

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Cocóspera (2614),
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							
2614	COCÓSPERA	15.0	3.2	6.563016	2.7	5.236985	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 2614 COCÓSPERA, ESTADO DE SONORA***

México, D.F. Junio de 2010

CONTENIDO

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes	2
1.1. Localización	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	5
3.1. Provincias fisiográficas	5
3.2. Clima	6
3.3. Hidrografía	7
3.4. Geomorfología	7
4. GEOLOGÍA	8
4.1. Estratigrafía	8
4.2. Geología estructural	13
4.3. Geología del subsuelo	14
5. HIDROGEOLOGÍA	15
5.1. Tipo de acuífero	15
5.2. Parámetros hidráulicos	15
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 del nivel estático	16
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua	18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	19
7.1. Entradas	20
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	20
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	20
7.2. Salidas	22
7.2.1. Bombeo (B)	22
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	22
7.2.3. Evapotranspiración (ETR)	22
7.3. Cambio de almacenamiento(ΔV_S)	23
8. DISPONIBILIDAD	24
8.1. Recarga total media anual (Rt)	25
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	25
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	25
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	25
9. BIBLIOGRAFÍA	26

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 Cocóspera, definido con la clave 2614 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° 44' y 31° 07' de latitud norte y 110° 30' y 110° 46' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 650 km².

Colinda al norte con el acuífero Río Santa Cruz, al este con el acuífero Cuitaca, al sureste con el acuífero Río Bacanuchi, al suroeste con el acuífero Magdalena y al oeste con el acuífero Río Alisos, todos ellos pertenecientes al Estado de Sonora (figura 1).

Geopolíticamente se encuentra ubicado parcialmente en los municipios de Ímuris, Santa Cruz, Cananea y Nogales.

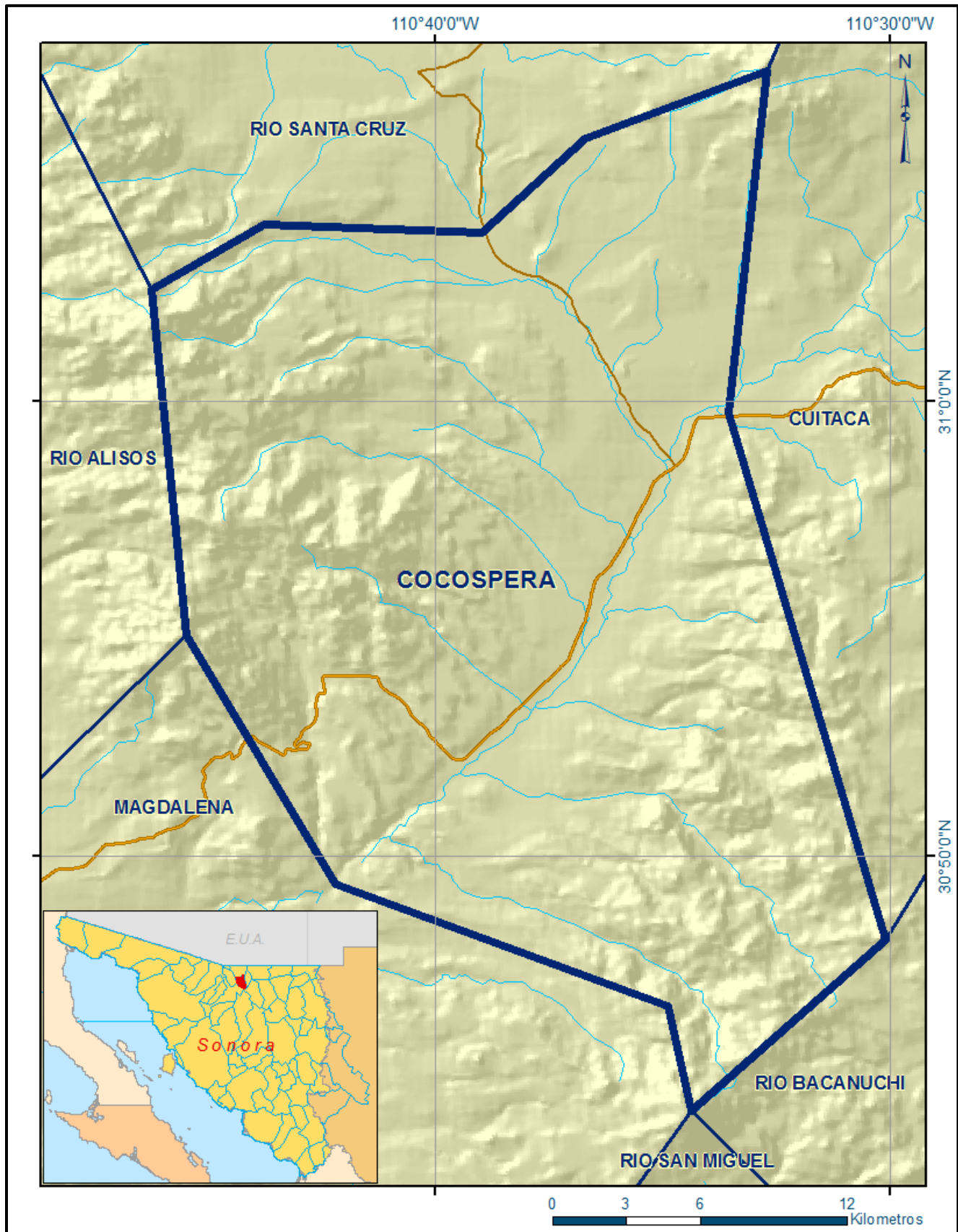


Figura 1. Localización del Acuífero Cocóspera

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 2614 COCOSPORA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	110	33	33.3	30	59	45.3
2	110	30	6.0	30	48	9.1
3	110	34	22.4	30	44	23.3
4	110	34	52.7	30	46	41.2
5	110	42	11.9	30	49	22.9
6	110	45	29.2	30	54	51.9
7	110	46	14.5	31	2	27.0
8	110	43	46.6	31	3	54.4
9	110	38	59.3	31	3	42.3
10	110	36	41.7	31	5	47.2
11	110	32	41.9	31	7	16.2
1	110	33	33.3	30	59	45.3

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cocóspera pertenece al Organismo de Cuenca “Noroeste”. Se encuentra totalmente vedado mediante tres decretos de veda. El extremo noroeste del acuífero se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región denominada Cuenca del Río Santa Cruz, Municipios de Nogales y Santa Cruz, Estado de Sonora”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 25 de Enero de 1961. La parte central del acuífero se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de Septiembre de 1978. Estos decretos se clasifican como tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El extremo sur se encuentra 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 tercera ampliación*, por medio de la 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 se clasifica como tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones limitadas para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2010), los municipios Cananea y Nogales se ubican en zona de disponibilidad 4, mientras que Ímuris y Santa Cruz pertenecen a la zona de disponibilidad 6. El usuario principal es el público urbano. 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 cubierta por el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ESTADO DE SONORA, elaborado por la Universidad de Sonora, 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.

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO 2614 COCÓSPERA, ESTADO DE SONORA, MÉXICO, elaborado por La Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en 2006. El estudio realiza la evaluación geohidrológicas del acuífero mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo, hidrometría, piezometría, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos, toma de muestras para análisis fisicoquímicos, ejecución de sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos. Para determinar las características del subsuelo se realizaron 11 Sondeos Eléctricos Verticales, algunos de estos de tipo paramétrico. Se llevó a cabo la nivelación de 17 brocales con equipo de alta precisión, así mismo se realizaron 16 pruebas de bombeo para la determinación de los parámetros hidrogeológicos. Determina que los espesores de la zona acuífera oscilan entre 15 y 50 metros.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas propuesta por E. Raisz (1964), el área que comprende el acuífero Cocóspera se encuentra ubicada dentro de dos Provincias Fisiográficas: Sierra Madre Occidental y Sierras y Llanuras del Norte. En el caso de la Provincia Sierra Madre Occidental

se divide en dos subprovincias: Sierras y Valles del Norte y Sierras y Cañadas del Norte. La primera subprovincia está formada principalmente por sierras altas entre las cuales se localizan amplios valles paralelos con orientación preferente norte-sur, tal es el caso de las sierras La Juriquipa, La Sandía y El Pinito, mientras que la segunda subprovincia se caracteriza por sierras de laderas escarpadas, entre las cuales se localizan valles intermontanos constituidos principalmente por rocas volcánicas ácidas y grandes franjas basálticas orientadas norte-sur, dentro de las cuales se encuentran las sierras Pilares de Teras, El Tigre, Las Iglesias, El Baraino, La Rastrita y El Capulín.

Por otro lado, la Provincia Sierras y Llanuras del Norte sólo abarca una parte del área que está formada por valles aluviales entre los cuales se intercalan algunas sierras, tales como las mesas El Reparo, Los Paredones, Loma Las Lobera y el valle La Isla. En el acuífero se presentan tres geoformas diferentes:

Sierra Alta: Forma los extremos occidente y sur del acuífero, por su litología opera como una barrera hidráulica que separa al área de estudio de los acuíferos Cuitaca, Bacanuchi y Río Alisos. Comprende más del 50% de la superficie del acuífero Cocóspera.

Llanura aluvial: Se ubica en el centro del acuífero, formando el valle que se extiende hasta el norte del acuífero con una orientación nor-noreste. Esta forma fisiográfica se extiende a los acuíferos Río Santa Cruz y Cuitaca.

Sierra plegada: comprende una pequeña área del acuífero y se localiza en el límite norte del acuífero, constituyendo la Sierra El Chivato.

3.2. Clima

El análisis climatológico se realizó con la información de la estación Santa Ana. De acuerdo a la clasificación de INEGI (2003), en el acuífero se pueden diferenciar dos tipos de climas:

BS1kw(x'), (Semiseco, templado). Su temperatura media anual varía entre 12 y 18° C, con una temperatura del mes más frío entre 3 y 1°C. Presenta verano cálido con lluvias y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

BS1hw(x'), (Semiseco, semicálido). Aunque presenta invierno fresco, su temperatura media anual es mayor a 18°C, con una temperatura del mes más frío menor de 18° C. Registra lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2% del total anual.

La temperatura media anual en el acuífero es de 21° C y la precipitación promedio anual es de 550mm. Por correlación con acuíferos vecinos, la evaporación potencial del acuífero es de 1700mm.

3.3. Hidrografía

El acuífero Cocóspera se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 8 “Sonora Norte”, en la cuenca del Río Concepción- Arroyo Cocóspera. La cuenca del arroyo Cocóspera drena hacia el sur - suroeste, con pendiente general de moderada a fuerte, tiene sus orígenes en el parteaguas con el Río Santa Cruz que drena territorio de los Estados Unidos de América, en la sierra El Chivato, a una altitud de 1,800 m. Inicia con el nombre de arroyo El Carrizo, con curso general sur y confluye al arroyo Cocóspera para tomar rumbo suroeste hasta unirse al colector principal, el Río Magdalena, por su margen izquierda en las inmediaciones del poblado de Imuris, a una altitud de 840 m.

El arroyo Cocóspera recorre 15 kilómetros desde el noreste de la localidad del mismo nombre hasta el vaso de la presa El Comaquito. En su trayectoria mantiene una pendiente media de 0.004, con dirección general norte-sur, recibiendo como tributarios por la margen derecha los escurrimientos de los arroyos San Antonio, Los Chirriones, El Bolerío, El Alisal, El Apache y La Sota. Por la margen izquierda sobresalen los arroyos La Loba, El Amole, La Bellota, La Jaula, El Durazno, El Batamote, Los Janos y El Tasca.

3.4. Geomorfología

En conjunto se aprecian tres rasgos geomorfológicos definidos, cuyas expresiones son:

Macizo Montañoso: formado por las siguientes sierras ubicadas al oriente de la zona de estudio Pilares Teras (2200 msnm), Las Delicias (2200 msnm), El Tigre (2200 msnm), Las Iglesias (1900 msnm), El Baraino (1700 msnm), La Rastrita (1300 msnm), El Capulín (1900 msnm). Todas ellas presentan una orientación preferente norte- sur, con un decremento de altura hacia el sur. Al poniente se ubican las sierras El Pinito (1800 msnm) La Juriquipa (1700 msnm) y La Sandía (1200 msnm), con alturas menores a las sierras del flanco oriental, están constituidas principalmente por rocas ígneas extrusivas como tobas riolíticas, ignimbritas, tobas andesíticas.

Mesetas y Terrazas: Se localizan al norte y noroeste del acuífero, en forma plana y escalonada, formadas por depósitos conglomeráticos y arenas, tal es el caso de las mesetas El Repaso y Los Paredones (ubicadas al norte), La Planilla, Bonita, El Bajío de Los Quemados y La Lomas La Lobera (localizadas al noroeste).

Valle Intermontano: Su característica principal es la pendiente suave hacia el cauce del río Cocóspera, está orientado con una dirección preferente norte-sur, formado por depósitos fluviales y lacustres con rocas volcánicas, así como por material granular no consolidado, del tamaño de arenas y limos.

El drenaje que predomina en la zona es de tipo subparalelo y en algunas regiones el tipo rectangular, que es característico de zonas donde predominan rocas ígneas extrusivas.

4. GEOLOGÍA

La zona donde se ubica el acuífero Cocóspera presenta una gran variedad de unidades litológica ígneas, sedimentarias y metamórficas, que representan un registro estratigráfico del Mesozoico hasta el Reciente (figura 2).

4.1. Estratigrafía

A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área de la más antigua a la más reciente:

Jurásico inferior

Como consecuencia del desarrollo de un arco volcánico-plutónico (relacionado con la fase de subducción de la Placa Paleopacífica) se produce un gran paquete de rocas volcano-sedimentarias de composición predominantemente ácida, representadas en las sierras del Pinito, Guacomea y Jucaral ((Ji? R-Ar). Esta unidad fue cartografiada primeramente por Gilmont (1978), quien propuso el nombre de riolitaEl Pinito para referirse a una secuencia vulcanoclástica cuyos afloramientos típicos se observan en la Sierra El Pinito. Posteriormente Morales M.M. (1984), en uno de sus trabajos de carácter regional, tendientes a la búsqueda de yacimientos de hierro, la menciona y con base en su posición estratigráfica la ubica en el Cretácico Superior. Nourse (1995), menciona que esta secuencia corresponde a un ambiente de arco continental que existió durante el Jurásico Inferior y considera que corresponden a un protolito de rocas metamórficas de un núcleo complejo que existe en el área de Magdalena.

Esta secuencia se localiza formando parte de núcleos de estructuras anticlinales y se expone principalmente al norte del puerto La Bandera, en ambos lados del río Cocóspera, al noreste de la Sierra Azul, así como en las sierras Guacomea y Jucaral. La roca composicionalmente varía de riolita a riodacita, tiene textura porfídica-afanítica, con fenocristales de cuarzo subesferoidal y euhedral o feldespatos fragmentados de hasta 6mm de diámetro dispersos en una matriz félsica de color blanco a gris claro. El contenido de fenocristales varía de 10% a 50%. La unidad esta débilmente foliada pero generalmente no metamorfoseada y exhibe comúnmente bandeamiento de flujos primarios. Al sur de la Sierra de La Madera los fenocristales de cuarzo y la matriz están completamente recrystalizados. Esta roca "cuarzo porfídica" presenta "ojos" de cuarzo residual rodeados por una textura sacarosa, dentro de una matriz félsica.

La secuencia está interdigitada con cuarzo arenitas de grano fino con 100 m de espesor y presenta afloramientos de formas prominentes. La estratificación está definida por delgadas bandas de minerales oscuros (Magnetita y zircón) y exhiben comúnmente estratificación cruzada en escalas de

decímetros a metros (Gilmont, 1978). Los contactos con la riolita porfídica son angulares y la estratificación en las arenitas de cuarzo es concordante con las bandas de flujos en la riolita. La parte más baja de las capas de areniscas están más enriquecidas en granos de feldespatos derivados de la riolita porfídica.

La interestratificación riolita-cuarzoarenita está cubierta por un conglomerado polimíctico formado por cantos de riolita porfídica y cuarzoarenita, litológicamente idénticas a las unidades estratigráficamente inferiores. También en el conglomerado se observan clastos bien redondeados de cuarzo morado derivado probablemente de alguna secuencia de origen paleozoico. Estos clastos del conglomerado están englobados en una matriz arenosa lítica pobremente consolidada. Dentro de la porción metamorfozada de la sección norte del puerto El Mezquital y en la Sierra Azul la matriz está parcialmente recrystalizada, y los clastos son significativamente alargados.

Nourse (1995), con base en un análisis geológico-estructural propone que el protolito de las secuencias metamórficas gnéissicas, corresponde a la riolita El Pinito que aflora en la zona del núcleo complejo, ubicándola en el Jurásico Inferior y las correlaciona con aquellas estudiadas por Anderson *et. al.*, (1988); Kitz y Anderson, (1988); Calmuset. *al.* (1992), al sur de Magdalena y al oeste de la misma población por Corona, (1979) y Jacques-Ayala *et. al.*, (1990).

Cretácico Inferior

Las rocas de esta edad están ampliamente distribuidas en el acuífero, pero solo en el terreno Norteamérica. El cretácico inicia con el depósito de un conglomerado basal conocido como Conglomerado Glance que es la base del Grupo Bisbee, constituido por rocas sedimentarias.

Jurásico Superior-Cretácico Inferior (JsKiCgP-Ar)

Ransome (1904) dio a esta unidad categoría de formación ubicándola como la base del Grupo Bisbee. En este trabajo se ha considerado a la Formación Conglomerado Glance como una unidad independiente, debido a sus características cartográficas de gran extensión y potencia, se restringe al terreno Norteamérica, principalmente en la porción sur - suroeste, donde forma parte de las sierras Azul y El Pinito y del cerro El Pelón.

Son rocas conglomeráticas polimícticas arenosas de aproximadamente doscientos metros de espesor. El conglomerado presenta fragmentos de ortocuarcita, granito y caliza con tamaños de 2 a 60cm, en una matriz principalmente arenosa. Su contacto superior está definido por el paso transicional a una serie de lutitas y areniscas calcáreas de la Formación Morita del Grupo Bisbee, cubierto discordantemente por rocas volcánicas terciarias en algunas localidades.

De acuerdo a sus relaciones estratigráficas se le determinó una edad que varía del Jurásico Superior (Tithoniano) al Cretácico Inferior (Neocomiano) y es correlacionable con rocas similares en edad y litología que afloran en el sur de Arizona y noreste de Sonora en el área de Cabullona.

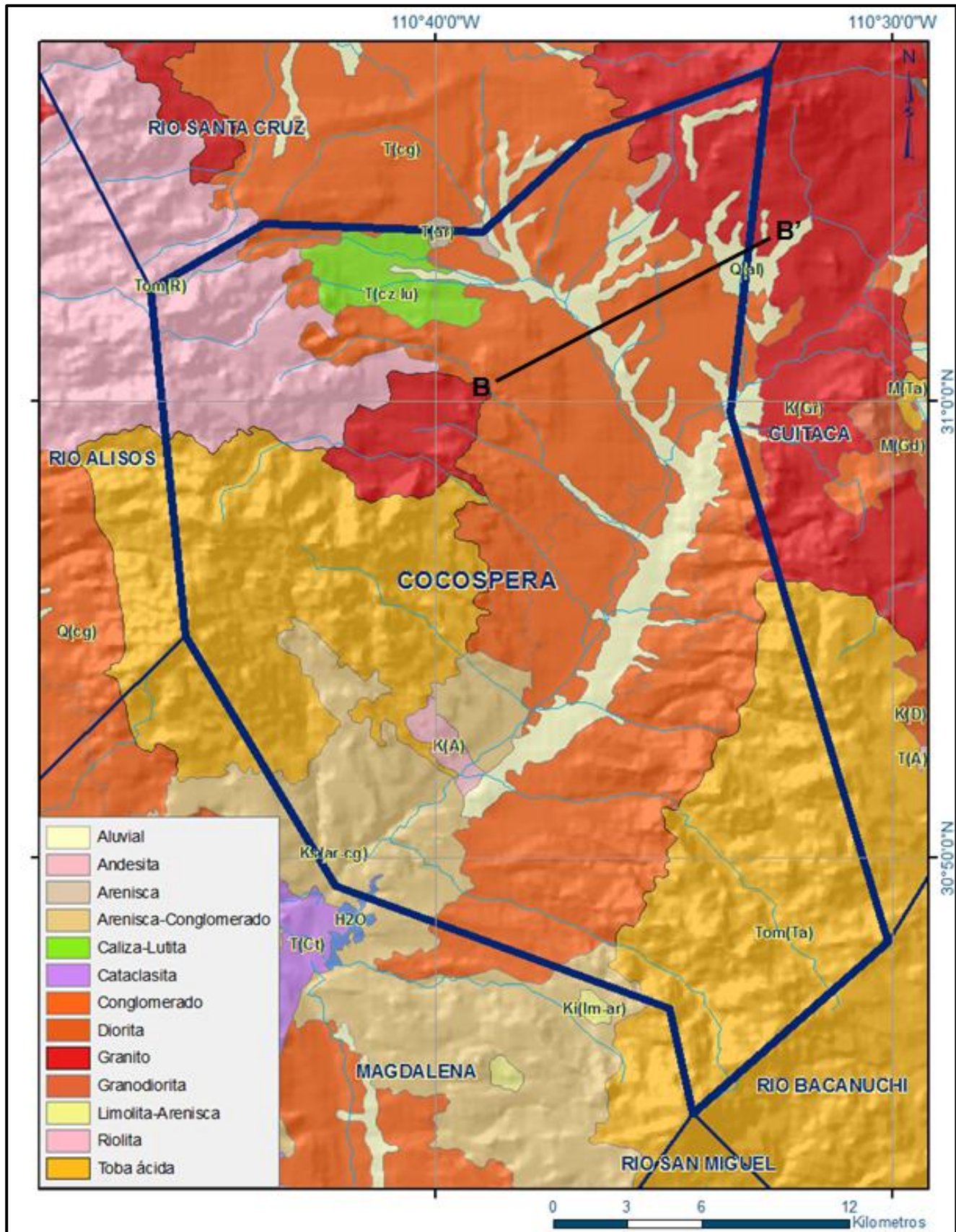


Figura 2. Geología del acuífero

Cretácico Superior-Terciario Inferior (Ks ti Gr-qmz)(Te Gd. D)(To Gr) (ToPA)(toPR)

Lindgren en 1915 fue el primero en reconocer la transgresión hacia el oriente de los plutones del Cretácico al Paleoceno dentro del oeste de los Estados Unidos. Posteriormente (Anderson y Silver, 1974) y (Coney y Reynolds, 1977) extendieron este concepto a Sonora; (Henry, 1975) a Sinaloa; (Clark y otros, 1978, 1979, 1982), (Damon, 1978), (Damon y otros, 1981) a través del norte de México; (Coney y Reynolds, 1977) fueron los primeros en reconocer que la transgresión del Arco Volcánico se extendió 1000km tierra adentro (debido a la disminución del ángulo de subducción de la placa oceánica). El trabajo de Damon (1983), definió al Batolito Laramide de Sonora como todos los plutones de Sonora asociados con la transgresión del arco magmático de la costa hacia el interior del Cretácico Tardío al Eoceno Tardío 90 a 40 Ma. El batolito incluye todas las intrusiones calcoalcalinas y granitos de 2 micas (peraluminosos). Aunque estos últimos son anatexíticos y post arco volcánico. Estas rocas representan la continuación hacia el sur del cinturón batolítico del oeste norteamericano.

La forma y distribución de estos afloramientos, está controlada por la erosión y por los eventos tectónicos posteriores a su emplazamiento, principalmente la tectónica de extensión del Paleógeno y Neógeno. El nivel de erosión es más profundo hacia la costa y disminuye hacia el oriente, donde estos cuerpos se encuentran cubiertos por las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental. En el área de estudio los principales afloramientos se observan al oriente del rancho El Amole.

El batolito no presenta grandes variaciones en composición, petrográficamente varía de granodiorita a cuarzomonzonita y granito de color blanco, grisáceo, de textura fanerítica, generalmente de grano medio, constituido esencialmente por cristales de plagioclasa sódica, feldespatos potásicos, cuarzo y biotita con alteraciones locales de cloritización y sericitización principalmente. Las rocas que constituyen el Batolito Laramide están afectadas por intrusivos terciarios y cuerpos subvolcánicos de naturaleza ácida a intermedia. A su vez, intrusión y afecta a la mayor parte de las unidades litológicas preexistentes.

En general, Damon y otros (1983) han determinado que las edades radiométricas para las rocas que constituyen el Batolito Laramide varían de 40 a 90 Ma, sin embargo separan los cuerpos intrusivos del Eoceno de composición granodiorítica-diorítica y los granitos oligocénicos con base en la relación que guardan con el desarrollo de estructuras como el caso de los núcleos Complejos Ígneo-Metamórficos (Core Complex).

Cenozoico

Las rocas del Paleógeno y Neógeno consisten de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias. El conjunto plutónico-volcánico es responsable de las mineralizaciones de cobre diseminado, las rocas volcánicas varían en composición de andesíticas a riolíticas (PoA) (PoR-Ig) (PoA-Ig) y están generalmente ligadas a los cuerpos intrusivos que las afectan y mineralizan como en las regiones de Cananea y El Alacrán. Se localizan principalmente en la porción este - sureste del área en amplios afloramientos, cubriendo discordantemente a las rocas preterciarias. Durante el Neógeno toda la

región estuvo afectada por una serie de fallamientos normales relacionados con la tectónica distensiva que dio origen a la provincia de sierras y valles que cortaron a todas las estructuras y unidades anteriores, dando como resultado un sistema de fallas noroeste-sureste y la consecuente formación de depresiones que fueron rellenadas por sedimentos detríticos continentales de la Formación Báucarit (PomCgp-B), unidad que está ampliamente distribuida en el área.

El conjunto de rocas cuaternarias se encuentra distribuido en gran parte del área y consiste de conglomerados polimícticos (Qp1CoP) que son remanentes de depósitos de pie de monte, de gravas y arenas. Estos depósitos están compuestos de bloques, cantos y guijarros que presentan gran variedad litológica en grados de redondez y tamaño muy diversos, distribuidos caóticamente en una matriz arcillosa, estos depósitos se localizan principalmente en las depresiones intermontanas. Los sedimentos aluviales, cubren un pequeño porcentaje del área (Qal), son depósitos de acarreo y de relleno no consolidados, que se presentan en los cauces de arroyos y abanicos aluviales. Consisten de arcillas, limos, arenas y gravas de grano fino a grueso que rellenan las zonas bajas y planas.

Paleógeno-Oligoceno (PoA) (ToA-Ig)

Las andesitas son rocas de color gris verde o café oscuro, generalmente de textura porfírica, con fenocristales de plagioclasas intermedias oligoclasa-andesina y máficos como hornblenda y biotita, la mayoría de las ocasiones con remplazo total o parcial de los minerales por minerales arcillosos, calcita, clorita, cuarzo, óxidos de fierro y apatita; los principales afloramientos de andesitas e ignimbritas se encuentran coronando las sierras de la porción oriental – suroriental del área. Los espesores de estas rocas no se conocen ya que su base no se encuentra expuesta.

Neógeno-Mioceno (NmCgP-B)

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, existen además algunos flujos de basaltos y otras rocas volcánicas interestratificadas con los sedimentos.

Esta formación está constituida principalmente por conglomerados de color regularmente pardo claro que cambia por meteorización a pardo oscuro, generalmente está bien estratificado, la composición de los clastos es muy heterogénea, lo que indica la variación de la fuente de aporte. La composición de los clastos es de ignimbritas, riolitas, andesitas, granitos, arcosas, cuarcitas y menos común de 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, minoritariamente y principalmente hacia la base de esta formación se tienen en algunas localidades estratos delgados de lutitas y calizas.

En cuanto a los espesores, debido a la gran erosión y fallamiento, no se conoce la base de esta formación en la mayor parte de sus afloramientos y por lo que se desconoce su espesor, que debe ser del orden de 100 m.

La Formación Báucarit prácticamente se encuentra cubriendo a todas las unidades de la columna del Cretácico Superior, pero en la mayor parte de los afloramientos no se conoce su límite inferior y regularmente estos contactos son por falla. Se encuentra cubierta indistintamente por coladas volcánicas principalmente basaltos del Cuaternario y por depósitos de talud y terrazas aluviales recientes. Han sido fechados en los alrededores de Magdalena basaltos interestratificados con los conglomerados en la base de esta formación, arrojando una edad del Mioceno, que se correlaciona con el Conglomerado Gila del sur de Arizona. Pertenece a un ambiente aluvial-volcánico-continental.

Cuaternario Pleistoceno (QPICgp)

Son remanentes de depósitos de sedimentos de gravas, conglomerados y arenas y compuestos de bloques, cantos, guijarros y clastos de gran variedad litológica, distribuidos caóticamente en una matriz arcillosa. Se localizan principalmente en llanuras intermontanas, formando lomeríos con pendientes suaves, así como terrazas y pequeños taludes. Sus afloramientos más importantes se localizan en la porción occidental del acuífero.

Estos depósitos por lo general se encuentran cubriendo a las rocas de la Formación Báucarit y en algunas localidades a otras rocas preterciarias y son sobreyacidos por todos los depósitos aluviales del cuaternario. Se depositaron en ambientes continentales producto de la erosión de los sedimentos del Paleógeno-Neógeno y de las rocas preexistentes.

Cuaternario (Qhoal)

Son depósitos aluviales que cubren gran parte de las superficies ocupadas por los cauces de ríos y arroyos. Se originan por el acarreo y relleno de material no consolidado en los cauces de arroyos y abanicos aluviales; consisten de arcillas, limos, arenas y gravas de grano fino a grueso que rellenan las zonas bajas y planas.

4.2. Geología estructural

Desde el punto de vista estructural, el valle del Río Cocóspera representa un pequeño Graben orientado NNE – SSW originado por el proceso distensivo que originó la provincia Basin and Range. Las fallas son comunes, predominando el fallamiento normal en las formaciones del Jurásico al Reciente, que en esencia controlan el patrón de drenaje presente. El comportamiento estructural de la zona es producto de diversos eventos tectónicos como la Orogenia Laramide (Cretácico Tardío - Paleógeno), posteriormente ocurrió un evento distensivo durante el Paleógeno Superior-Neógeno, responsable de la formación de la provincia "Basin and Range", característica del noroeste de México

y del suroeste de Estados Unidos. Este episodio se manifiesta por la aparición de juegos de fallas normales y fracturas de distensión en varias direcciones.

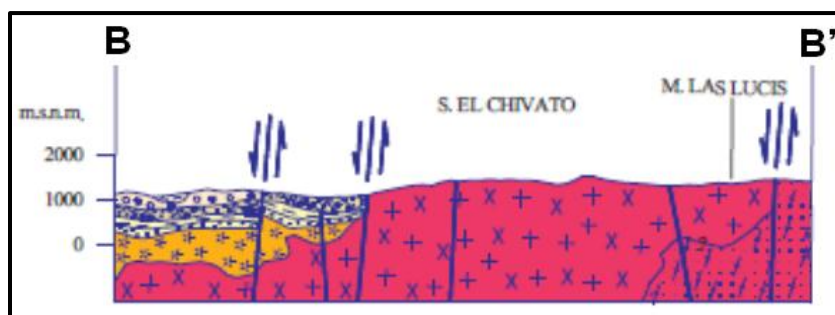
Las características estructurales del área consisten en sierras altas alargadas de rumbo preferencial noroeste-sureste. El valle está delimitado por un sistema de fallas normales con dos direcciones preferentes: noroeste – sureste y noreste – suroeste; ambos sistemas son producto de la última etapa tectónica distensiva, iniciada a partir del Paleógeno Superior, la cual dislocó y fragmentó las unidades geológicas presentes, que desarrollaron el complicando panorama estructural de la zona. En la fosa tectónica que originó el sistema de fallas se depositó el material clástico que conforma el acuífero. La zona presenta una gran cantidad de fracturas orientadas en sentido noroeste-sureste y noreste-suroeste, que afectan a las rocas volcánicas de las sierras circundantes que constituyen las zonas de recarga al acuífero.

Otras manifestaciones de eventos tectónicos que afectaron al noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, se manifiestan en la zona a través de discordancias angulares entre las secuencias paleozoicas y mesozoicas, asimismo existe plegamiento cerrado y fallamiento inverso debido a la Orogenia Mesocretácica, mientras la Orogenia Laramide está representada por un sistema de plegamiento y una fuerte presencia de fallas inversas.

4.3. Geología del subsuelo

Como parte del estudio realizado en el 2006, se ejecutaron 11 sondeos electromagnéticos (TEM's) en la parte central del acuífero donde se localiza la zona de mayor extracción de aguas subterráneas, es posible definir la presencia de un acuífero constituido en su porción superior por depósitos aluvio-fluviales constituidos por gravas, boleos y arenas de alta porosidad y permeabilidad cuyo espesor varía de 10 a 60 m.

La porción inferior está alojada en un conglomerado semiconsolidado ha consolidado, areniscas y rocas volcánicas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento (figura 3). Las frontera al flujo subterráneo y el basamento están representados por rocas riolíticas y graníticas compactas, así como los mismos conglomerados y areniscas cuando desaparece el fracturamiento.



Fuente: Carta Geológico-Minera "Nogales H12-2" Esc. 1:250,000 (SGM, 2000)

Figura 3. Sección Geológica Esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, las evidencias geológicas, y geofísicas, es posible establecer la presencia de un acuífero **tipo libre a semiconfinado**, heterogéneo y anisótropo, constituido por materiales granulares porosos, areniscas, rocas volcánicas fracturadas y productos piroclásticos. El medio granular está constituido por depósitos no consolidados y semiconsolidados de granulometría variada (gravas, arenas, limos y arcillas) que se depositaron en la planicie de inundación del cauce del Arroyo Cocóspera, de espesor limitado que varía entre 10 a m. El medio fracturado está conformado por areniscas y rocas volcánicas.

La fuente principal de recarga al acuífero es la infiltración de la lluvia sobre el valle, de los escurrimientos generados en las zonas serranas que delimitan el acuífero, así como el agua que se infiltra en las zonas topográficamente altas y que alimenta al acuífero en forma de flujos subterráneos.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2009 se realizaron 15 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y de recuperación, en aprovechamientos ubicados en las localidades de Vicente Guerrero y Milpillás. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos, se establece que los valores de transmisividad varían de 7.85×10^{-4} a $5.22 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (tabla 2).

Tabla 2. Resultados de las pruebas de bombeo en la zona de Cocóspera y Cuitaca

Número de Prueba	Pozo	Tipo de Prueba	Transmisividad m^2/s	Conductividad Hidráulica m/s	Espesor del Acuífero (m)
1	Cocóspera	Abatimiento	7.85×10^{-4}	7.85×10^{-5}	10
2	Cocóspera	Recuperación	1×10^{-3}	1×10^{-4}	10
3	Vicente Guerrero	Abatimiento	3.92×10^{-5}	6.54×10^{-7}	60
4	Vicente Guerrero	Recuperación	7.4×10^{-5}	1.23×10^{-6}	60
5	Aribabi	Abatimiento	4.09×10^{-4}	2.82×10^{-4}	20
6	Aribabi	Recuperación	6.69×10^{-4}	4.61×10^{-4}	20
7	La Bellota (El Represo)	Abatimiento	3.76×10^{-3}	1.21×10^{-3}	3.09
8	La Bellota (El represo)	Recuperación	4.39×10^{-3}	1.42×10^{-3}	3.09
9	Amoles II	Abatimiento	1.35×10^{-3}	5.81×10^{-5}	23.25
10	Amoles II	Recuperación	1.45×10^{-3}	6.24×10^{-5}	23.25
11	Amoles III	Abatimiento	5.37×10^{-3}	2.21×10^{-4}	24.26
12	Amoles III	Recuperación	5.22×10^{-2}	2.15×10^{-3}	24.26
13	San Rafael	Recuperación	3.69×10^{-3}	2.93×10^{-4}	12.59

Los valores más bajos se asocian a sedimentos de granulometría fina, en tanto que los valores más altos, corresponden a sedimentos de mayor tamaño asociados al cauce del río. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

5.3. Piezometría

La definición de áreas de recarga y descarga, y consecuentemente trayectorias de flujo de agua subterránea, puede ser lograda mediante diversos indicadores, uno de ellos es la medición de los niveles piezométricos por medio de los cuales no solo es posible identificar estas zonas sino también componentes verticales de flujo subterráneo, ascendentes y descendentes. Únicamente se cuenta con información piezométrica correspondiente al año 2006.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

En la figura 4 se muestra la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2006 y en ella se puede observar que los valores varían de 4 a 25 m, registrándose los valores más altos en los pozos ubicados al norte de El Amole, localizados cerca del límite oriental del acuífero.

Los valores mínimos de profundidad, de 4 a 7 m, se encuentran entre El Vadito y El Aribabi, ubicados en el centro y suroeste del acuífero, siguiendo el cauce del Arroyo Cocóspera.

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para 2006 (figura 5), presenta elevaciones que varían de 988 hasta 1170 msnm en El Aribabi y La Paz, respectivamente. Los valores máximos se presentan en la zona norte del acuífero, al sur de la Sierra San Antonio. Los valores mínimos se registran en los alrededores de El Aribabi, cerca del límite suroeste del acuífero.

De esta manera, se puede identificar que la dirección de flujo subterráneo muestra una trayectoria preferencial noroeste-sureste (hasta la confluencia de los arroyos Cuita y Cocóspera) y noreste-suroeste, paralela a la dirección de escurrimiento del arroyo Cocóspera; con alimentaciones laterales provenientes de las sierras El Pinito y el cerro Guipuzcoana que delimitan el valle.

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita su configuración. Las escasas mediciones se encuentran dispersa en tiempo y espacio y

no cubren la superficie total del acuífero. Aunado a ello, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados 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.

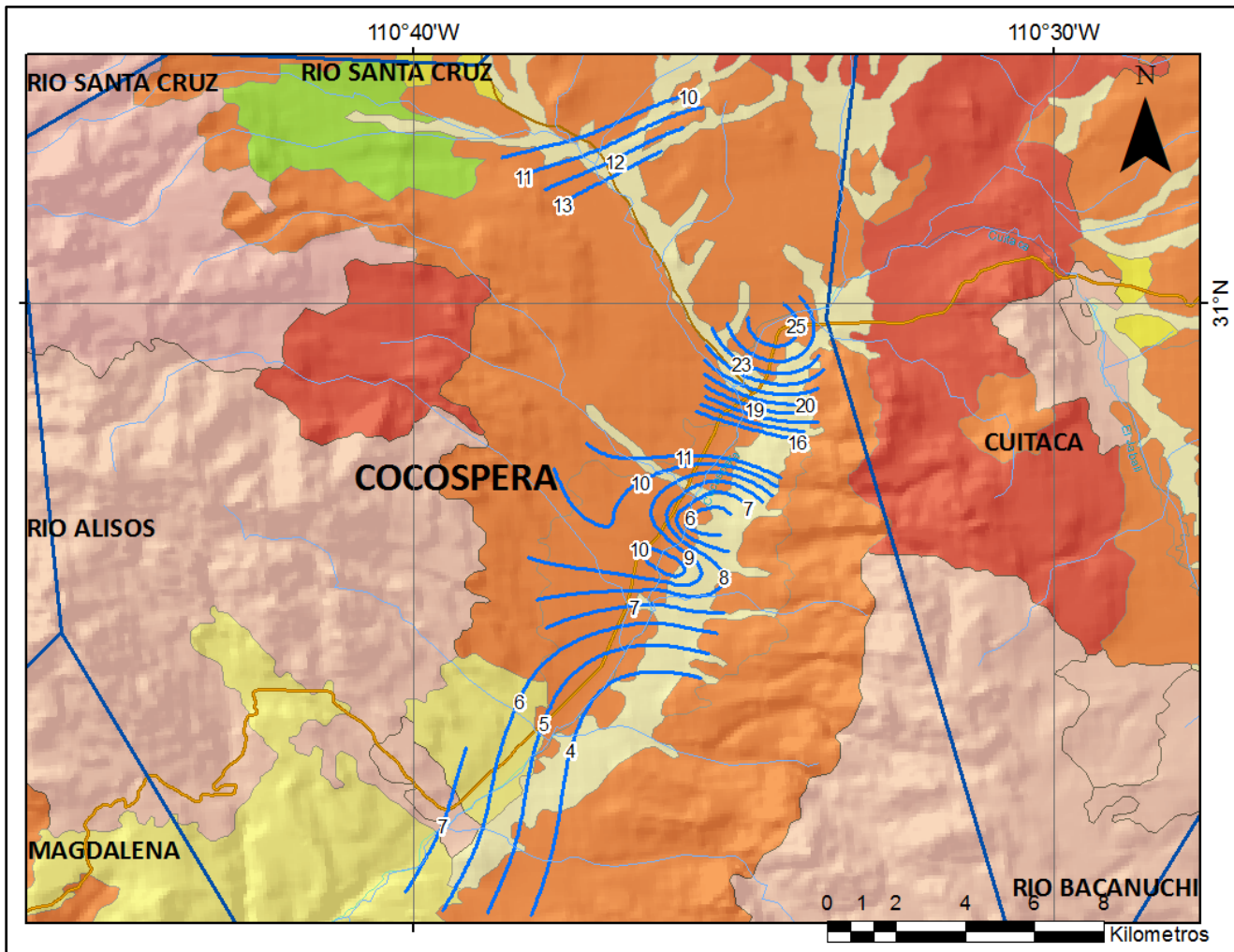


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2006)

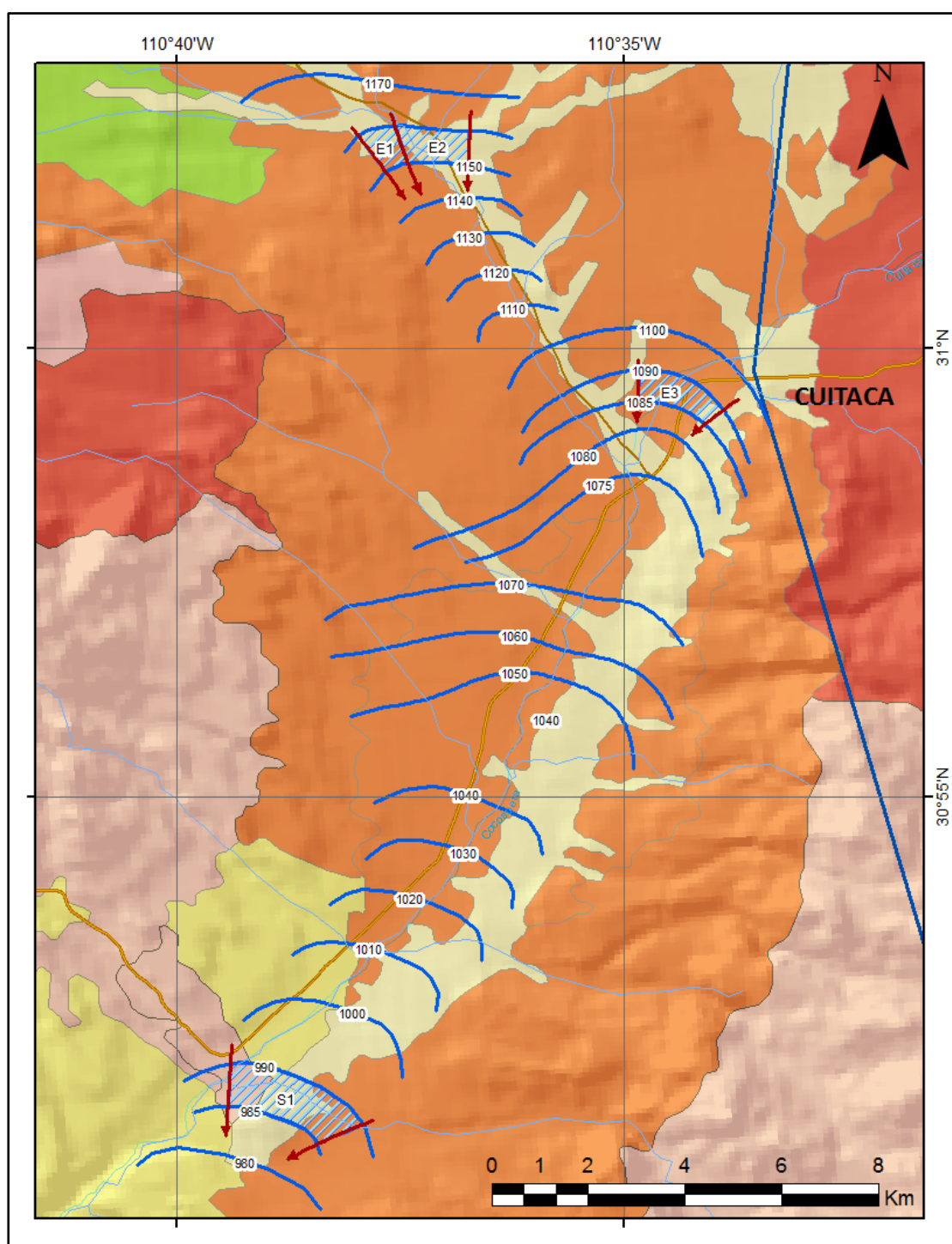


Figura 5. Elevación del nivel estático en m (2006)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2006, se tomaron muestras en 15 aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, dureza total, nitratos, flúor, metales pesados y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se observa que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) oscilan entre 195 y 420 mg/l, en los alrededores de Vicente Guerrero y al sur de Los Amoles, respectivamente. Los valores de Conductividad Eléctrica fluctúan en un rango de 313 a 695 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los demás parámetros físicos y químicos se encuentran dentro de los límites permisibles por la normatividad mexicana NOM-127-SSA1-1994. De acuerdo con la clasificación de Piper, la familia de agua predominante es la bicarbonatada cálcico-sódica, que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas volcánicas principalmente.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo al censo realizado en el 2006, se registró la existencia de un total de 11 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 7 corresponden a norias y 4 a pozos, todos activos. Con relación al uso de los aprovechamientos 7 corresponden a uso público urbano, 2 a uso pecuario, 1 para uso agrícola y 1 para uso doméstico.

El volumen de extracción conjunto se estimó en **2.7 hm^3 anuales**, de los cuales 1.5 hm^3 (55.6%) se destinan al uso público urbano, 0.5 hm^3 (18.5 %) para uso agrícola y los 0.7 hm^3 restantes (25.9 %) para uso doméstico-abrevadero.

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 masa se expresa como:

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

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

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

El balance de agua subterránea se planteó para el año 2006, en una superficie de 70 km^2 , que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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:

R_v= Recarga vertical por lluvia;

E_h= Entradas por flujo horizontal;

B= Bombeo;

S_h= Salidas por flujo horizontal;

ETR= Evapotranspiración real en niveles someros;

ΔV(S)= Cambio en el volumen almacenado;

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos (R_v) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que para fines del balance de aguas subterráneas no existe recarga inducida. Por lo que **R_i = 0**.

7.1.1. Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) tiende a ser nulo y a que se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo con base en la Ley de Darcy, el valor de la recarga vertical fue despejado de la ecuación de balance (1).

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

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del 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 tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2006 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

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

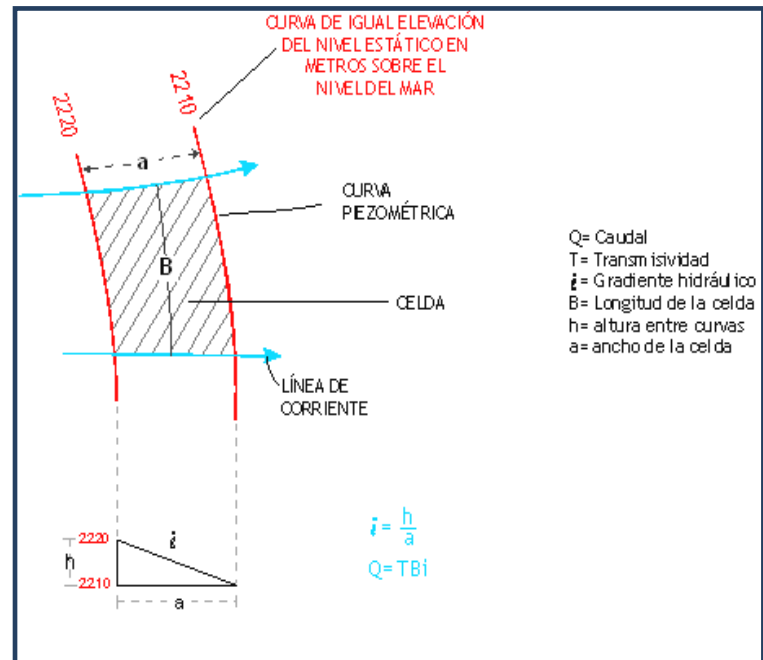
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas corresponden con el promedio de los valores obtenidos de las pruebas de bombeo realizadas en el año 2006, adaptados al espesor saturado del acuífero en las celdas de flujo definidas.

De acuerdo con el plano de elevación del nivel estático (figura 5), se identificaron celdas de entrada en las porciones norte y noreste del acuífero. El cálculo del flujo en las celdas de entradas se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de entradas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2 - h_1$	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
			(m)				
E1	530	880	10	0.0114	0.0073	0.0440	1.4
E2	1200	700	10	0.0143	0.0073	0.1251	4.0
E3	1570	630	10	0.0159	0.0072	0.1794	5.7
Total entradas							11.0

El volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **11.0 hm³ anuales**.

7.2. Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para el acuífero Cocóspera las descargas están representadas por el bombeo (B), evapotranspiración (ETR) y salidas horizontales (Sh).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen total anual de extracción de agua subterránea asciende a **2.7 hm³/año**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El volumen de las salidas subterráneas se calculó de la misma manera que las entradas subterráneas, tomando en cuenta la elevación del nivel estático que se muestra en la figura 5 y a través de la Ley de Darcy, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Estimación de salidas horizontales

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	2290	920	10	0.0109	0.0076	0.1892	6.0
					Total salidas		6.0

El volumen total de salidas por flujo subterráneo asciende a **6.0 hm³ anuales**.

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

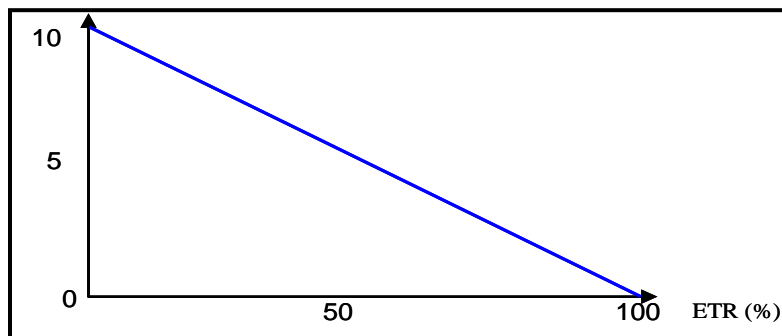
Existe una pequeña zona dentro del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m de profundidad, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas. Se aplicó la fórmula de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 528.7 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 21° C y precipitación de 550 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) =	21		
P(mm) =	550	P ² =	302500
L =	1288.05	L ² =	1659072.8
ETR (mm)	528.7		

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, 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 consideramos que en una superficie de 30 km² a lo largo del Río Cocóspera (entre Rancho San Rafael y el límite con el acuífero Magdalena) se registran niveles freáticos someros, con cobertura vegetal cuyas raíces son suficientemente largas y susceptibles de evapotranspirar, en la que la profundidad promedio al nivel del agua subterránea es de 6 m y una lámina de evapotranspiración real obtenida es de 528.7 mm, de acuerdo con la gráfica anterior: ETR = 30 km² (0.5287 m) (0.4) = 6.3. Por lo que **ETR = 6.3 hm³ anuales.**

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de

tiempo. Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas condiciones, 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 para fines del balance de aguas subterráneas $\Delta VS = 0$.

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 recarga vertical (Rv), que se calculará mediante la expresión (2):

$$\begin{aligned} Rv &= B + Sh + ETR - \Delta V(S) - Eh & (2) \\ Rv &= 2.7 + 6.0 + 6.3 - 0.0 - 11.0 \\ Rv &= 4.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Rt &= Rv + Eh \\ Rt &= 4.0 + 11.0 \\ Rt &= 15.0 \text{ hm}^3/\text{anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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:

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

Donde:

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

Rt= 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 (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso particular, su valor es de **15.0 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes.

Para este caso particular, se considera un volumen de descarga natural comprometida de **3.2 hm³ anuales**, que corresponden al 50 % de la evapotranspiración que deben preservarse para proteger el ecosistema ribereño del cauce del río Cocóspera. No se considera comprometida la salida subterránea porque la zona en donde fue posible evaluarlas se localiza aproximadamente a 7 km del límite con el acuífero Magdalena y existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento, con derechos vigentes, en el acuífero Cocóspera.

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 2'702,936 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.

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

$$\text{DAS} = 15.0 - 3.2 - 2.702936$$

$$\text{DAS} = 9.097064 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El resultado indica que existe actualmente un volumen de **9'097,064 m³ anuales** disponibles 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 de la 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, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFÍA

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

Comisión Nacional del Agua, 2006. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero 2614 Cocóspera, estado de Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora.