, limos y arenas poco consolidadas (**QptCgp**) con una orientación predominante NW-SE.

4.2. Geología estructural

Gran parte de la morfología obedece a 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 estructuras geológicas (fallas y fracturas) que siguen los ríos como zonas de debilidad.

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 que está 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 afallados 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 efectos 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 superficie del acuífero se presenta un patrón de lineamientos regionales con una orientación preferencial NW-SE, produciendo sierras paralelas a esta dirección. La mayoría de las estructuras corresponden a fallas normales de alto ángulo que corresponde al tipo Basin And Range de fosas y pilares (horst-graben), relacionados a la tectónica extensional ocurrida durante el Neógeno.

4.3. Geología del subsuelo

Con base en los resultados del análisis de la geología del subsuelo: descripción de cortes litológicos; interpretación de 5 sondeos geofísicos, 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 por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente.

El medio granular está constituido por depósitos aluviales y conglomerados de permeabilidad media que conforman el acuífero regional que actualmente se explota, cuyo espesor alcanza los 100 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, conformando las sierras que lo delimitan.

La permeabilidad que presentan estas rocas es media a baja. Las fronteras inferiores y laterales están constituidas por las rocas graníticas y riolíticas, así como las rocas volcánicas cuando su permeabilidad por fracturamiento desaparece.

La sección esquemática mostrada en la figura 3, paralela al cauce del Río Sonora, se construyó con la información de sondeos geofísicos separados entre a una distancia de 2.5, que fueron realizados en el 2005. Tiene una longitud de 10 km, desde su origen ubicado en las inmediaciones del poblado Arizpe.

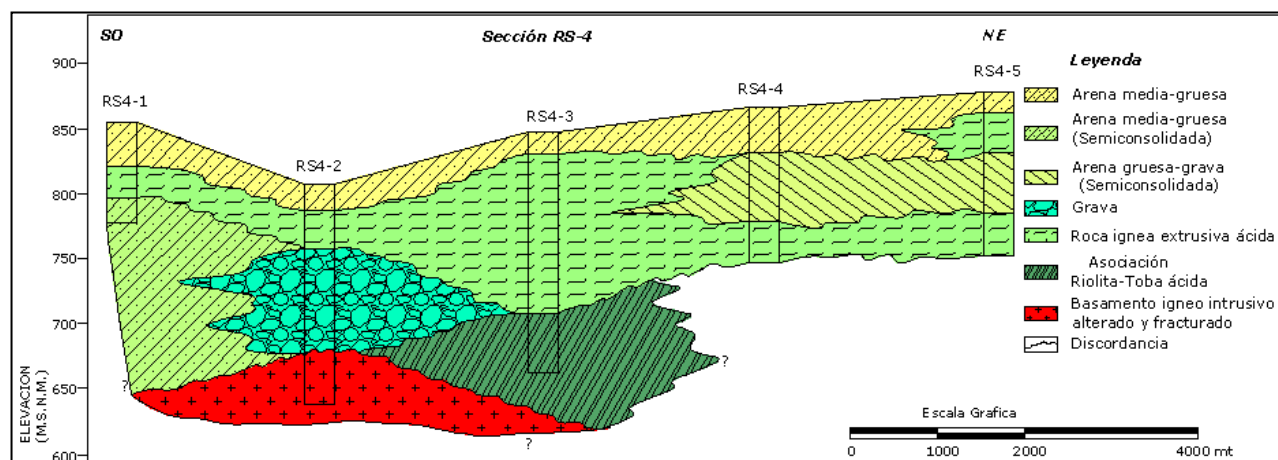


Figura 3. Sección hidrogeológica esquemática orientada SO-NE

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir la presencia de un acuífero heterogéneo y anisotrópico, de **tipo libre** que presenta condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de lentes de sedimentos arcillosos. Está conformado, en porción superior, por depósitos aluviales y conglomerados; y en su porción inferior por rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas, que en conjunto presenta un espesor promedio de 150 m. Considerando las posibilidades de las rocas de contener agua, tomando en cuenta sus características físicas, litológicas y estructurales, además de la influencia en el comportamiento geohidrológico dentro de cada unidad y según los materiales que constituyen las unidades, se determinaron dos grupos: consolidados y no consolidados.

Material consolidado con posibilidades bajas

Se constituye por rocas ígneas, sedimentarias, vulcanosedimentarias y metamórficas, que conforman la zona montañosa. Presentan características no favorables para conformar acuíferos, debido a que la gran mayoría de los cuerpos rocosos son impermeables o de muy baja permeabilidad.

Material no consolidado con posibilidades bajas

Está constituido por un conglomerado polimíctico, con fragmentos redondeados, incluidos en una matriz arcillo-arenosa ligeramente cementada; los clastos son derivados de rocas volcánicas ácidas y básicas y algunas sedimentarias. Sobreyacen en forma discordante a rocas riolíticas y tobas ácidas impermeables así como también a rocas intrusivas y sedimentarias. Presentan baja permeabilidad y la ausencia de obras de captación confirma la inexistencia de acumulación del agua subterránea económicamente explotable.

Material no consolidado con posibilidades medias

Constituido por conglomerados del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, ocasionalmente intercalados con basaltos. Los fragmentos varían en tamaño desde cantos rodados hasta limos y arcillas que rellenan las depresiones de estos lugares, los materiales son de composición variable, en ocasiones cementados. Presenta permeabilidad media a alta y constituyen acuíferos de tipo libre. En esta unidad se localizan norias en las que la profundidad al nivel estático varía de 3 a 8 m.

Material no consolidado con posibilidades altas

Está constituido por conglomerados semiconsolidados del Paleógeno-Neógeno y Pliocuaternalio, así como aluviones, depósitos eólicos y de piedemonte que se encuentran en cuencas vecinas y en los depósitos próximos al río Bacanuchi. Presenta permeabilidad media a alta.

5.2. Parámetros hidráulicos

De acuerdo con los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio llevado a cabo en el año 1970, en el acuífero Río Bacoachi, los valores de transmisividad varían de **10.0 a 50.0 x 10⁻³ m²/s**. Ninguna de ellas contaron con pozos de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento ni el rendimiento específico.

Adicionalmente, por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos Río Bacoachi, Río Sonora, Río San Miguel, Magdalena, Cocóspera y Cuitaca, que presentan la misma litología y evolución geológica, es posible adoptar valores de transmisividad que varían de **0.2 a 5.1 x 10⁻³ m²/s**, para el medio granular, y de **6.6 a 11.6 10⁻³ m²/s** para el medio fracturado. Los valores de conductividad hidráulica varían de **0.02 a 6.1 m/d** (2.3 X10⁻⁷ a 7.1 X10⁻⁵ m/s).

5.3. Piezometría

Únicamente se cuenta con información piezométrica para el periodo 2004-2005, con la que se elaboraron las configuraciones correspondientes. Debido a que los niveles del agua no muestran variaciones significativas para estos años, sólo se describe la configuración de profundidad y elevación correspondientes al 2005.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático presenta valores que varían de 5 a 20 m, los valores se incrementan, por efecto de la topografía, desde el subálveo del río Bacanuchi y otros arroyos hacia las laderas de las sierras que delimitan el acuífero (figura 4).

5.4.2. Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5, se observa que los valores varían gradualmente, al igual que la profundidad, por efecto de la topografía a lo largo del cauce del río Bacanuchi y arroyos tributarios, conforme se asciende topográficamente desde el cauce hacia las estribaciones de las sierras que conforman el límite del acuífero; desde 1440 msnm que se registran en la porción norte del acuífero, hasta 880 msnm en el extremo sur.

La dirección preferencial del flujo subterráneo muestra una trayectoria s de NW - SE, paralela al Río Bacanuchi, con alimentaciones laterales que provienen de las sierras circundantes.

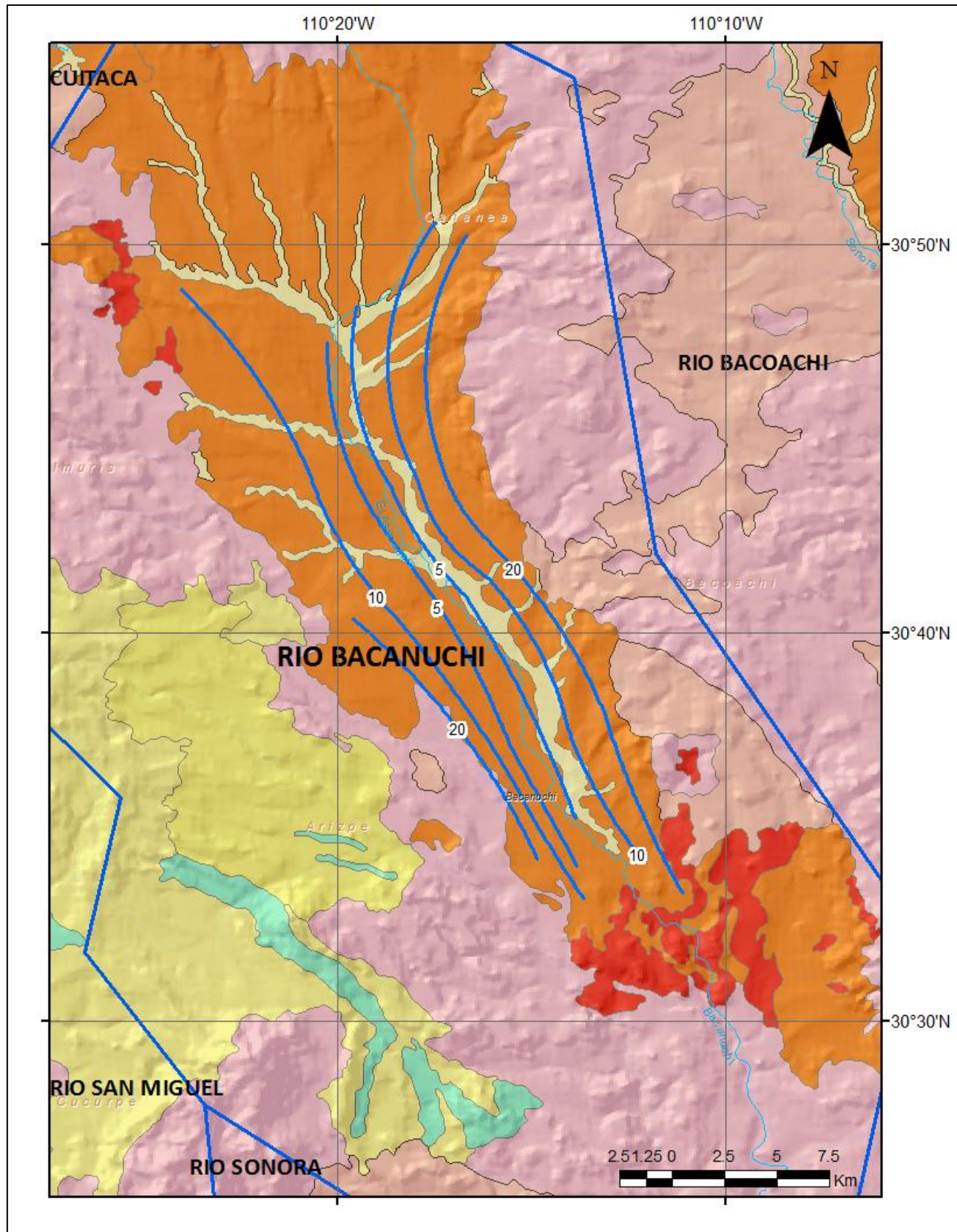


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2005)

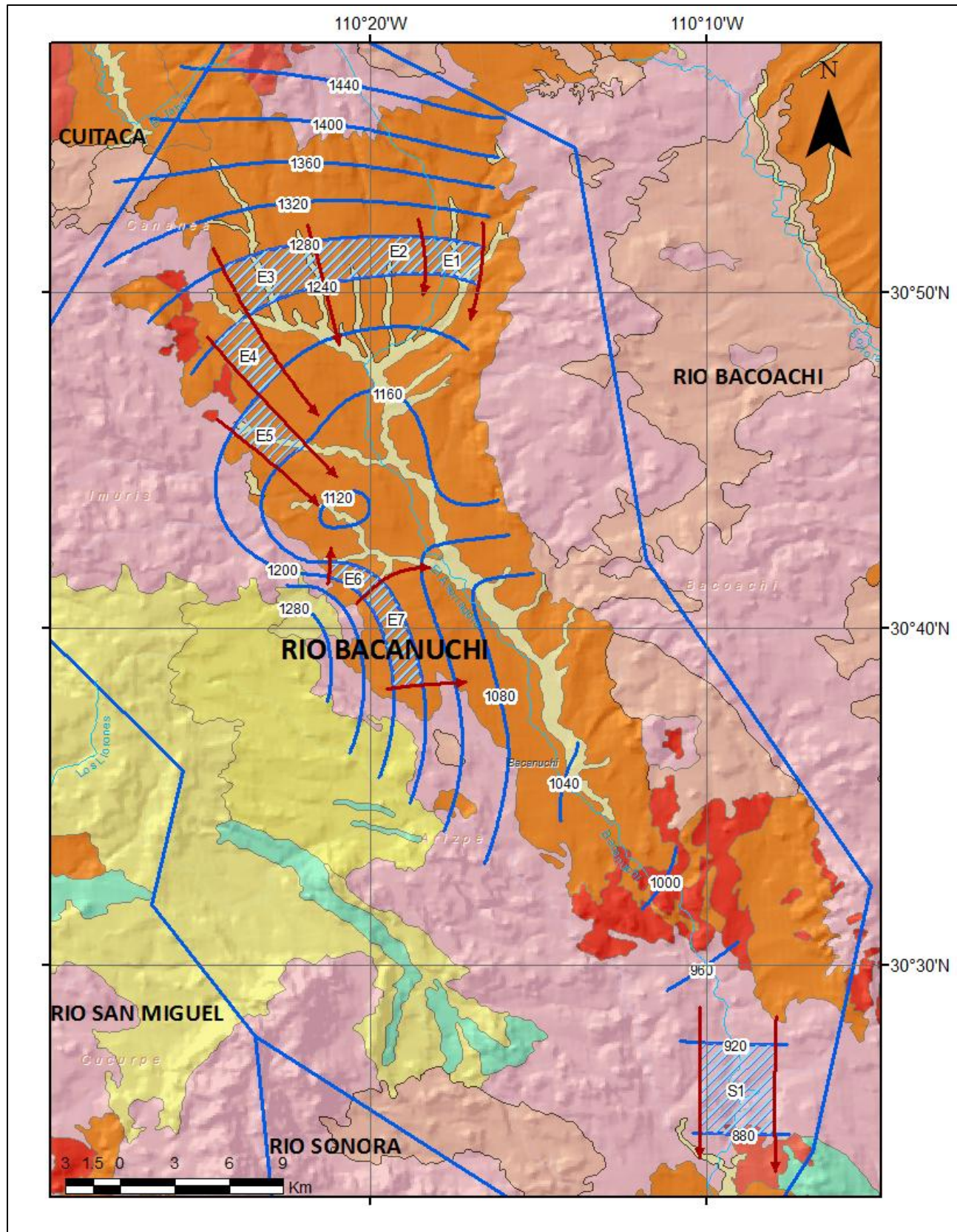


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2005)

5.4.3. Evolución anual del nivel estático

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica suficiente para elaborar una configuración de evolución. Las escasas mediciones piezométricas recabadas para el periodo 2004-2005 reflejan variaciones puntuales tanto positivas como negativas y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático muestra condiciones naturales en el comportamiento del flujo subterráneo que no han sido alteradas por la concentración de pozos y/o del bombeo.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2005, se tomaron muestras de agua en 10 aprovechamientos y una en la descarga del Arroyo Milpillas, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos.

Tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 678 a 1299 mg/l como máximo. En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995) ya que sus valores varían de 370 a 1640 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En general, el rango de pH se mantiene ligeramente por encima de la neutralidad, la mayoría de las muestras analizadas corresponden con valores de pH en el rango de 7 a 8.3, lo que indica que en general para toda el área de estudio el agua es ligeramente alcalina, es decir, la presencia de carbonatos en la zona de estudio muestra un claro predominio sobre el contenido de sulfatos en el agua.

De acuerdo con la clasificación de Piper, la familia de agua predominante es la bicarbonatada sódica, que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas volcánicas principalmente.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo realizado en el 2005, se registró la existencia de un total de 26 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 17 son pozos y los 9 restantes norias. Del total de aprovechamientos, 21 se encuentran activos y los 5 restantes inactivos.

El volumen de extracción calculado es de **4.1 hm³ anuales**, de los cuales 2.8 hm³ (68.3 %) se destina al uso pecuario, 0.7 hm³ (17.1 %) al uso doméstico; 0.4 hm³ al uso agrícola (9.7 %) y los 0.2 hm³ restantes (4.9%) satisfacen las necesidades del sector industrial.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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:

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

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

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

El balance de aguas subterráneas se definió para el periodo 2004-2005, en una superficie de 220 km² que corresponde a la zona donde se localizan los aprovechamientos de agua subterránea.

De esta manera la ecuación de balance propuesta para éste acuífero es la siguiente:

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

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Eh= Recarga por flujo horizontal;

B= Bombeo;

Sh= Salidas por flujo horizontal;

ETR= Evapotranspiración real en niveles someros;

$\Delta V(S)$ = Cambio en el volumen almacenado;

7.1. Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, para fines del balance se considera que no se presenta la recarga por retornos agrícolas. Por lo que **Ri = 0**.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1). De esta manera, despejando la recarga vertical (Rv) se obtiene lo siguiente:

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

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 área de estudio 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 tienen 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 2005 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

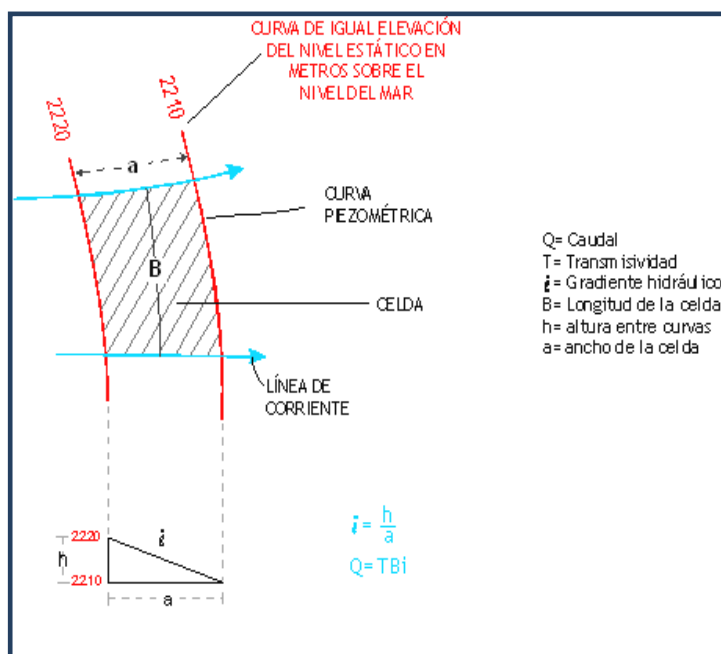
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



Para el cálculo es necesario conocer el espesor saturado del acuífero (b) y su coeficiente de permeabilidad (K), o bien, el valor de transmisividad (T). Los demás datos se obtienen de la piezometría. Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático y la geología, y se calcula el flujo a través de cada una de ellas.

Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas fueron tomados de los resultados promedio de las pruebas de bombeo realizadas para la SRH en 1970 (Ariel Construcciones, S.A), así como los provenientes de estudios realizados en los acuíferos vecinos Río Bacoachi, Río Sonora, Río San Miguel, Magdalena, Cocóspera y Cuitaca; adaptados al espesor saturado del acuífero en las celdas de flujo definidas.

De acuerdo con la configuración del nivel estático para el año 2005 mostrada en la figuras 5, las entradas se localizan sobre el cauce del Río Bacanuchi y los principales arroyos tributarios. El cálculo del flujo en las celdas de entradas se muestra en las tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo para el 2004

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
			(m)		(m ² /s)		
E1	2700	1960	40	0.0204	0.0020	0.1102	3.5
E2	5000	2200	40	0.0182	0.0010	0.0909	2.9
E3	4500	2600	40	0.0154	0.0015	0.1038	3.3
E4	2000	3400	40	0.0118	0.0010	0.0235	0.7
E5	2100	3100	40	0.0129	0.0020	0.0542	1.7
E6	2350	1120	40	0.0357	0.0015	0.1259	4.0
E7	5650	1250	40	0.0320	0.0010	0.1808	5.7
Total entradas							16.1

El volumen total de entradas por flujo subterráneo se estima en **16.1 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) y evapotranspiración (ETR) en zonas con niveles someros. No existen manantiales ni descarga por flujo base.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **4.1 hm³/año**.

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 mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo para 2004

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
			(m)		(m^2/s)	(m^3/s)	($hm^3/año$)
S1	3600	5080	40	0.0079	0.0030	0.0850	2.7
Total salidas							2.7

El volumen total de salidas por flujo subterráneo se estima en **2.7 hm^3 anuales**.

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

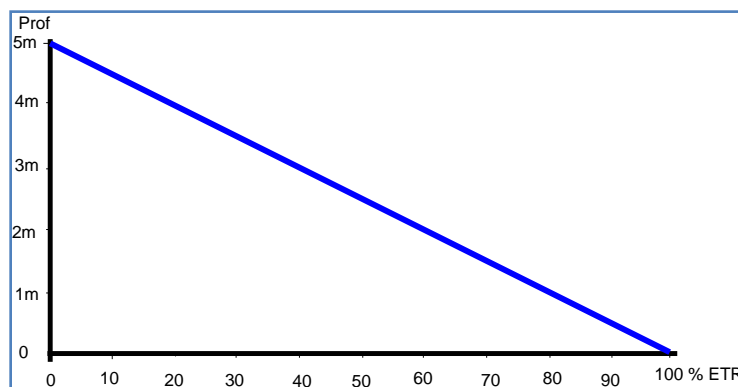
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 17.6 °C y precipitación= 530.4 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 489.4 mm.

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

T (°C) =	17.6		
P(mm) =	530.4	P ² =	281324.16
L =	1012.5888	L ² =	1025336.1
ETR (mm)	489.4		

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 10 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 10 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 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



Si se considera que en una superficie de 50 km² a lo largo del Río Bacanuchi (entre 16 de Septiembre, Bacanuchi y Arizpe) se registran niveles freáticos someros, con cobertura vegetal cuyas raíces son suficientemente largas y susceptibles a evapotranspirar, en la que la profundidad promedio al nivel del agua subterránea es de 5 m y una lámina de evapotranspiración real obtenida es de 489.4 mm, de acuerdo con la gráfica anterior: $ETR = 50 \text{ km}^2 (0.4894 \text{ m}) (0.5) = 12.2$. Por lo que **ETR = 12.2 hm³ anuales**.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica suficiente para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Las escasas mediciones piezométricas recabadas para el periodo 2004-2005 registran valores puntuales tanto positivos como negativos en una pequeña superficie del acuífero y no muestra alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento, que pudieran ser causadas por la concentración del bombeo y/o de aprovechamientos.

Por ello se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto **$\Delta V(S) = 0$** .

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración vertical (R_v), por lo que mediante la ecuación (2), se tiene:

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

$$R_v = 4.1 + 2.7 + 12.2 + 0.0 - 16.1$$

$$R_v = 2.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (R_t) es igual a la suma de todas las entradas:

$$R_t = R_v + E_h$$

$$R_t = 2.9 + 16.1$$

$$R_t = 19.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS= Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

R_t= Recarga total media anual;

DNCOM= Descarga natural comprometida;

VCAS= Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

8.1. Recarga total media anual (R_t)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R_t), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **19.0 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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 este caso particular, se considera un volumen de descarga natural comprometida de **6.1 hm³ anuales**, que corresponden al 50 % de la evapotranspiración que deben preservarse para proteger el ecosistema ribereño del cauce del río Sonora. No se considera comprometida la salida subterránea porque la zona en donde fue posible evaluarlas se localiza a 10 km del límite con el acuífero Río Sonora y existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento, con derechos vigentes, en el acuífero Río Bacanuchi.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2010, es de 2'609,858 m³/año.**

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPD.

$$\text{DAS} = R_t - \text{DNCOM} - \text{VCAS} \quad (3)$$

$$\text{DAS} = 19.0 - 6.1 - 2.609858$$

$$\text{DAS} = 10.290142 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **10'290,142 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto su disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación. No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo en pozos cercanos a los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFIA

Comisión Nacional del Agua, 2005. Atlas de Aguas Subterráneas para el Estado de Sonora y Diseño de una Red de Monitoreo Piezométrico. Realizado en convenio por Universidad de Sonora.

Comisión Estatal del Agua (CEA) en 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.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), Dirección de Aguas Subterráneas, 1970. Estudio de hidrología Superficial de los Valles de los Río San Miguel, Sonora, Zanjón, Bacoachi y Mátape, Sonora. Realizado por la empresa Ariel Construcciones, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), Dirección de Aguas Subterráneas, 1974. Estudios Geoeléctricos en Diversas Zonas del Estado de Sonora. Realizado por la empresa Ingeniería y Desarrollo, S.A.