

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Río San Miguel (2625),  
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							
2625	RÍO SAN MIGUEL	68.7	2.2	48.042213	56.9	18.457787	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 RÍO SAN MIGUEL (2625), ESTADO DE  
SONORA***

***México, D.F., Octubre de 2013***

## Contenido

1. GENERALIDADES .....	1
Antecedentes .....	1
1.1. Localización .....	1
1.2. Situación administrativa del acuífero .....	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....	4
3. FISIOGRAFÍA .....	5
3.1. Provincias fisiográficas .....	5
3.2. Clima .....	6
3.3. Hidrografía .....	6
3.4. Geomorfología .....	7
4. GEOLOGÍA .....	7
4.1. Estratigrafía .....	7
4.2. Geología estructural .....	12
4.3. Geología del subsuelo .....	12
5. HIDROGEOLOGÍA .....	13
5.1. Tipo de acuífero .....	13
5.2. Parámetros hidráulicos .....	13
5.3. Piezometría .....	14
5.4. Comportamiento hidráulico .....	14
5.4.1. Profundidad al nivel estático .....	14
5.4.2. Elevación del nivel estático .....	14
5.4.3. Evolución del nivel estático .....	16
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	17
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....	18
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	18
7.1. Entradas .....	18
7.1.1. Recarga vertical (Rv) .....	19
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	19
7.1.3. Retornos de riego (Rr) .....	20
7.2. Salidas .....	21
7.2.1. Bombeo (B) .....	21
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	21
7.2.3. Evapotranspiración (ETR) .....	23
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	24
8. DISPONIBILIDAD .....	25
8.1. Recarga 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) .....	26
9. BIBLIOGRAFIA .....	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 (REPDa).

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 San Miguel, definido con la clave 2625 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción centro-norte del Estado de Sonora, entre los paralelos 29°16' a 30°44' de latitud norte y los meridianos 110° 21' a 110°54' de longitud oeste, cubre una superficie de 4,057 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con los acuíferos Magdalena y Río Bacanuchi, al este con el acuífero Río Sonora, al sur con Mesa del Seri-La Victoria, al oeste con La Tinaja y Río Zanjón, todos ellos pertenecientes al Estado de Sonora (figura 1).

Geopolíticamente, comprende parcialmente los municipios San Miguel de Horcasitas, Rayón, Cucurpe, Arizpe, Ímuris, Opodepe, Ures, Hermosillo y Banámichi.

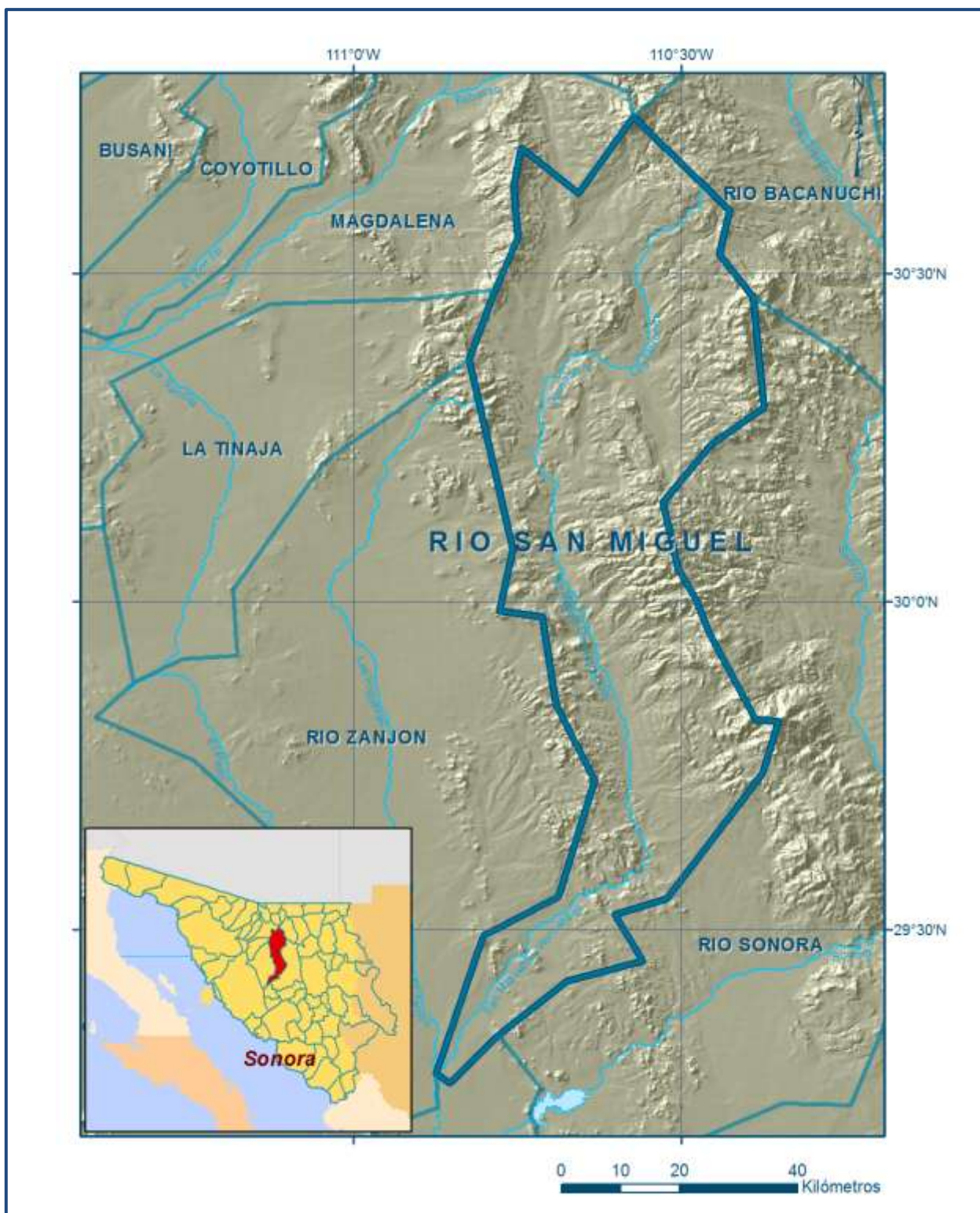


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUÍFERO 2625 RÍO SAN MIGUEL						
VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	110	25	35	30	35	46.9
2	110	26	31.4	30	31	47.7
3	110	23	26	30	27	52.2
4	110	22	25	30	17	43.4
5	110	27	17	30	14	19.8
6	110	31	42.3	30	9	6.6
7	110	30	19.3	30	3	1.3
8	110	28	40.7	30	0	13.1
9	110	27	31.1	29	57	15.2
10	110	23	10.8	29	49	12.6
11	110	21	5.4	29	48	59.7
12	110	22	35.1	29	44	14
13	110	31	18.7	29	32	47.4
14	110	36	7.7	29	31	22.1
15	110	33	33.5	29	27	5
16	110	40	31.4	29	25	13.3
17	110	46	42.8	29	20	16.2
18	110	51	11.6	29	15	53.4
19	110	52	26.8	29	16	51
20	110	48	7.1	29	29	26.3
21	110	41	16.5	29	32	57.5
22	110	37	56.3	29	43	38.5
23	110	41	27.8	29	50	35.9
24	110	42	42.5	29	58	35.4
25	110	46	38.2	29	59	6.1
26	110	45	27.8	30	4	44
27	110	49	28.3	30	22	6.9
28	110	47	2.3	30	28	33.5
29	110	44	57.2	30	33	14.3
30	110	45	23.3	30	38	2.7
31	110	44	37.8	30	41	28.8
32	110	39	26.5	30	37	20.8
33	110	34	22.4	30	44	23.3
1	110	25	35	30	35	46.9

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río San Miguel pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. Su territorio completo se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. La mayor superficie está regida por el “*Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Son*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de junio de 1967. En una pequeña zona de su porción norte

rige el “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 dichas zonas”, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978. Ambas vedas se clasifican como tipo II en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2013, el municipio de Hermosillo se clasifica como zona de disponibilidad 4; San Miguel de Horcasitas como zona de disponibilidad 5; Ures, Banámichi, Arizpe e Ímuris como zona de disponibilidad 6; Rayón, Opodepe y Cucurpe como zona de disponibilidad 7.

El usuario principal del agua subterránea es el agrícola. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca Alto Noroeste, instalado en 19 de marzo de 1999. En la superficie de su territorio no se localiza ningún distrito o unidad de riego. Tiene constituido su Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS), el cual fue instalado el 30 de junio de 2001.

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En la zona de estudio que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, los más importantes se mencionan a continuación.

**ESTUDIO DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DE LOS VALLES DE LOS RÍOS SAN MIGUEL, ZANJÓN, BACOACHI Y MÁTAPE, EN EL ESTADO DE SONORA, elaborado por Ariel Consultores, S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1971.** El objetivo de este estudio fue conocer el régimen de escurrimiento de las corrientes superficiales, con apoyo de la información disponible a la fecha, así como instalar estaciones hidrométricas en lugares adecuados para complementar la información y con ello tener un mejor conocimiento del régimen de escurrimiento para la evaluación, aprovechamiento y optimización del recurso en beneficio del uso agrícola. Recomienda ampliar la red de estaciones de aforo y mejorar la precisión en la toma de datos mediante nivel fijo en los brocales de los pozos nivelados con altímetro.

**DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO SAN MIGUEL, Estado de Sonora. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, 2003.** Presenta información general del acuífero; mediante el planteamiento de balances de aguas subterráneas en tres áreas del acuífero (Cerro Pelón-El Saucito, Valle de San Miguel de Horcasitas y Valle Rayón-Opodepe) determina que el acuífero no tiene disponibilidad, por el contrario su déficit fue de 1.6 hm<sup>3</sup> anuales, valor que se publicó en el Diario Oficial de la Federación en el año 2003.

**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 del Estado de Sonora en 2005.**



Incluye actividades de campo como censo de aprovechamientos, piezometría y nivelación de brocales. Para el caso del acuífero Río San Miguel, lo divide en dos zonas: Horcasitas y Rayón-Opodepe. En la primera se detectaron zonas con abatimiento promedio de 0.2 m/año. Se recomienda la prospección geohidrológica para conocer el potencial de las rocas fracturadas y en la zona cercana a Hermosillo intensificar el monitoreo hidrodinámico e hidrogeoquímico.

**ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO DEL ESTADO DE SONORA, 2005.** Elaborado por la Universidad de Sonora para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo del estudio fue establecer una red de monitoreo piezométrico para cada uno de los acuíferos que son jurisdicción administrativa del Organismo de Cuenca Noroeste, (todo el estado de Sonora y parte del estado de Chihuahua). Como parte de este estudio se elaboraron mapas temáticos de clima, precipitación, temperatura, geología, geomorfología, vegetación y uso de suelo así como de configuración del nivel estático (profundidad, elevación y evolución) mostrando las direcciones de flujo subterráneo. Es un estudio de consulta general de los acuíferos.

**ESTUDIO DE PIEZOMETRÍA Y EVOLUCIÓN DE NIVELES, EN LA CUENCA MEDIA Y ALTA DEL RÍO SONORA, MONITOREO.** Elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora en 2006. Entre sus conclusiones más importantes destaca que en la mayor parte de la superficie del acuífero se registró una recuperación de los niveles del agua subterránea; recomienda realizar un censo exhaustivo en los acuíferos

**ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA EL PROYECTO MINERO “EL CRESTÓN”, MUNICIPIO DE RAYÓN, ESTADO DE SONORA. PRIMERA ETAPA: FACTIBILIDAD HIDROGEOLÓGICA,** elaborado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS) para Exploraciones Global, S.A de C.V en 2008. El objetivo general de este estudio fue definir las condiciones geohidrológicas del acuífero, calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, pruebas de bombeo, ejecución de sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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**

El territorio del acuífero queda comprendido dentro de dos Provincias Fisiográficas del país (INEGI, 1997): la porción centro y norte en la provincia Sierra Madre Occidental, Subprovincia

Fisiográfica Sierras y Valles del Norte, y la región sur en la Provincia Fisiográfica Llanura Sonorense, Subprovincia Fisiográfica Sierras y Llanuras Sonorenses

La Subprovincia de Sierras y Valles se caracteriza por sierras con orientación noroeste-sureste, limitadas por valles extensos rellenos por conglomerados bien consolidados con fragmentos de areniscas y tobas riolíticas (Formación Báucarit); mientras que la Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses se caracteriza por la presencia sierras más angostas que las llanuras, con pendientes abruptas.

### **3.2. Clima**

De acuerdo con la clasificación del clima de Köppen, modificada por Enriqueta García para las condiciones de México, en el territorio que cubre el acuífero se presentan cinco tipos de clima, que en orden de importancia por la superficie que cubren son:  $BS_0hw(x')$ ,  $BS1kw(x')$ ,  $BS1hw(x')$ ,  $BW(h')hw(x')$  y  $BWhw(x')$ . Los primeros tres son los más importantes y se presentan en la región centro y norte del acuífero. El primero de ellos,  $BS_0hw(x')$ , es de tipo seco, subtipo semicálido, con lluvias de verano, % de precipitación invernal mayor de 10.2 e invierno fresco, se presenta en gran parte del valle del río San Miguel. Los dos restantes son de tipo semiseco, subtipos templado y semicálido y con más de 10.2 % de lluvia invernal.

Para el análisis climatológico se consideraron los datos de 8 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Bacanuchi, Banámichi, Cucurpe, Rayón, El Cajón, Querobabi, Hermosillo Norte e Ímuris, en el período de observación que comprende 1963-2007. Mediante el método de polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **502.2 mm y 20.9 °C**, respectivamente. La evaporación potencial es del orden de **1725 mm anuales**. La temperatura media anual más baja se registra en la estación Bacanuchi con 17.6 °C y la más cálida en la estación de Hermosillo Norte con 24.7 °C. Los valores más altos de lluvia se registran en la estación Cucurpe, ubicada en la porción centro-norte del acuífero, con 534.7 mm, mientras que la lámina más baja se presenta en la estación Hermosillo Norte, con 357.8 mm anuales.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero Río San Miguel se ubica en la Región Hidrológica RH-9 “Sonora Sur”, dentro de la cuenca Río Sonora, subcuenca del Río San Miguel.

El río Sonora ocupa el tercer lugar en la Región Hidrológica 9, Sonora Sur en cuanto a extensión de cuenca y magnitud de aportaciones, que se almacenan y regularizan en las presas “El Molinito” y Abelardo Rodríguez Luján; hasta esta última su área de captación es de 21,035 km<sup>2</sup>. Su cuenca colinda por el norte con la de los ríos Gila y San Pedro, que se originan en territorio mexicano y fluyen hacia el norte pasando por las inmediaciones de Benson, Arizona, E.U; al norte y oriente colinda con las cuencas de los ríos Bavispe y Moctezuma, afluentes del Río Yaqui; al sureste con

el Río Mátape y el Arroyo La Bandera; al noroeste con la cuenca del Río Asunción y al suroeste con la del Río Bacoachi.

La subcuenca del Río San Miguel está formada por el área de captación de este río con el Río Zanjón; cuya confluencia se localiza aguas arriba de la presa Abelardo Rodríguez Luján, en la ciudad de Hermosillo. También confluye a la presa el Río Sonora; su aportador más importante es el Río San Miguel, cuya cuenca tiene un área de 8,427 km<sup>2</sup>, que representa el 40% del área drenada hasta la presa; tiene sus orígenes en el parte aguas con el arroyo Cocóspera, en la Sierra Azul, a una elevación de 1,200 msnm y su curso general es hacia el sur, el que descarga por su margen derecha, aguas arriba del sitio en que se localiza la cortina de la presa.

Los principales aportadores del Río San Miguel son el Río Saracachi y el Río Zanjón, que nacen en el parteaguas común con los ríos San Miguel y Al arroyo La Tinaja, situados al oriente de la cuenca del Río Asunción, en el Cerro Encarnado, a una elevación de 1,780 msnm. Los escurrimientos del Río San Miguel se miden en la estación hidrométrica El Cajón, en la cual se tiene registrado un escurrimiento medio anual de 37.5 hm<sup>3</sup>.

### **3.4. Geomorfología**

Las principales formas morfológicas que se encuentran expuestas en el área de estudio están representadas por valles, sierras y terrazas. Los valles están constituidos por materiales de relleno terciarios y cuaternarios; las sierras por rocas intrusivas, sedimentarias, volcánicas y metamórficas y las terrazas por los conglomerados. Se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de una serie de sierras y lomas paralelas, con orientación noreste-sur, separadas entre sí por valles angostos.

La zona norte está comprendida por la existencia de amplias cadenas montañosas separadas por valles intermontanos que estructuralmente representan bloques desplazados por fallas normales. Las principales depresiones topográficas se localizan en la mitad occidental del área, entre las que destaca el graben Los Pinos, relacionado con estructuras lineales de dimensiones regionales en las que se encuentran los principales arroyos que drenan el área. Rellenando los valles intermontanos, existe una unidad constituida por conglomerados polimícticos y areniscas con intercalaciones de tobas riolíticas. En la parte central es posible reconocer las sierras Aconchi y Los Locos con elevaciones máximas de 2180 m.s.n.m.

## **4. GEOLOGÍA**

### **4.1. Estratigrafía**

La unidades litoestratigráficas que afloran en el acuífero del Río San Miguel varían en edad del Precámbrico al Reciente y están representadas por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, metamórficas y sedimentarias marinas y continentales (figura 2). La descripción de las unidades

estratigráficas está basada en la Carta Geológico-Minera “Hermosillo” H12-8, escala 1:250000. (SGM, 1999).

### **Precámbrico Medio**

Conjunto de rocas ígneo-metamórficas, constituidas por gneises cuarzo feldespáticos de biotita y un granito porfídico con facies de augen gneis milonítico. Aflora en la región norte del acuífero, al poniente del poblado de Santa Margarita (específicamente alrededor del cerro “El Crestón”) y al noreste de Opodepe, en forma de pequeños cuerpos sobre el granito del batolito regional. Comúnmente el granito está metamorfozando formando gneis milonítico y augen gneis milonítico de color verde rosado, presenta bandas milimétricas de cuarzo y bandas rosadas a oscuras de feldespatos y biotita.

La secuencia se formó a partir de rocas intrusivas, de edad aproximada de 1,800 Ma, que fueron metamorfozadas hace 1,675 Ma (Rodríguez, 1984) y pueden representar la continuación hacia el sur del basamento cristalino Precámbrico de Caborca. Según la edad reportada en la porción sureste indica que esa parte es contemporánea con una serie de plutones graníticos porfídicos definida en Sonora norte y central (Anderson y Silver, 1981).

### **Proterozoico Superior**

Secuencia formada por areniscas cuarzofeldespáticas, ortocuarcitas, cuarcitas y conglomerados, graduando hacia la cima a intercalaciones de arenisca de grano fino, con ocasionales horizontes de lodolita y alternancia de dolomía. Su espesor medido es de 800 m, aunque se estima que posiblemente sea de aproximadamente 1500 m (Figueroa y Grijalva, 1989). Generalmente, la unidad se presenta plegada y fuertemente fracturada en diferentes direcciones, con zonas de metamorfismo de contacto causadas por intrusivos, que forman hornfels silíceos y metareniscas de cuarzo. Sobreyace discordantemente y por contacto tectónico a la unidad de granito-gneis del Precámbrico y subyace en discordancia tectónica a las rocas volcánicas del Cretácico Superior-Eoceno. También es cubierta discordantemente por rocas volcánicas del Terciario, por un conglomerado polimítico del Cuaternario y es afectado por los intrusivos laramídicos. Stoyanow en 1942 ubicó a esta secuencia en el Proterozoico Superior con base en la presencia de fósiles de algas *Collenia* y estromatolitos en las dolomías de la parte superior de la secuencia.

### **Paleozoico**

La secuencia paleozoica que sobreyace discordantemente consiste principalmente de calizas y areniscas depositadas en un ambiente de plataforma, cuyos afloramientos se agrupan en dos franjas: la primera con orientación NW-SE se extiende desde el poblado El Saucito hasta la ciudad de Hermosillo; la segunda tiene una orientación norte-sur y se extiende desde el oriente de Carbó hasta el rancho Las Norias, ubicado al oriente de Hermosillo. Por su importancia destaca una tercera zona de remanentes paleozoicos localizados en la porción oriental, en las sierras Aconchi, Mazatán y La Cañada. Las edades de estas rocas varían desde el Cámbrico hasta el Pérmico.

## Mesozoico

Las rocas mesozoicas que sobreyacen discordantemente están representadas principalmente por rocas cuyas edades varían del Triásico Medio al Cretácico Superior. El Triásico Medio está representado principalmente por areniscas y calizas que afloran en la Sierra La Flojera, ubicada al oriente de Hermosillo, donde fueron identificados pelecípodos del género *Halobia* sp. (Rodríguez, 1981), con rango estratigráfico del Triásico Medio al Superior.

El Jurásico Inferior sobreyace discordantemente y está representado por dos secuencias, una vulcanosedimentaria constituida por rocas de composición andesítica y areniscas, y otra sedimentaria representada por areniscas y calizas que afloran en el extremo noroeste y al noroeste de Hermosillo.

Sobreyaciendo discordantemente, aflora una secuencia de calizas, areniscas, limolitas y conglomerados en la base. Estas rocas afloran en la zona del poblado Cerro de Oro, ubicado al suroeste de Rayón y como techos colgantes sobre el batolito terciario en la Sierra Los Locos, al sur y noreste del rancho Los Taraises. Su edad se asigna al Cretácico Inferior por el gran contenido fosilífero de braquiópodos y orbitolinas que contienen las calizas. Algunos autores la correlacionan con las rocas del Grupo Bisbee debido a su similitud litológica y contenido fosilífero. Sobreyaciendo discordantemente a estas rocas afloran secuencias de rocas volcánicas y vulcanosedimentarias representadas por andesitas y areniscas, con horizontes de calizas del Cretácico Superior, que afloran al noreste de Rayón. Sobreyaciendo concordantemente a esta unidad se tiene una secuencia de andesitas y tobas andesíticas del Cretácico Superior, correlacionable con la parte media de la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1946). Sus afloramientos son aislados y distribuidos en la franja sur y centro, la secuencia es intrusionada por el granito del Terciario Inferior y se presenta como techo colgante. Es cubierto en discordancia y por contacto tectónico por rocas volcánicas del Cretácico Superior-Terciario Inferior; su contacto inferior se desconoce.

## Terciario

Sobreyaciendo concordantemente a la secuencia anterior, aflora una unidad constituida principalmente por riolitas y tobas riolíticas de edad Paleoceno-Eoceno, que aflora en la porción noreste de la zona, correlacionable con la parte superior de la Formación Tarahumara.

Durante el Cretácico Superior-Eoceno las rocas preexistentes fueron afectadas por una serie de intrusiones, representadas por granitos-granodioritas, monzogranitos, dioritas-granodioritas, pórfidos riolíticos, granitos de carácter peraluminoso con moscovita primaria y pórfidos cuarzomonzoníticos y andesíticos que forman parte de los intrusivos laramídicos. Estos cuerpos intrusivos están distribuidos en toda la superficie del acuífero y constituyen principalmente la Sierra de Aconchi, que es el elemento geomorfológico principal de la región. Aflora en la porción norte del área, en los cerros El Dátil, Enrique, Cañada del Muerto, al norte del cerro El Carrizo y en la cañada El Chichiquelite. Se encuentra sobreyaciendo discordantemente y en contacto por falla con la arenisca de cuarzo del Proterozoico Superior. Se considera que esta secuencia forma

parte de un arco volcánico continental que posiblemente se emplazó durante la subducción de la placa Farallón bajo la placa Norteamericana; por lo tanto, su ambiente de depósito es continental.

En este mismo rango de edad se incluye la secuencia de rocas que forman parte del conjunto volcánico-vulcanosedimentario del Cretácico Superior-Terciario Inferior; constituida por andesitas y areniscas con escasos horizontes de caliza y caliza arenosa, que afloran en la porción centro, al suroeste y sureste del poblado Santa Margarita, en la Cañada El Batamote y sur del cerro Loreto. También aflora en la porción centro y sur del área, al noroeste, noreste y suroeste del poblado Rayón. La secuencia se encuentra deformada presentando un rumbo preferencial NW-SE y echados al NE y al SW. Sobreyace discordantemente a la secuencia sedimentaria del Cretácico Inferior, en ocasiones por contactos tectónicos

Del Eoceno son los intrusivos de composición intermedia que afloran como cuerpos alargados entre la cañada El Aserradero y el Cerro Chichiquelite, al sur-sureste del Cerro El Crestón; en la cañada La Higuera; en el Cordón de Los Becerros; al sur del Cerro El Resbaladero y en el arroyo Los Chinos. Afectan al granito-gneis precámbrico y también al granito del Terciario, mediante contactos tectónicos y de intrusión. También se incluyen intrusivos de composición intermedia, con fenocristales de plagioclasas y escasos feldespatos potásicos inmersos en una matriz afanítica, en ocasiones con estructura fluidal y fragmentos de roca, que afloran en el arroyo El Salto, en las inmediaciones de Rayón.

Durante el Oligoceno se depositan discordantemente sobre las unidades eocénicas, rocas andesíticas y sobreyaciendo concordantemente a éstas, aflora una secuencia volcánica de tobas riolíticas y riolitas distribuida de manera aislada en la porción noroeste y ampliamente en una franja regional de rumbo norte-sur.

En el Mioceno durante el evento distensivo y por la erosión de los bloques levantados, se deposita una alternancia de conglomerados polimícticos, areniscas y escasos lentes de basaltos, conocida como Formación Báucarit (Dumble, 1900, King, 1939), que aflora con ligero basculamiento en varias localidades. Esta formación sobreyace en discordancia a las rocas volcánicas del Terciario, a la secuencia vulcanosedimentaria del Cretácico y a las rocas intrusivas laramídicas; se encuentra parcialmente cubierta al oriente de Hermosillo por flujos de basalto y tobas riolíticas de edad Terciario Tardío. Esta unidad de rocas aflora en la parte norte del área, en los alrededores del rancho Guadalupe y Cerro Prieto, así como en el extremo centro-este del área, al norte del cerro Los Amoles.

Del Mioceno-Plioceno se presentan flujos de rocas volcánicas de composición riolítica con ocasionales derrames de andesita, que sobreyacen a una secuencia compuesta de conglomerados y areniscas pertenecientes a la Formación Báucarit. Aflora en la porción centro-este del área, específicamente en el Cerro Pinto, localizado al norte del rancho Salas. Su afloramiento corresponde a flujos volcánicos compuestos por riolita, toba ignimbrítica y esporádicos derrames de composición andesítica. Sus relaciones estratigráficas son cubriendo

discordantemente a la secuencia vulcanosedimentaria, así como al granito laramídico; sobreyace concordantemente y en contacto tectónico a la Formación Báucarit, además es cubierto en discordancia por la secuencia de conglomerática del Cuaternario.

### Cuaternario

Unidad formada por conglomerados polimícticos poco consolidados, depositados en grandes valles. Se distribuyen en los valles del río San Miguel, en una franja orientada en sentido NW-SE. Su espesor varía desde algunos metros hasta 100 m. Se encuentran cubriendo en discordancia a todas las rocas preexistentes que afloran en el área y se le asigna una edad correspondiente a Pleistoceno. De esta misma unidad se considera a los depósitos aluviales que constituyen los cauces de ríos y arroyos, compuestos por gravas, arenas y depósitos lacustres que cubren a la Formación Báucarit y en algunas localidades a otras rocas preterciarias.

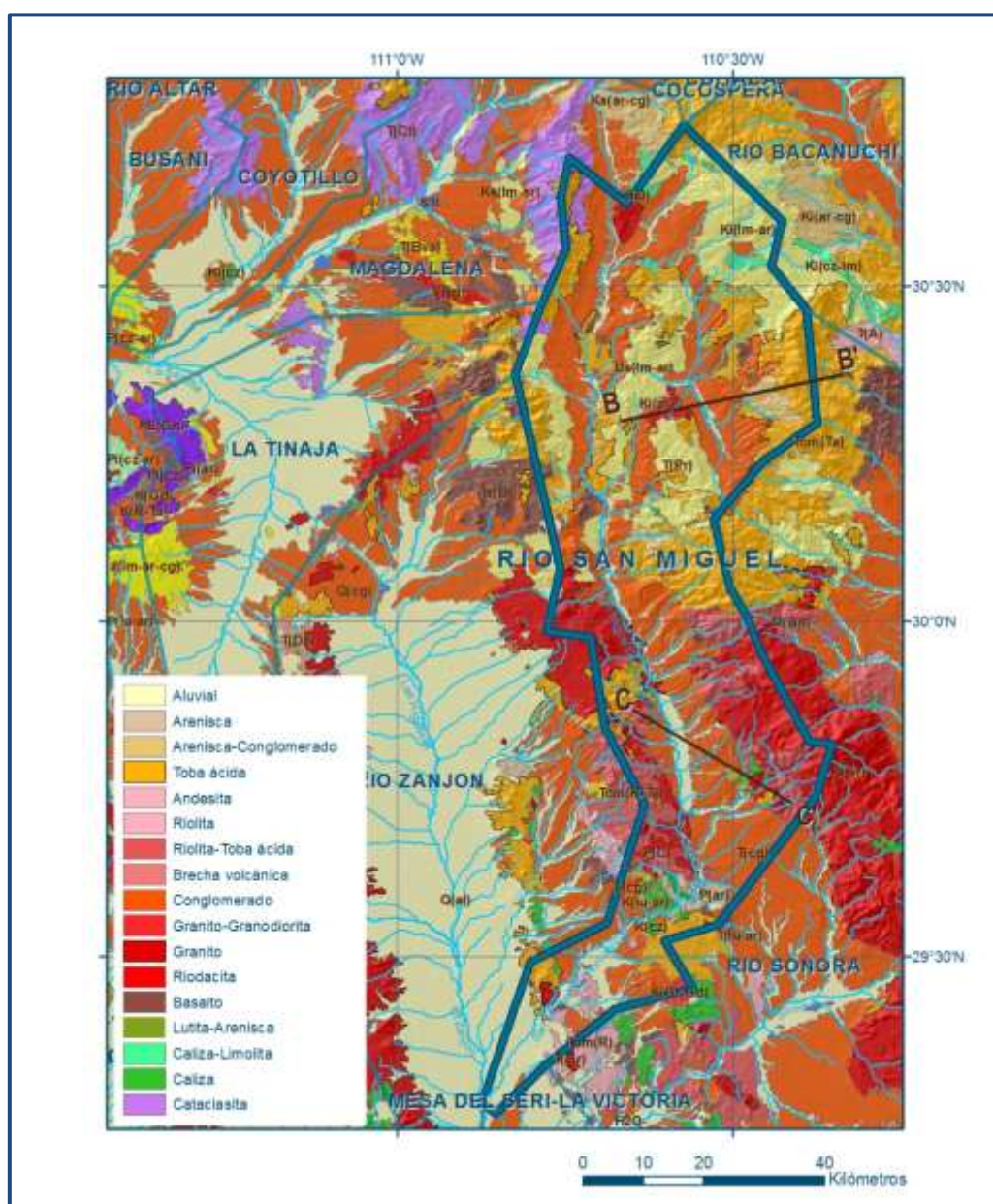


Figura 2. Geología general del acuífero

## **4.2. Geología estructural**

Las principales estructuras que se observan en la región se formaron por diferentes eventos tectónicos. La deformación más antigua ocurrió en el Precámbrico acompañada por metamorfismo regional, seguidos por una fase de deformación post-metamorfismo regional que afectó a las rocas metamórficas precámbricas, creando un plegamiento en la foliación existente, la segunda fase compresiva se llevó a cabo durante la Orogenia Mesocretácica, evidenciada por la discordancia existente entre la secuencia del Cretácico Inferior y la secuencia Vulcanosedimentaria del Cretácico Superior. Posteriormente, en el Cretácico Superior-Terciario Inferior, se produce un evento compresivo asociado a la Orogenia Laramide que deforma a las secuencias precretácicas. Este evento y el intenso magmatismo contemporáneo que produce el emplazamiento de los cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas, están asociados a cambios cinemáticos ocurridos al nivel de la subducción de la Placa Farallón debajo de la Placa Norteamericana. Posteriormente, durante el Oligoceno-Mioceno, se desarrolla un evento tectónico distensivo que dio origen a la formación de sierras y valles paralelos que caracterizan la morfología actual. En imágenes de satélite se identifican varios sistemas de fracturamiento y fallamiento, uno predominante de rumbo NW-SE, relacionado con los primeros con los eventos distensivos y otros con eventos compresivos. De la misma manera se definen grandes estructuras curvilíneas asociadas a intrusiones dómicas (Carta Geológico-Minera “Opodepe” H12-D12, escala 1:50000, SGM 1999)

Estructuralmente existen rasgos circulares regionales como los observados en la zona El Caliche, con direcciones N-S y NE-SW, además de curvilineamientos, plegamientos y lineamientos con orientación general NW-SE y una gran cantidad de fallas y fracturas, orientadas paralelamente a la posible traza de la Megacizalla Mojave-Sonora. La intensa deformación en las rocas de la cuenca del Jurásico-Cretácico Inferior, en la que se observan localmente pliegues de arrastre y fallas, evidencian un fuerte evento tectónico, ocurrido posiblemente durante el Cretácico Medio (Orogenia Mesocretácica), al que diversos autores se han referido, mencionando la existencia de cabalgaduras de las rocas de cuenca sobre las de plataforma, constituidas por el Grupo Bisbee, que en esta zona presenta pliegues amplios y abiertos. El evento distintivo se denomina “Basin and Range”, originó pilares y fosas con rumbo general NW-SE a N-S (Carta Geológico-Minera “Saracachi” H12-B72, escala 1:50000, SGM 1999)

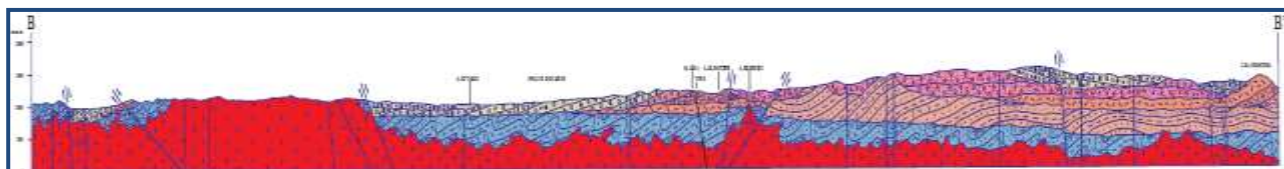
## **4.3. Geología del subsuelo**

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales, aluviales y conglomerados que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos, arroyos y abanicos aluviales, cuyo espesor varía desde algunos metros en las estribaciones de la sierra, incrementándose ligeramente en las inmediaciones de los cauces de los ríos y arroyos, hasta alcanzar varias decenas de metros en el centro de los valles. La porción inferior se aloja en un medio fracturado conformado por rocas sedimentarias, volcánicas y



vulcanosedimentarias, así como rocas ígneas intrusivas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración, respectivamente; cuyo espesor puede alcanzar algunas centenas de metros

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas ígneas, sedimentarias, extrusivas e intrusivas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración. El basamento geohidrológico regional está constituido por las rocas metamórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera 332\_H12-B72, "Saracachi" Esc. 1:50,000 (SGM, 1999)



Fuente: Carta Geológica-Minera 334\_H12-D12 "Opodepe" Esc. 1:50,000 (SGM, 1999)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, las evidencias geofísicas e hidrogeológicas, es posible definir la presencia de un acuífero **tipo libre heterogéneo y anisótropo**, constituido por dos medios: el superior de tipo granular y el inferior fracturado.

El medio granular poroso está conformado por los depósitos no consolidados y semi-consolidados que incluyen materiales clásticos y conglomerados de granulometría diversa, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en la zona, estos materiales presentan permeabilidad media a alta y se ubican en la proximidad del cauce de los ríos y arroyos en donde alcanzan su mayor espesor que es de algunas decenas de metros. El medio fracturado está constituido por rocas sedimentarias, volcánicas, vulcanosedimentarias e ígneas intrusivas que presentan porosidad secundaria por fracturamiento y alteración. Las rocas intrusivas cuando presentan fracturamiento y alteración son capaces de transmitir y almacenar el agua de lluvia.

### 5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades de los estudios realizados en 2005 y 2008, se ejecutaron 9 pruebas de bombeo de corta duración, principalmente en norias, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos, se establece que los

valores de transmisividad varían de  **$150 \times 10^{-3}$  a  $9.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (12960 a 795  $\text{m}^2/\text{d}$ )**. Los valores más altos corresponden a los depósitos aluviales de granulometría gruesa que conforman el cauce del río y arroyos. De acuerdo con el espesor saturado la conductividad hidráulica varía de **0.000837 a 0.015 m/s (72.3 a 1296 m/d)**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

### **5.3. Piezometría**

Existe información piezométrica desde 1970, sin embargo no es continua en el tiempo y sólo es de algunas zonas del acuífero. La información considerada para el análisis piezométrico corresponde al periodo 2005-2008, cuando se recabó información de la piezometría en la mayor parte de la superficie del acuífero, a lo largo del cauce del Río San Miguel.

### **5.4. Comportamiento hidráulico**

Para el análisis del comportamiento hidráulico del acuífero se tomó en cuenta la información recabada durante 2008 y se apoyó en la que corresponde a 2005 y 2006 para la elaboración de las configuraciones del nivel estático. Debido a que el acuífero se aloja principalmente en los depósitos aluviales y fluviales que constituyen el cauce del Río San Miguel y su llanura de inundación, los niveles del agua subterránea responden de manera rápida a la recarga originada por la infiltración de los escurrimientos

#### **5.4.1. Profundidad al nivel estático**

Para 2008 la profundidad al nivel estático variaba desde algunos metros, registrados en la zona cercana al cauce del río y algunos arroyos, hasta 60 m, conforme se asciende topográficamente hacia los piedemontes. Los valores más someros se presentan en la porción central del acuífero y los más profundos hacia el sur (figura 4).

#### **5.4.2. Elevación del nivel estático**

La configuración de elevación del nivel estático en 2008 registró valores que variaban de 1200 a 250 msnm, decreciendo de las zonas topográficamente más altas hacia las más bajas a lo largo del cauce del Río San Miguel y los arroyos tributarios; mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando la dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur, a lo largo del cauce del Río San Miguel hacia la zona de confluencia con los ríos Zanjón y Sonora, con alimentaciones procedentes de los flancos oriental y occidental (figura 5).

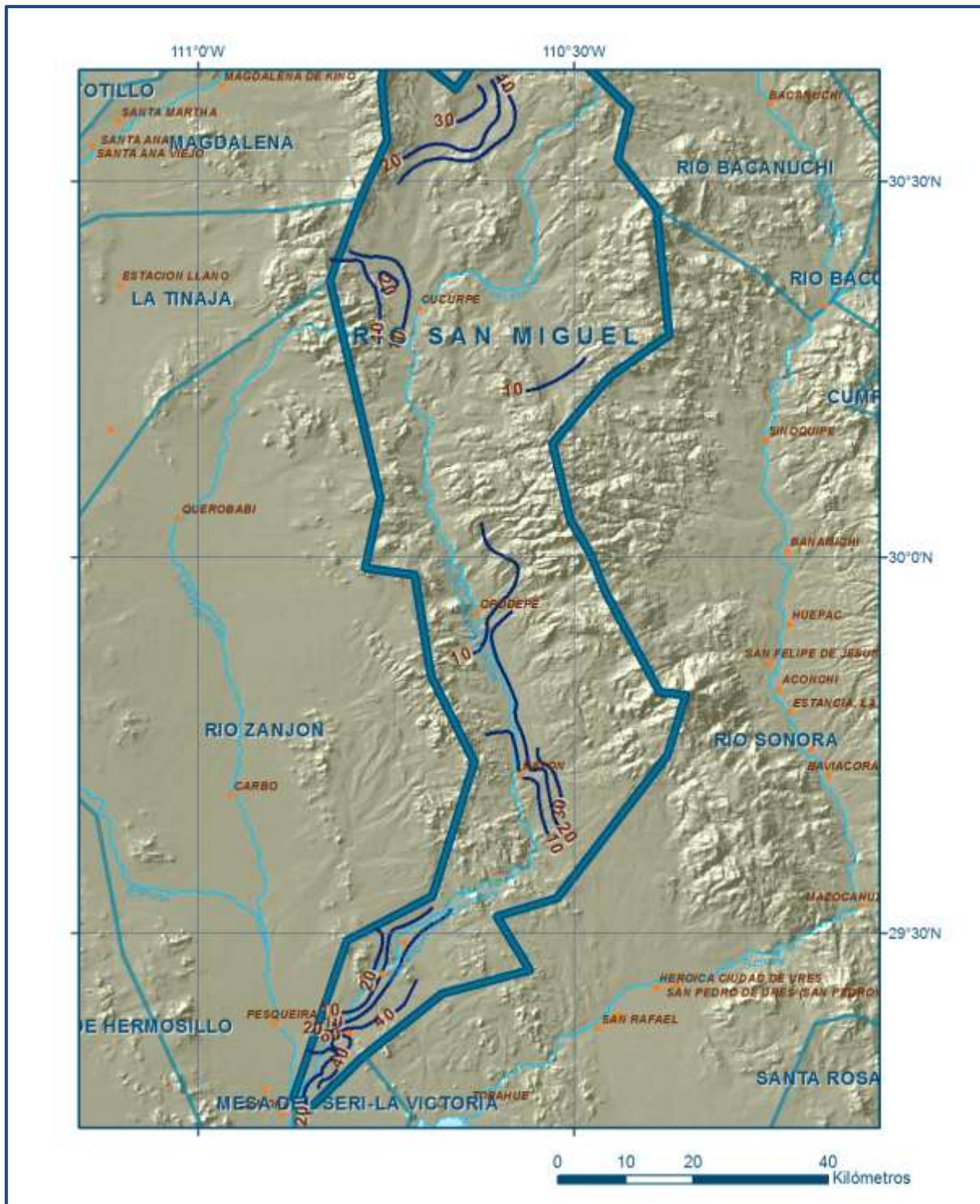


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008)



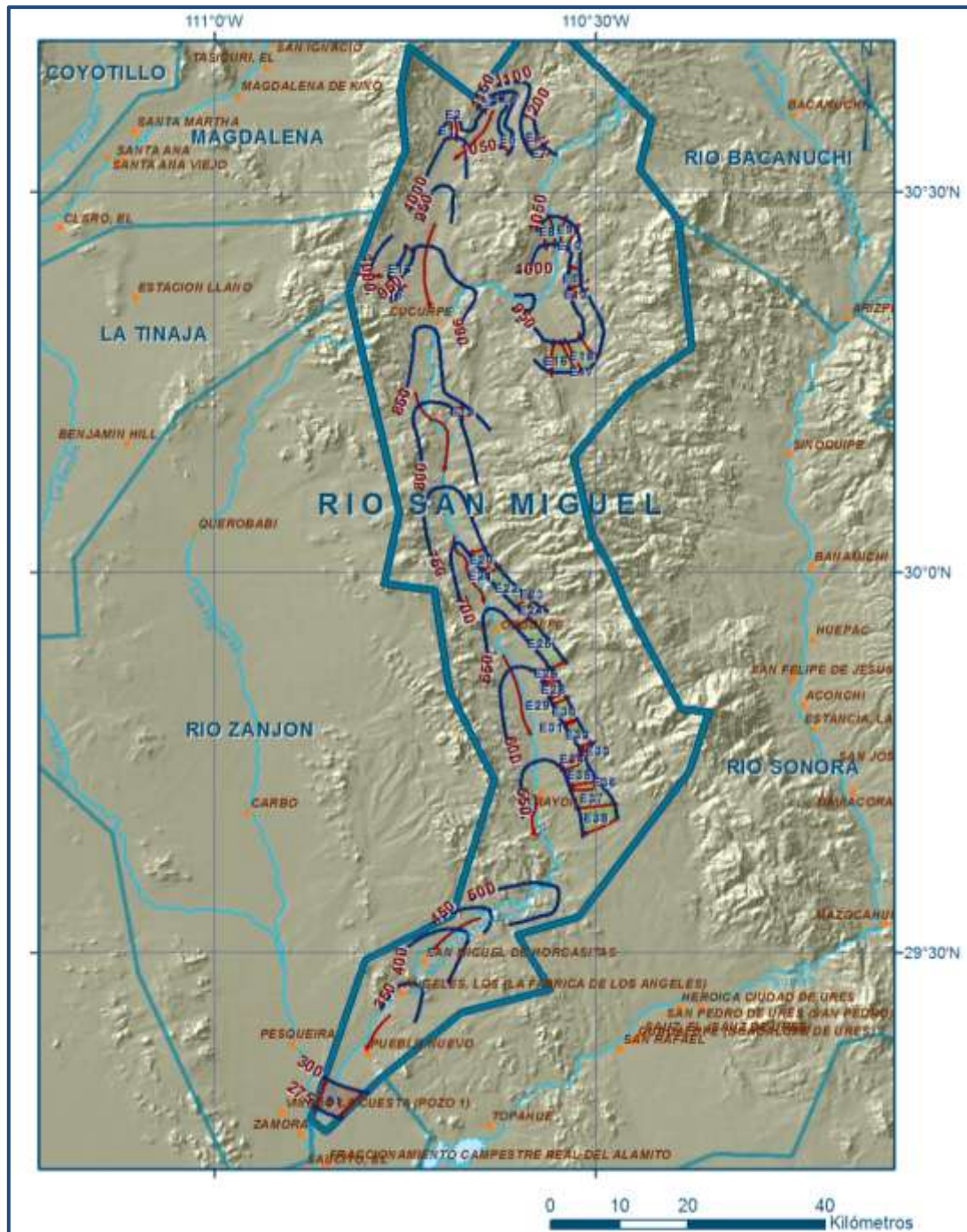


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

#### 5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 2005-2008, se registraron valores puntuales tanto de abatimiento como de recuperación (figura 6), sin manifestaciones de alteración del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de aprovechamientos 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 de este periodo de tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

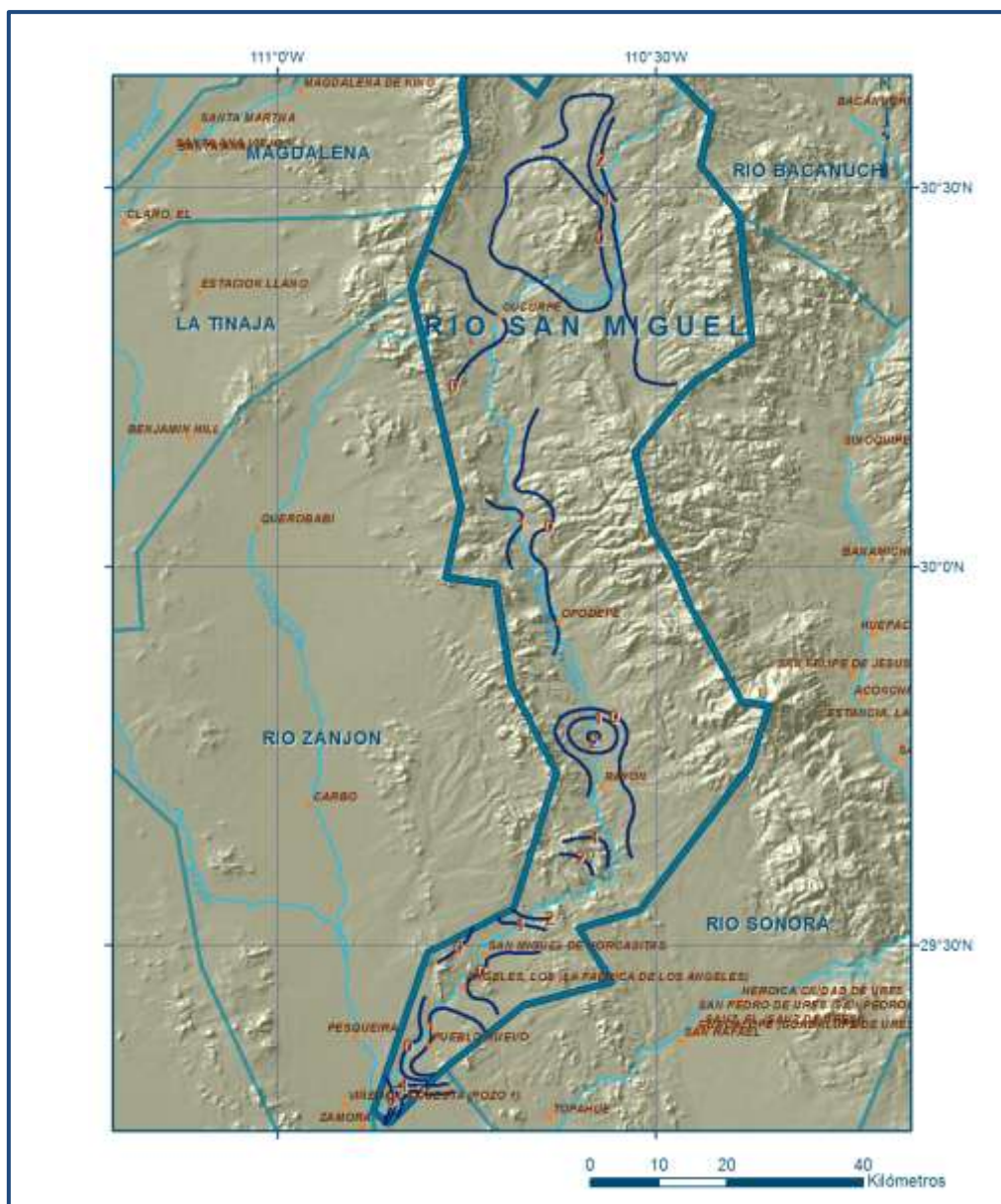


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2005-2008)

## 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En los estudios realizados en 2005 y 2008 se tomaron muestras de agua subterránea en 20 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones mayores y menores, conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), nitratos, dureza, sólidos totales disueltos (STD) y dureza total. De los resultados de los análisis se determinó que las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo. La concentración de sólidos totales disueltos varía de 186 a 887 mg/lit, los cuales se incrementan de sur a norte, a lo largo del cauce del Río San Miguel. Los valores más altos se registraron en la porción suroccidental del acuífero, confirmando la dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur.

De acuerdo con los valores de conductividad eléctrica obtenidos, que varían de 290 a 1370  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el agua del acuífero se clasifica como agua dulce. La temperatura medida en los sitios de muestreo varía de 12.9 a 30.5 °C, con promedio de 21.8 °C; con respecto al pH, el valor promedio es de 7.4.

Con relación a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, la familia de agua predominante es la bicarbonatada cálcica ( $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ), que representa agua meteórica de reciente infiltración. En menor proporción se presentan las familias bicarbonatada sódica ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ) y sulfatada-cálcica-sódica ( $\text{SO}_4\text{-Ca-Na}$ ).

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en 2008, se registraron un total de 179 aprovechamientos del agua subterránea, la mayoría de ellos norias.

El volumen total de extracción estimado es de **56.9  $\text{hm}^3/\text{año}$** , de los cuales 48.4  $\text{hm}^3$  (85.1%) se destinan al uso agrícola, 7.4  $\text{hm}^3$  (13.0%) para uso público-urbano y 1.1  $\text{hm}^3$  (1.9%) para uso doméstico.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2005-2008, en una superficie aproximada de **800  $\text{km}^2$**  del acuífero, en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o recuperado en 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 de la unidad hidrogeológica:

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

### **7.1. Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero ( $R_t$ ) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de

agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos del Río San Miguel, 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; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en la redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero, estos volúmenes se agrupan en una variable denominada recarga inducida (Ri). Para este caso, debido a que las poblaciones rurales se encuentran dispersas y al bajo volumen de agua para uso público urbano, sólo se considera la recarga producida por los excedentes del riego agrícola (Rr).

#### **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 ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión (1):

$$Rv + Eh + Rr - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

**Rv:** Recarga Vertical

**Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal

**Rr:** Retornos de riego

**B:** Bombeo

**Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal

**ETR:** Evapotranspiración

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

#### **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 piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

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

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

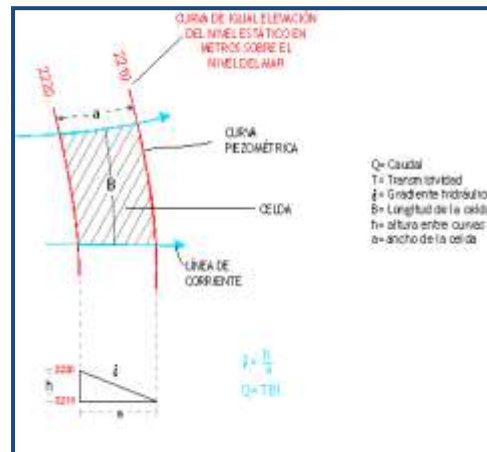
Donde:

**Q** = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

**B** = Longitud de la celda (m)

**i** = Gradiente Hidráulico (adimensional)

**T** = Transmisividad (m<sup>2</sup>/s)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en 2008 y otros previos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

El cálculo de la entradas subterráneas para 2008 se presenta en la tabla 2, en la que se observa que su valor total es de **49.6 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 7.1.3. Retornos de riego (Rr)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen exclusivamente por concepto de los excedentes del riego, ya que en la región no existen asentamientos humanos importantes cuya infraestructura hidráulica pueda generar fugas importantes en los sistemas de abastecimiento de agua potable y/o del alcantarillado.

En el acuífero Río San Miguel existe una zona agrícola cuya superficie aproximada es de 7,212 ha, localizada a lo largo del cauce del río del mismo nombre. Según el censo de aprovechamientos subterráneos realizado en 2008, los cultivos principales son: forrajes (70%), sorgo (5%), alfalfa (15%), avena (5%) y maíz (5 %). El uso consuntivo promedio ( $\overline{UC}$ ) se calculó como:

$$\overline{UC} = \frac{\sum_{i=1}^3 A_i UC_i}{\sum_{i=1}^3 A_i}$$

Donde  $A_i$  y  $UC_i$  son el área y el uso consuntivo del cultivo  $i$ .

La estimación del uso consuntivo por cultivo se realizó mediante la fórmula de Blaney–Criddle modificada por Phelan (Aguilera y Martínez, 1996). Si  $i = 1, 2, 3, 4$  para forraje, sorgo, alfalfa, avena y maíz, respectivamente, se tiene:

$$\overline{UC} = \frac{(5048ha \times 1250mm) + (361ha \times 703mm) + (1082ha \times 1008mm) + (361ha \times 753mm) + (361 \times 700mm)}{7212 \text{ ha}} = 1,156mm$$



Por el método de balance hídrico, la lámina de recarga por retorno de riego (Rr), se calcula como:

$$Rr = P + L_r - \overline{UC}$$

En donde  $L_r$  es la lámina de riego aplicada, la cual se obtiene como el cociente de la extracción para uso agrícola (48'400,000 m<sup>3</sup>/año) y la superficie regada (7212 ha), arrojando un valor de 671.1 mm. La lámina de precipitación en el acuífero es de 502.2 mm. De esta manera:

$$Rr = 502.2 + 671.1 - 1156.0 = 17.3 \text{ mm}$$

Multiplicada por el área total de riego, el volumen estimado como retorno de riego es de **1.2 hm<sup>3</sup>/año**, que representan el 2.5 % de los 48.4 hm<sup>3</sup> anuales destinados al uso agrícola.

## **7.2. Salidas**

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por flujo subterráneo (Sh) y por evapotranspiración en niveles someros (ETR).

### **7.2.1. Bombeo (B)**

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción por bombeo es de **56.9 hm<sup>3</sup>/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 presentado en la figura 5. Su valor es de **2.2 hm<sup>3</sup> anuales**, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas horizontales (2008)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	1822	2641	50	0.01893	0.0007	0.0241	0.8
E2	280	3155	50	0.01585	0.0007	0.0031	0.1
E3	3504	1774	50	0.02818	0.0007	0.0691	2.2
E4	400	1764	50	0.02834	0.0007	0.0079	0.3
E5	7297	1558	50	0.03209	0.0007	0.1639	5.2
E6	375	1864	50	0.02682	0.0007	0.0070	0.2
E7	850	2005	50	0.02494	0.0007	0.0148	0.5
E8	844	3351	50	0.01492	0.0007	0.0088	0.3
E9	50	3362	50	0.01487	0.0007	0.0005	0.0
E10	3316	953	50	0.05247	0.0007	0.1218	3.8
E11	2545	1645	50	0.03040	0.0007	0.0541	1.7
E12	50	1950	50	0.02564	0.0007	0.0009	0.0
E13	5253	2268	50	0.02205	0.0007	0.0811	2.6
E14	180	2709	50	0.01846	0.0007	0.0023	0.1
E15	2681	2290	50	0.02183	0.0007	0.0410	1.3
E16	1990	2975	50	0.01681	0.0007	0.0234	0.7
E17	260	3018	50	0.01657	0.003	0.0129	0.4
E18	2146	3101	50	0.01612	0.0007	0.0242	0.8
E19	290	1950	50	0.02564	0.0007	0.0052	0.2
E20	2329	1941	50	0.02576	0.003	0.1800	5.7
E21	201	1811	50	0.02761	0.0007	0.0039	0.1
E22	6594	1655	50	0.03021	0.0007	0.1395	4.4
E23	320	2055	50	0.02433	0.0007	0.0055	0.2
E24	1593	2217	50	0.02255	0.0007	0.0251	0.8
E25	7281	2066	50	0.02420	0.0007	0.1233	3.9
E26	1986	1423	50	0.03514	0.0007	0.0488	1.5
E27	280	1394	50	0.03587	0.0007	0.0070	0.2
E28	2246	1385	50	0.03610	0.0007	0.0568	1.8
E29	402	1342	50	0.03726	0.0007	0.0105	0.3
E30	4019	1362	50	0.03671	0.0007	0.1033	3.3
E31	120	1275	50	0.03922	0.0007	0.0033	0.1
E32	4600	1163	50	0.04299	0.0007	0.1384	4.4
E33	246	2986	50	0.01674	0.0007	0.0029	0.1
E34	2352	3484	50	0.01435	0.0007	0.0236	0.7
E35	770	3949	50	0.01266	0.0007	0.0068	0.2
E36	750	3921	50	0.01275	0.0007	0.0067	0.2
E37	320	3747	50	0.01334	0.0007	0.0030	0.1
E38	1749	3421	50	0.01462	0.0007	0.0179	0.6
<b>Total entradas</b>							<b>49.6</b>

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas horizontales (2008)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	4239	4490	25	0.00557	0.0030	0.0708	2.2
							<b>2.2</b>

### 7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

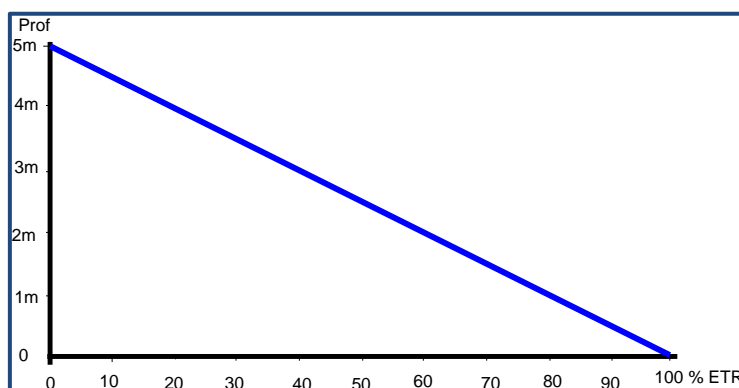
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera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

En toda el área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 5 m de profundidad, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real que es de 489.3 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 20.93 °C y precipitación de 502.2 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) =	20.93		
P(mm) =	502.2	P <sup>2</sup> =	252204.84
L =	1281.68492	L <sup>2</sup> =	1642716.23
ETR (mm)	489.3		

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



La tabla 4 muestra el cálculo de la evapotranspiración, en la que se puede observar que el valor de esta componente del balance se estima en **9.6 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 4. Calculo de la evapotranspiración (2008)

Profundidad Promedio (m)	Área (km <sup>2</sup> )	%	ETR (m)	Vol ETR (hm <sup>3</sup> /año)
2	3.5	0.8	0.4893	1.4
2.5	5.2	0.75	0.4893	1.9
3	2.1	0.7	0.4893	0.7
3.5	3.5	0.65	0.4893	1.1
4	2.0	0.6	0.4893	0.6
4.5	7.5	0.55	0.4893	2.0
5	7.6	0.5	0.4893	1.9
	<b>31.4</b>	<b>TOTAL =</b>		<b>9.6</b>

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

El cambio de almacenamiento representa el volumen ganado o drenado por acuífero y se calcula a partir de la evolución piezométrica observada en el área de balance y del coeficiente de almacenamiento.

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, sólo se registran abatimientos y recuperaciones puntuales y no se observan alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción. 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. Es decir  **$\Delta V(S) = 0$**

### 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 recarga vertical (Rv), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$\begin{aligned}
 R_v &= B + Sh + ETR \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\
 R_v &= 56.9 + 2.2 + 9.6 - 0.0 - 49.6 - 1.2 \\
 R_v &= 17.9
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 R_t &= R_v + E_h + R_i \\
 R_t &= 17.9 + 49.6 + 1.2 \\
 R_t &= 68.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

## **8. DISPONIBILIDAD**

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

**DAS:** Disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero.

**R<sub>t</sub>:** Recarga total media anual.

**DNCOM:** Descarga natural comprometida.

**VCAS:** Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA.

### **8.1. Recarga media anual (R<sub>t</sub>)**

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R<sub>t</sub>), 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 **68.7 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 67.5 hm<sup>3</sup> son recarga natural y 1.2 hm<sup>3</sup> recarga inducida.

### **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, su valor es de **2.2 hm<sup>3</sup> anuales**, que corresponden a las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero vecino Mesa del Seri – La Victoria.

### **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 (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de marzo de 2013**, es de **48,991,893 m<sup>3</sup>/año**.

#### **8.4. 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, 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 REPDA.

$$\text{DAS} = R_t - \text{DNCOM} - \text{VCAS}$$

$$\text{DAS} = 68.7 - 2.2 - 48.991893$$

$$\text{DAS} = 17.508107 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **17'508,107 m<sup>3</sup>** para otorgar nuevas concesiones.

## **9. BIBLIOGRAFIA**

Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora. 2005. Estudio Geohidrológico de las subcuencas de los ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri – La Victoria y Cuenca Bacoachito. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora. 2006. Estudio de piezometría y evolución de niveles, en la cuenca media y alta del río Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua. 2005. Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo piezométrico del Estado de Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas; Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica, 2003. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río San Miguel, Estado de Sonora.

Exploraciones Global, S.A de C.V., 2008. Estudio de evaluación hidrogeológica para el proyecto minero “El Crestón”, municipio de Rayón, Estado de Sonora. Primera etapa: factibilidad hidrogeológica. Realizado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS).

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1971. Estudio de Hidrología Superficial de los valles de los ríos San Miguel, Sonora, Zanjón, Bacoachi y Mátape, Sonora. Elaborado por Ariel Construcciones, S. A.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera “Hermosillo” H12-8, escala 1:250000.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera “Opodepe” H12-D12, escala 1:50000.

Servicio Geológico Mexicano, 1999. Carta Geológico-Minera “Saracachi” H12-B72, escala 1:50000.