



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO ALISOS (2613), ESTADO DE  
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1</b>	<b>GENERALIDADES</b> .....	<b>2</b>
	<b>Antecedentes</b> .....	<b>2</b>
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>FISIOGRAFÍA</b> .....	<b>5</b>
3.1	Provincias fisiográficas.....	5
3.2	Clima.....	5
3.3	Hidrografía.....	6
3.4	Geomorfología.....	6
<b>4</b>	<b>GEOLOGÍA</b> .....	<b>7</b>
4.1	Estratigrafía.....	9
4.2	Geología estructural.....	13
4.3	Geología del subsuelo.....	14
<b>5</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA</b> .....	<b>15</b>
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.....	17
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	18
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
<b>6</b>	<b>CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA</b> .....	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS</b> .....	<b>21</b>
7.1	Entradas.....	22
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	23
7.1.3	Retornos de riego (Rr).....	24
7.2	Salidas.....	25
7.2.1	Bombeo (B).....	25
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	25
7.2.3	Evapotranspiración (ETR).....	26
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	27
<b>8</b>	<b>DISPONIBILIDAD</b> .....	<b>29</b>
8.1	Recarga total media anual (R).....	29
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	29
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>31</b>

## **1 GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-

Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

### **1.1 Localización**

El acuífero Río Alisos, definido con la clave 2613 por la Comisión Nacional del Agua. Se localiza en la porción norte del estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 30° 50' y 31° 20' de latitud norte y 111° 05' y 110° 45' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 893 km<sup>2</sup> (figura 1).

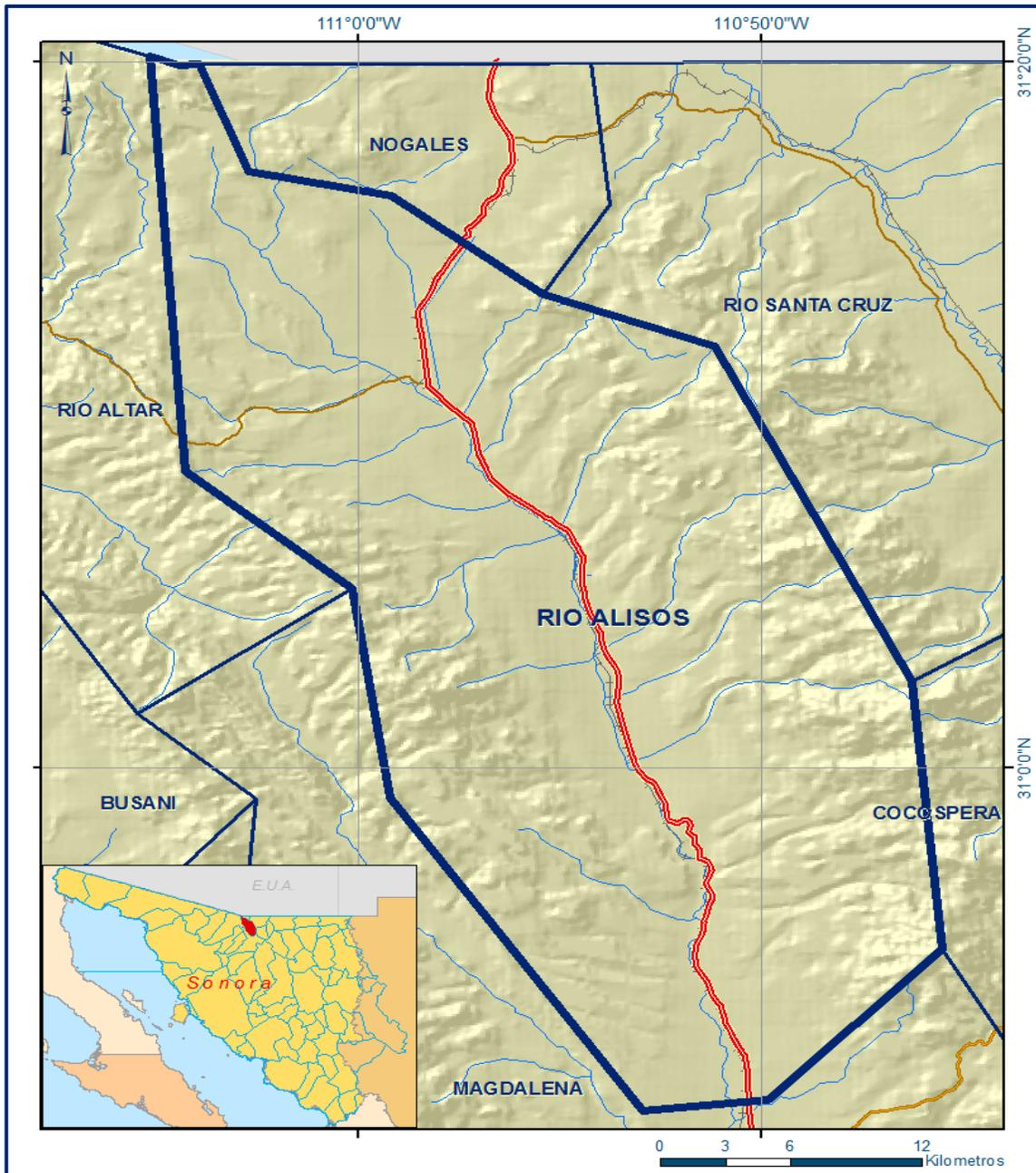


Figura 1. Localización del acuífero

Colinda al norte con el acuífero Nogales, al sur con el acuífero Magdalena, al este con los acuíferos Río Santa Cruz y Cocospera, y al oeste con el acuífero Río Altar, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora.

Geopolíticamente, abarca parcialmente los municipios de Imuris y Nogales.

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 2613 RIO ALISOS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	45	29.2	30	54	51.9	
2	110	49	49.7	30	50	35.7	
3	110	52	56.7	30	50	16.0	
4	110	59	11.7	30	59	8.7	
5	111	0	8.2	31	5	5.3	
6	111	4	18.2	31	8	23.7	
7	111	5	9.3	31	20	9.6	del 7 al 8 por el limite internacional
8	111	3	56.4	31	19	56.2	
9	111	2	42.8	31	16	54.2	
10	110	59	10.5	31	16	13.3	
11	110	55	24.8	31	13	24.9	
12	110	51	8.6	31	11	57.6	
13	110	46	14.5	31	2	27.0	
1	110	45	29.2	30	54	51.9	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río Alisos pertenece al Organismo de Cuenca “Noroeste”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto que 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 (parte oeste del meridiano 110° de Greenwich)”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de septiembre de 1978. Este decreto es tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

## 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 DEL ESTADO DE SONORA. UNIVERSIDAD DE SONORA, elaborado para la Comisión Nacional del Agua, en 2005.**

El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la Gerencia Regional Noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. A parte de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de configuración del nivel estático. Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos.

**ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS: LOS VIDRIOS, RÍO ALISOS, ARROYO SAHUARO, SAHUARAL Y CUITACA EN EL ESTADO DE SONORA, elaborado por la empresa IDEAS, para la Comisión Nacional del Agua, en 2009.** El estudio incluyó actividades de campo como censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones y estimación de parámetros hidráulicos, con las que fue posible plantear el balance de aguas subterráneas en los cinco acuíferos. Además de los planos temáticos, se incluyen los de configuración del nivel estático, así como las tablas de resultados obtenidos, el balance de aguas subterráneas y la estimación de la disponibilidad de aguas subterráneas para cada acuífero.

La información generada de este estudio, que corresponde al análisis climatológico, geología, geofísica, piezometría e hidrogeoquímica, es la más completa, por lo que constituye la base para la elaboración de este documento, de manera que sus resultados y conclusiones se mencionan en los apartados correspondientes.

### **3 FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincias fisiográficas**

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el acuífero Río Alisos se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, subprovincia Sierras y Valles del Norte.

La principal forma fisiográfica que predomina en el acuífero es la sierra alta, seguida por el valle intermontano. La primera cubre el 74% del área total del acuífero y se manifiesta en las sierras que rodean al acuífero; la segunda abarca el 16% restante y se presenta en la parte central, que corresponde a las zonas topográficamente más bajas.

#### **3.2 Clima**

En el acuífero Río Alisos se manifiestan tres tipos de clima según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964):

1. *BSI kw (x')*. Este tipo de clima es el que predomina en el acuífero y se presenta en las zonas de mayor elevación topográfica. Corresponde a un clima templado con verano cálido, lluvias en verano, manifestándose en los meses de julio y agosto, temperatura media anual entre 12 y 18 °C.
2. *BSI hw (x')*. Clima semiseco, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2. Semicálido con invierno fresco, con temperatura media anual mayor a 18°C. Este clima se manifiesta en zonas topográficamente más bajas que el clima anterior, principalmente en el valle comprendido entre el Ejido Cíbuta y Estación Cumeral.
3. *BSo hw (x')*. Corresponde al clima seco, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2. Semicálido con invierno fresco, con temperatura media anual de 18 °C. Se manifiesta en la parte sur del acuífero, a partir del poblado Estación Cumeral.

Para el análisis climatológico, se recopiló la información de tres estaciones climatológicas, todas ellas administradas por la Comisión Nacional del Agua: Cumeral, Nogales y El Fresnal. Solo la primera se encuentra dentro de los límites del acuífero, mientras las dos restantes se encuentran al norte y sur, respectivamente. La temperatura media anual en el acuífero es de 18.3 °C. Con base en el análisis climatológico, se obtuvo una precipitación media anual en el acuífero de 509.5 mm. La evaporación potencial media anual en el acuífero es de 1814.0 mm.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero Río Alisos se localiza en la Región Hidrológica 8 “Sonora Norte”, dentro de la cuenca del Río Asunción o Concepción (B) y de la subcuenca Río de los Alisos (e). El acuífero presenta una topografía accidentada, con escasos aprovechamientos superficiales. El Río Los Alisos tiene sus orígenes en el parteaguas con el Río Santa Cruz en la Sierra Pajarito, a una altitud de 1,600 m. Su curso general es hacia el sur y confluye al colector general por su margen derecha, ligeramente aguas abajo de la población de Imuris, a una altitud de 840 m.

### **3.4 Geomorfología**

En el Acuífero Alisos se presentan nueve formas morfológicas, incluyendo la zona urbana. La forma que predomina en el 57% del área es la *ladera montañosa*, que se encuentra formada por rocas volcánicas del Jurásico Inferior y del Terciario Mioceno. La segunda forma que predomina es el *Lomerío estable*, pues ocupa el 30% del área total, manifestándose como un lomerío de pendiente estable de conglomerado polimíctico del Cuaternario Pleistoceno.

Las planicies representan el 11% del área del acuífero, y se forman por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario Holoceno. El área restante es ocupada por las formas fisiográficas de menor extensión: piedemonte estable, zona cultivada de origen antropogénica y zona urbana. La primera está constituida por conglomerado polimíctico del Cuaternario Pleistoceno, mientras la segunda, consiste en gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario Holoceno.

#### **4 GEOLOGÍA**

Las rocas precámbricas forman dos grupos, uno con edades entre 1800 y 1700 Ma en el noroeste del Estado y el otro con edades entre 1700 y 1600 Ma en el noreste, separados por la falla de desplazamiento lateral izquierdo Mojave-Sonora, que se extiende desde las montañas Inyo-Mojave en el suroeste de Estados Unidos, atravesando el desierto de Sonora hasta la región de Tuape en Sonora Central. Posteriormente se incorporan al basamento precámbrico dos periodos de plutonismo: el más antiguo, cuya edad se ubica en el intervalo de 1460-1410 Ma (Anderson y Silver, 1981), consiste de granito-granodiorita megacrystalino que generalmente no está deformado y se considera que forma parte de una serie de plutones anorogénicos y cogenéticos que se extienden por el suroeste de Arizona y norte de Sonora, donde se le conoce como Granito Cananea.

El segundo periodo de plutonismo genera rocas graníticas conocidas como Granito Aibó, litológicamente diferentes, con textura micrográfica y con una edad de 1100 Ma.

Durante el Precámbrico Superior hasta el Paleozoico Superior la margen occidental del cratón de Norteamérica registra una historia de sedimentación continua en una margen continental del tipo pasivo, donde se desarrolló una cuenca de tipo geosinclinal. A partir del Triásico el régimen tectónico de la margen oeste de Norteamérica cambió de pasivo a activo al presentarse un proceso de convergencia de placas litosféricas.

La Cordillera de Norteamérica se desarrolló por acreción de terrenos, magmatismo y deformación compresiva dirigida hacia el interior del continente, produciéndose durante el Mesozoico las deformaciones Nevadiana, Sevier y Laramide. De esta manera, en la margen oeste de Norteamérica y noroeste de México la actividad tectónica durante el Jurásico se relaciona con el inicio de un arco magmático continental con orientación noroeste-sureste, formado por un complejo volcánico-plutónico calcoalcalino y volcanosedimentario.

La actividad relacionada con este arco es interrumpida por la megacizalla Mojave-Sonora con un desplazamiento lateral izquierdo que probablemente ocurrió en el Jurásico Medio-Tardío (Anderson y Silver, 1979) (figura 2).

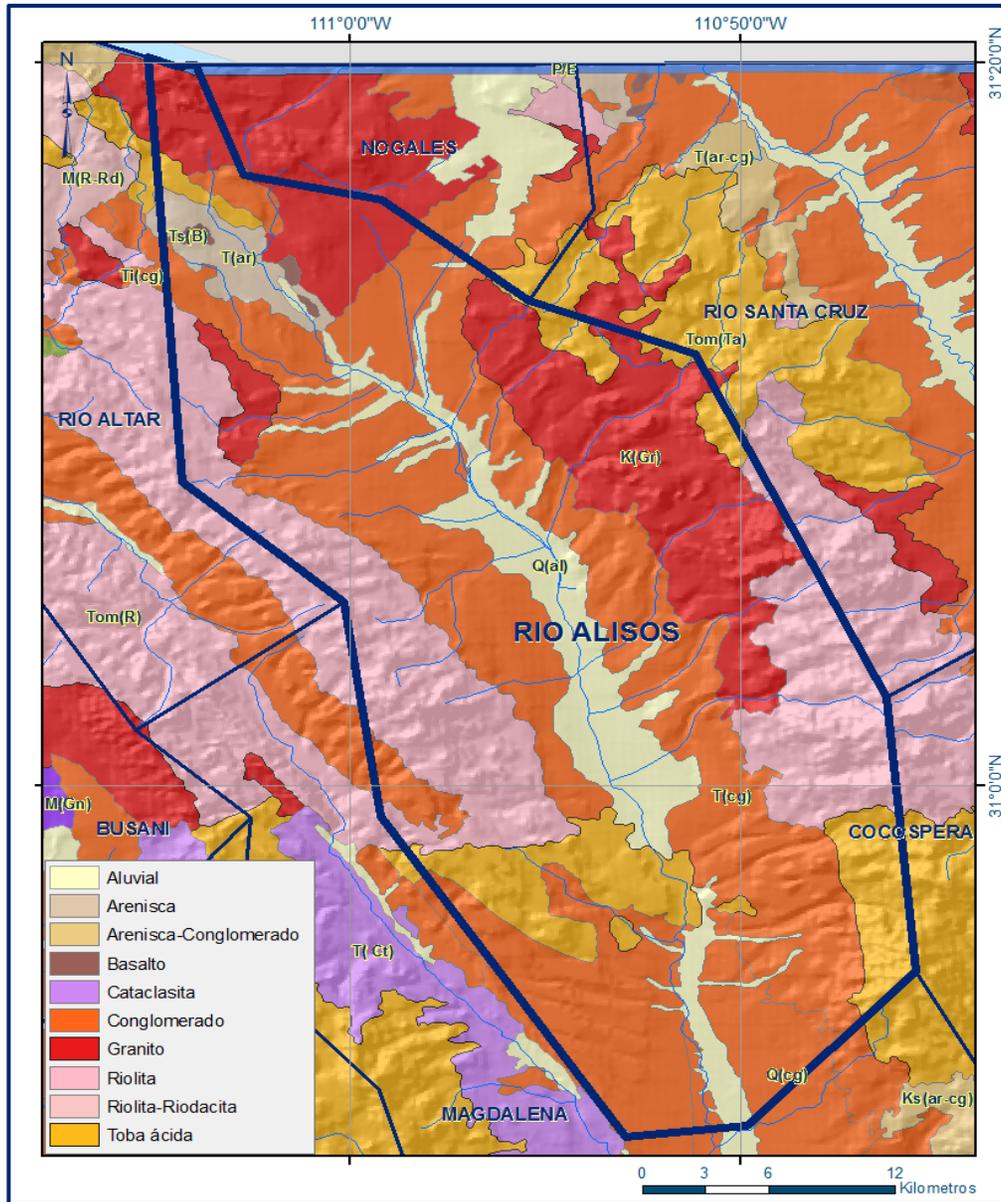


Figura 2. Geología del acuífero

El ambiente tectónico de este tiempo en el noroeste de Sonora está dominado por esta falla transcurrente que yuxtapone dos bloques tectónicos con características diferentes: el bloque Caborca (Campa y Coney, 1983) con rocas que corresponden al basamento proterozoico con edades entre 1800 y 1700 Ma, y el bloque Pápago (Haxel *et al.*, 1984) donde las rocas más antiguas pertenecen al arco magmático Jurásico con edades dentro de un intervalo aproximado entre 180 y 170 Ma.

Los afloramientos de rocas proterozoicas son escasos o están ausentes, sin embargo, se considera parte del cratón de Norteamérica.

Durante el Mesozoico, la polaridad de la sedimentación cambió hacia el oriente desde las nuevas regiones emergidas, formándose gruesas secuencias sinorogénicas de sedimentos continentales las cuales se interdigitaron con los depósitos marinos del Cretácico Inferior, mostrando sus efectos los episodios de deformación de esta época.

Por lo tanto, se puede considerar que la deformación compresiva que afecta a las rocas del Cretácico Inferior en la mayor parte de Sonora, presenta un estilo similar de deformación Sevier (González-León *et al.*, 1992).

En la región noreste de Sonora se registra una historia de sedimentación y deformación muy similar a la del sureste de Arizona, con levantamiento de basamento, produciéndose cuencas tectónicas asociadas con un estilo típicamente laramídico, rellenas con los sedimentos del Grupo Cabullona del Cretácico Superior.

De esta manera inicialmente en el Jurásico había un régimen tectónico compresivo asociado a la convergencia de placas, después una tectónica transcurrente; posteriormente depósitos sinorogénicos y actividad magmática calcoalcalina cretácicas y volcánicas terciarios, que indican la presencia de un arco magmático originado por una tectónica de convergencia de placas que persistió hasta al menos el Oligoceno Superior, que es cuando se inicia un régimen tectónico distensivo de horst y graben asociado a la apertura del Golfo de California, y que ha seguido actuando hasta el Reciente.

#### **4.1 Estratigrafía**

El acuífero Río Alisos cuenta con 10 unidades litoestratigráficas que varían en edad del Jurásico Inferior-Medio al reciente, y están representadas por rocas ígneas, volcánicas y sedimentarias.

##### **Proterozoico Medio (pTm(?)D)**

Esta unidad corresponde con cuerpos intrusivos de composición diorítica que afloran como pequeños remanentes fuera de los límites del acuífero, hacia la porción noreste. Están representados por pequeños afloramientos que ocurren de forma dispersa en el noroeste del Estado. La importancia hidrogeológica de estas unidades está a profundidad, ya que funcionan como límites o barreras impermeables.

### **Jurásico Inferior-Medio (JimR-Ar)**

Las rocas del Jurásico Inferior-Medio se encuentran ampliamente distribuidas en las porciones centro y norte del acuífero. Se presentan como afloramientos continuos que constituyen el macizo principal de las sierras paralelas orientadas noroeste-sureste, provocadas por la tectónica distensiva terciaria que produce una alternancia de bloques tipo horst y graben.

Las principales exposiciones se encuentran en las sierras El Pinito, Cíbuta, Las Avispas y Guacomea. Existen afloramientos menos extensos en la sierra San Antonio. Estas rocas han sido asociadas a la actividad de un arco magmático continental desarrollado a lo largo de la margen oeste de Norteamérica, durante el Jurásico Inferior-Medio (Anderson y Silver, 1979; Tosdal et al., 1989).

Esta unidad consiste de derrames y tobas de composición riolítica con intercalaciones de arenisca. La mayor parte de los afloramientos presentan plegamiento provocado por el intenso fallamiento que afecta a esta unidad, originando en ocasiones zonas cizalladas. Presentan alteración hidrotermal como silicificación, oxidación, argilización y sericitización.

### **Jurásico Medio (JmGr)**

Intrusionando a las unidades anteriores se presentan afloramientos de cuerpos plutónicos graníticos, principalmente en el flanco occidental de la sierra Guacomea, en la porción noroeste de la sierra San Antonio (Simons, 1974), y en la región de Nogales. El contacto es cortante y por falla normal con las unidades volcánicas del Jurásico e intrusivas del Proterozoico (?), y cubiertas discordantemente por las unidades volcánicas y sedimentarias más recientes.

El intrusivo granítico presenta una coloración rosa con variaciones a café rojizo y grisáceo, y su textura varía de fanerítica, equigranular de grano medio-grueso, a porfídica. Se constituye de cuarzo, ortoclasa, microclina albita-oligoclasa y minerales de alteración como sericita y hematita. La biotita es escasa o se encuentra ausente en la roca.

Cuando los afloramientos son extensos desarrolla un relieve de topografía baja, presenta un fracturamiento y fallamiento intenso, silicificación y ocasionales vetillas de cuarzo-turmalina.

### **Cretácico Superior (KsVs)**

En el noreste de Sonora la secuencia sedimentaria del Grupo Cabullona fue estudiada primeramente por Taliaferro (1933), quien la divide en cinco formaciones, de la base a la cima: Snake Ridge, Camas Sandstone, Packard Shale, Upper Red Beds y Rhryolite Tuff, con un espesor aproximado de 2500 m, y propone una edad tentativa Cretácico Superior. Posteriormente, González-León (1994) realiza un estudio detallado de las formaciones que constituyen el grupo proponiendo a la formación Conglomerado El Cemento como un equivalente lateral de las formaciones Packard Shale y Lomas Coloradas.

En el área de estudio la secuencia de rocas vulcanosedimentarias asignadas tentativamente al Cretácico Superior afloran en el extremo noroeste, y están constituidas de arenisca, lutita, toba riolítica, limolita, conglomerado y ocasionalmente andesita. Desarrollan un relieve topográfico de lomeríos y cerros de poca elevación.

### **Terciario-Paleoceno (KsTpaGr-Gd)**

Fue Lindgren (1915) el primero en reconocer la transgresión hacia el oriente de los plutones del Cretácico al Paleógeno dentro del oeste de los Estados Unidos. Posteriormente, Anderson y Silver (1974), Coney y Reynolds (1977) extendieron este concepto a Sonora, y reconocen que la transgresión del arco volcánico se extendió 1000 km tierra adentro y regresó a la costa Pacífica durante el Neógeno. Damon et al. (1983) define al Batolito Laramide de Sonora (90-40 Ma) incluyendo los granitos peraluminosos de dos micas que son anatexíticos y post-arco volcánico. Estas rocas representan la continuación hacia el sur del cinturón batolítico del oeste norteamericano.

Las intrusiones batolíticas de composición granítica-granodiorítica se encuentran ampliamente distribuidas en el área de estudio en las sierras El Chivato y San Antonio y en ambos flancos de la sierra El Pinito.

Se encuentran afectando a las unidades pre-terciarias, principalmente a las rocas volcánicas y metamórficas del intervalo Jurásico-Cretácico, y cubiertas discordantemente por las volcánicas y sedimentarias del Terciario y Cuaternario. El batolito presenta variaciones en el color de gris claro-blanquecino a gris-verdoso y rosa, su textura es porfídica y fanerítica de grano medio, y se constituye de feldespato potásico, albita-oligoclasa, cuarzo, biotita, con minerales de alteración como sericita, clorita y hematita.

### **Terciario Mioceno (TmCgpTR-R)**

Diversos autores que han trabajado estas zonas (Till et al., 2007; Mora-Álvarez, 1992; Mora-Álvarez y McDowell, 2004), han definido que las secuencias volcánicas de composición riolítica del Mioceno son una expresión de un cambio de régimen tectónico compresivo (subducción) a un régimen extensivo (Basin and Range). Sin embargo, es un volcanismo con características químicas y mineralógicas que muestran que aún existía influencia de los procesos de subducción. A diferencia de las rocas volcánicas del Oligoceno asociadas a la Sierra Madre Occidental, estas unidades por lo general no muestran algún tipo de alteración ya que no cuentan con cuerpos intrusivos extensos que provoquen este tipo de efectos secundarios en las unidades.

Representa unidades litológicas conformadas por riolitas, ignimbritas y tobas riolíticas que corresponden a eventos volcánicos post-subducción que se asocian a los eventos de transtensión asociados a los cambios de régimen tectónico; estas se caracterizan por intercalaciones de tobas riolíticas y riolitas con ocasionales flujos de lava mayormente de composición dacítica.

### **Terciario-Mioceno (TmCgpAr-B)**

Lucarelli (1969) en el estudio fotogeológico regional de Sonora escala 1:100 000 menciona a las rocas sedimentarias del área de Tubutama como Terciario y Cuaternario indiferenciados.

Posteriormente, Gómez -Caballero et al. (1981) propone informalmente el nombre de formación Tubutama para designar a una secuencia de rocas sedimentarias con horizontes de boratos y volcánicas intercaladas, depositadas en una paleocuenca terciaria continental de origen tectónico, cuya localidad tipo se localiza al norte del poblado de Tubutama, ubicada en los alrededores del rancho La Salada (fuera del área de estudio).

En esta región la secuencia consiste de la base a la cima, de arenisca de grano fino, derrames de basalto, lutita y arenisca con boratos, arenisca de grano grueso y conglomerado. La arenisca es de grano fino, color café-rojizo y presenta estratificación delgada. Está constituida de cuarzo, feldespato y ferromagnesianos en una matriz calcárea con intercalaciones de lutita calcárea. Los derrames de basalto están intercalados en los sedimentos lacustres, localmente presentan estructura almohadillada, de los cuales se obtuvo una edad de 22.3 Ma, K-Ar (Gómez-Caballero et al., 1981).

En la porción centro oriental de Sonora, se le asigna a la Formación Báucarit una edad cuyo límite inferior es de 27 Ma, que corresponde con rocas oligocénicas de la región de Ónavas sobre las cuales descansa discordantemente esta formación. El límite superior indica una edad de 10 Ma obtenida sobre un derrame de andesita-traquiandesita de la Formación Lista Blanca que sobreyace concordantemente a estos conglomerados. McDowell y Roldán-Quintana (1991) sitúan a la Formación Báucarit en el Mioceno Inferior-Medio. Al sur del poblado de Sáric se fechó por el método Ar-Ar un derrame de basalto intercalado en conglomerados de un afloramiento no cartografiado, obteniéndose una edad de  $17.3 \pm 2.8$  Ma (Paz-Moreno, 1992).

### **Cuaternario-Pleistoceno (QptCgp)**

La unidad se encuentra ampliamente distribuida en la parte central del acuífero y está constituida por sedimentos continentales de naturaleza litológica variable, que granulométricamente consisten de grava, arena y limo, que en algunas ocasiones presentan estratificación débilmente marcada.

Estos sedimentos se presentan rellenando valles orientados noroeste-sureste y nortesur, y zonas de piedemonte. Cubren discordantemente a las rocas más antiguas, en algunas localidades el contacto es por falla normal, como se observa en el valle de Cíbuta.

### **Cuaternario-Holoceno (Qhoal)**

Los sedimentos superficiales cuaternarios se encuentran rellenando los cauces de ríos y arroyos principales. Consisten de material suelto constituido de grava, arena, limo y arcilla, como resultado de la erosión de rocas preexistentes. Estos materiales son transportados por las corrientes fluviales y depositados sobre el cauce de los ríos y en las planicies de inundación.

## **4.2 Geología estructural**

Los elementos estructurales más importantes que se presentan son fallas y pliegues, además de un patrón de lineamientos regionales bien marcados con una orientación preferencial noroeste-sureste, que la mayor parte de las veces corresponden a fallas normales de alto ángulo con buzamientos al noreste y suroeste, produciendo sierras paralelas a la orientación de las fallas. Como resultado se presenta un sistema de bloques levantados y hundidos tipo horst y graben, relacionado a la tectónica extensional del Terciario Superior.

Los bloques levantados o pilares tectónicos corresponden a las sierras Guacomea, Cíbuta-Las Avispas-La Esmeralda y El Pinito, constituidas principalmente por rocas volcánicas mesozoicas e intrusivos terciarios, las cuales están separadas por valles alargados rellenos principalmente con sedimentos continentales terciarios y cuaternario. Es en estos bajos estructurales donde generalmente se alojan los acuíferos de tipo granular. El sistema de lineamientos y fallas noreste-suroeste se manifiesta escasamente en esta región.

Los pliegues son comunes en las secuencias mesozoicas siendo notorios los pliegues de arrastre debido al intenso fallamiento en las rocas volcánicas, así como micropliegues y zonas de pliegues en rocas metamórficas.

### 4.3 Geología del subsuelo

Como parte de las actividades contempladas en el estudio realizado en el 2009, se siete sondeos electromagnéticos (TEM's) en la parte central del acuífero donde se localiza la zona de mayor extracción de aguas subterráneas. Mediante ellos, la información de cortes litológicos y de la geología superficial, es posible definir la presencia de un acuífero constituido en su porción superior por depósitos aluviales y en su porción inferior por rocas ígneas extrusivas e intrusivas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las mismas rocas fracturadas constituyen las fronteras y basamento hidrogeológico cuando el fracturamiento desaparece. Con la información de los TEM's se construyó una sección geoelectrónica que fue correlacionada con la información geológica para definir una sección hidroestratigráfica con rumbo general norte-sur, localizada a lo largo de la parte central del acuífero (figura 3).

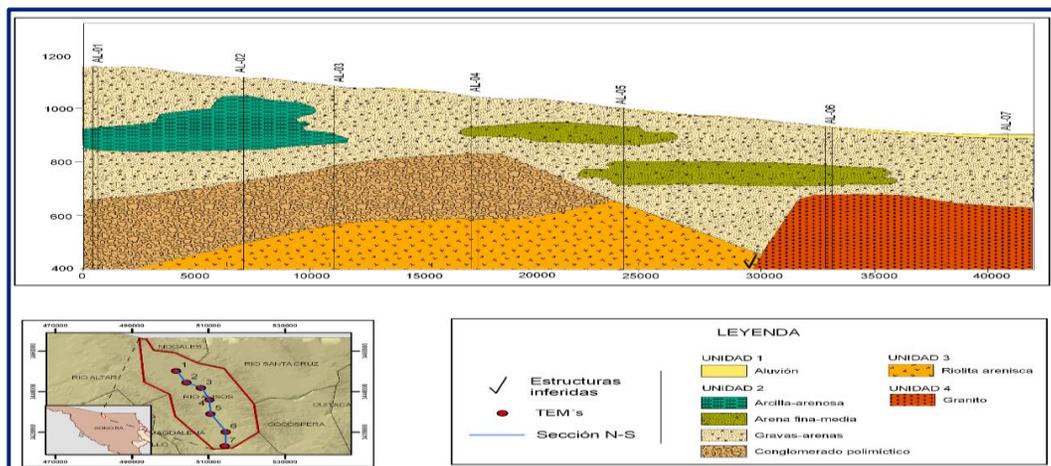


Figura 3. Sección Hidrogeológica esquemática (CONAGUA, 2009)

En ella se identificaron cuatro unidades hidrogeológicas: Aluvión (I) son los depósitos superficiales, de escaso espesor, los cuales se encuentran cubriendo los cauces de los ríos y arroyos; fluvial (II) que comprende depósitos de arenas-arcillas, gravas-arenas y conglomerados, presentando resistividades del orden de 10 a 40 ohm-m; vulcanosedimentaria de ambiente continental (III) tiene resistividades de entre 40 y 90 que se asocia a riolita-arenisca, mientras que en la unidad IV los valores resistivos indican una roca de baja o nula permeabilidad, que se puede correlacionar de acuerdo al contexto a rocas graníticas.

## 5 HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir que el acuífero es de **tipo libre**, formado en su porción superior (unidad I) por una secuencia de depósitos aluviales de alta permeabilidad constituidos de gravas, arenas, limos y arcillas. Debajo de esta secuencia el acuífero está conformado por rocas volcánicas e intrusivas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

### 5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo con los resultados obtenidos en cinco pruebas de bombeo ejecutadas como parte del estudio realizado para la CONAGUA (2009).

Los valores de transmisividad (T) varían de  **$2.12 \times 10^{-2}$  a  $7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$** , en tanto que la conductividad hidráulica (K) oscila entre  **$1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $9.27 \times 10^{-7} \text{ m/s}$** .

Los valores más altos de T y K corresponden a los materiales de acarreo que forman al cauce de los arroyos (tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo (CONAGUA 2009)

CLAVE	NIVEL ESTÁTICO (m)	NIVEL DINÁMICO (m)	ABATIMIENTO (m)	CAUDAL (l/s)	METODO THEIS (ETAPA DE ABATIMIENTO)		METODO THEIS-JACOB (ETAPA DE RECUPERACIÓN)	
					T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	K (m/s)
AL-08	4.54	6.69	2.13	37.81	2.12E-02	8.35E-04	3.03E-02	1.20E-03
AL-09	42.39	46.68	4.29	1.73	2.17E-04	6.85E-06	2.13E-04	6.77E-06
ALS-21	5.21	5.81	0.6	3.5	2.48E-03	6.25E-05	2.45E-03	6.18E-05
ALS-47	29.82	63.31	32.1	7	5.72E-05	9.27E-07	7.85E-05	1.27E-06
ALS-53	5.09	13.21	7.58	20	1.73E-03	2.02E-05	1.75E-03	2.03E-05

T= Transmisividad      K = Conductividad hidráulica

Debido a la falta de pozos de observación durante la realización de las pruebas de bombeo, no fue posible determinar el coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico del acuífero.

### 5.3 Piezometría

Se cuenta con información piezométrica en forma dispersa para los años 2005 y 2009. La que corresponde al 2009 es la que presenta mayor cobertura espacial y fue la que se utilizó para describir el comportamiento hidráulico.

### 5.4 Comportamiento hidráulico

#### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático, las mayores profundidades se ubican en la porción norte, variando de 82 m a 67 m (figura 4).

La primera se ubica a 17.5 km al noroeste del poblado de Cíbuta, en el rancho “El Bellotoso”, y la segunda en el pozo que se encuentra dentro del aeropuerto internacional de la ciudad de Nogales.

En el resto del acuífero las profundidades varían de 5 m a 50 m (figura 5), predominando valores menores a 10 m. A lo largo del cauce del río Alisos la profundidad es menor a 10 m.

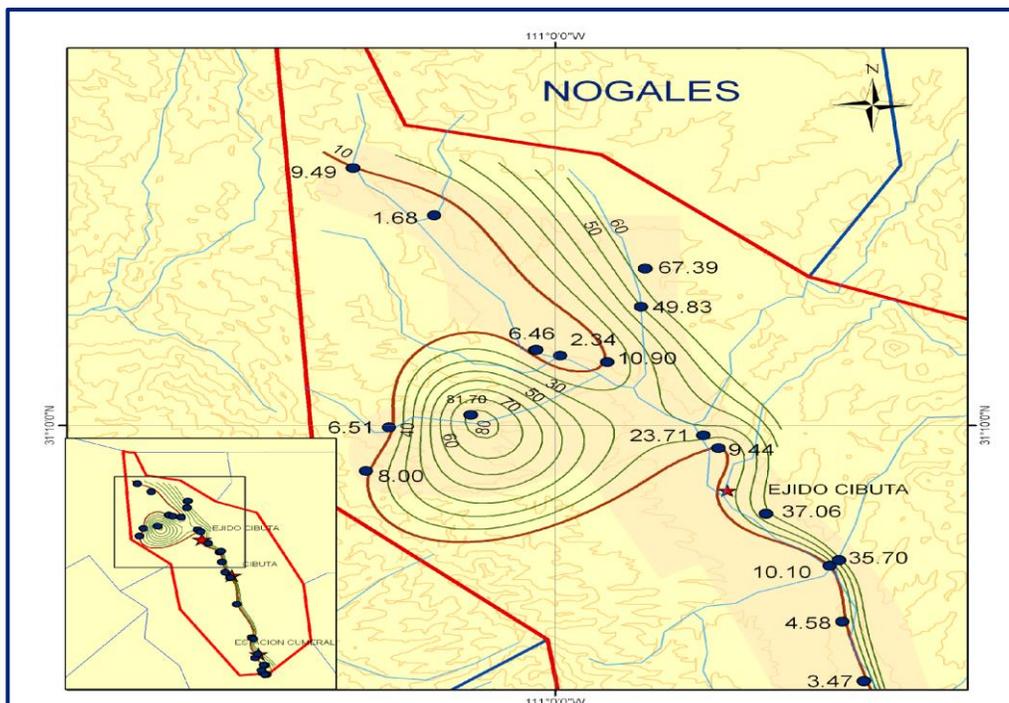


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2009), porción Norte

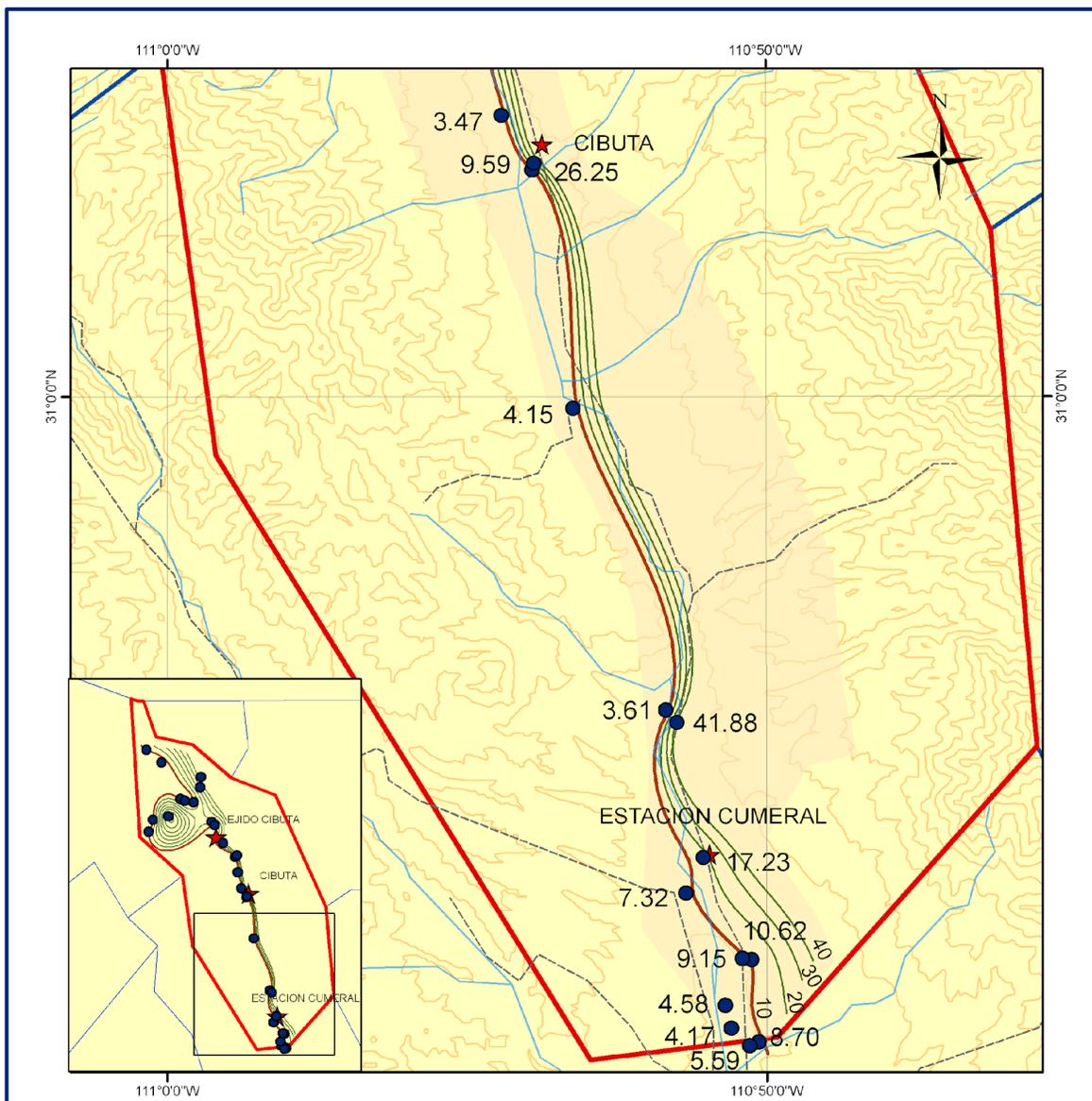


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2009), porción Sur

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2009 (figura 6), se observa que sus valores muestran claramente el reflejo de la topografía, evidenciando de esta manera que el flujo subterráneo tiene una dirección preferencial de las sierras hacia valle, y a partir de ahí es paralela al cauce del río, el cual viaja con dirección NW-SE, cambiando gradualmente hasta casi N-S, mostrando que no se han producido alteraciones de las condiciones naturales. La mayor elevación del nivel estático es de 1372 msnm, registrada en el norte del acuífero, y la menor en el extremo sur del acuífero, con de 868 msnm.

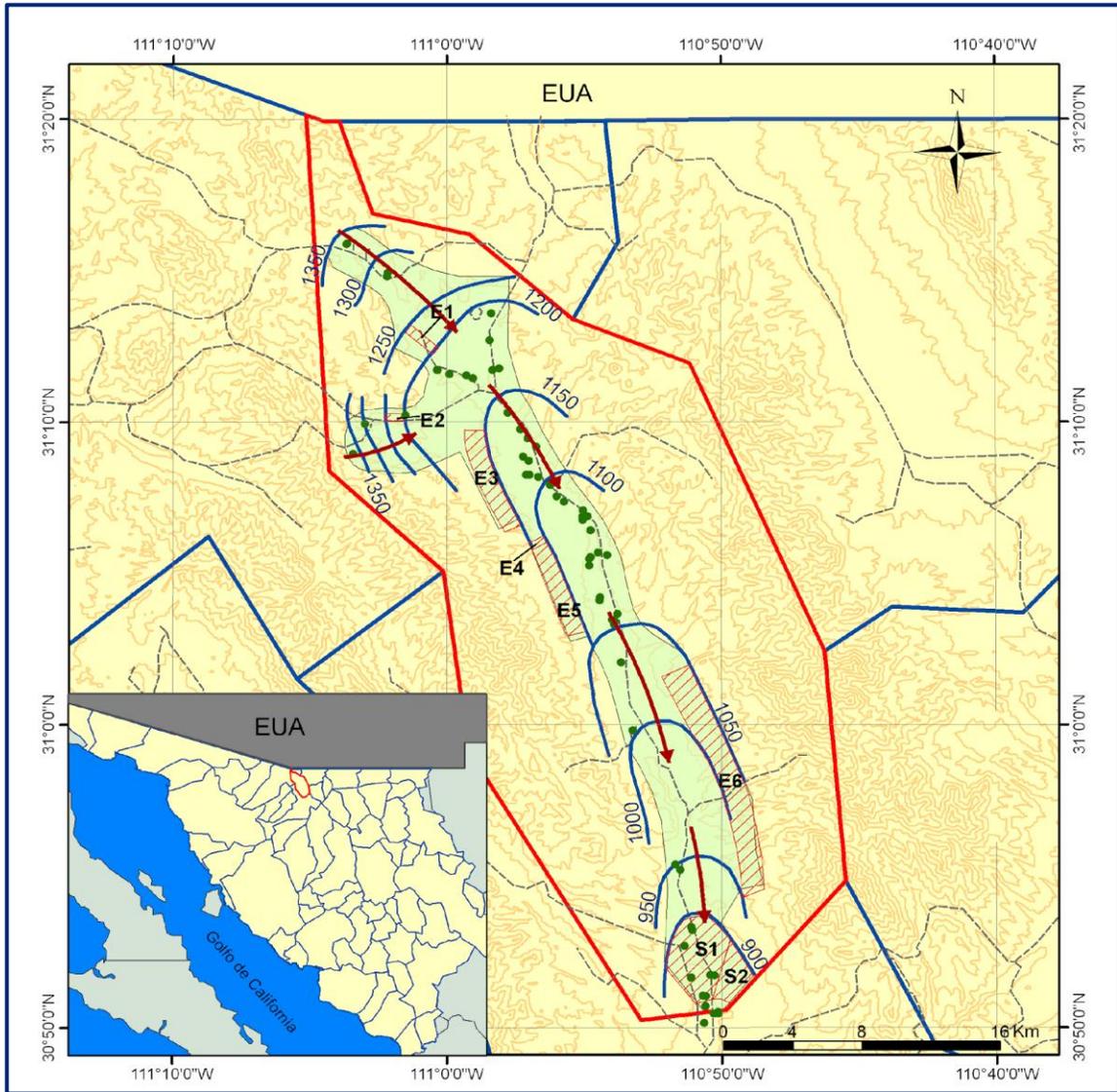


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

Los abatimientos se presentan en la porción norte del acuífero y las recuperaciones en la parte sur. Para este periodo el máximo abatimiento anual es de 0.9 m y la máxima recuperación de 1.0 m.

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Respecto a la evolución del nivel estático, existe información dispersa para los años 2005 y 2009, de manera que sólo fue posible obtener la variación de los niveles estáticos en nueve aprovechamientos, de los cuales seis presentan abatimientos que varían de -1.4 a -3.5 m y los tres restantes presentan recuperaciones hasta de 4 m (figura 7).

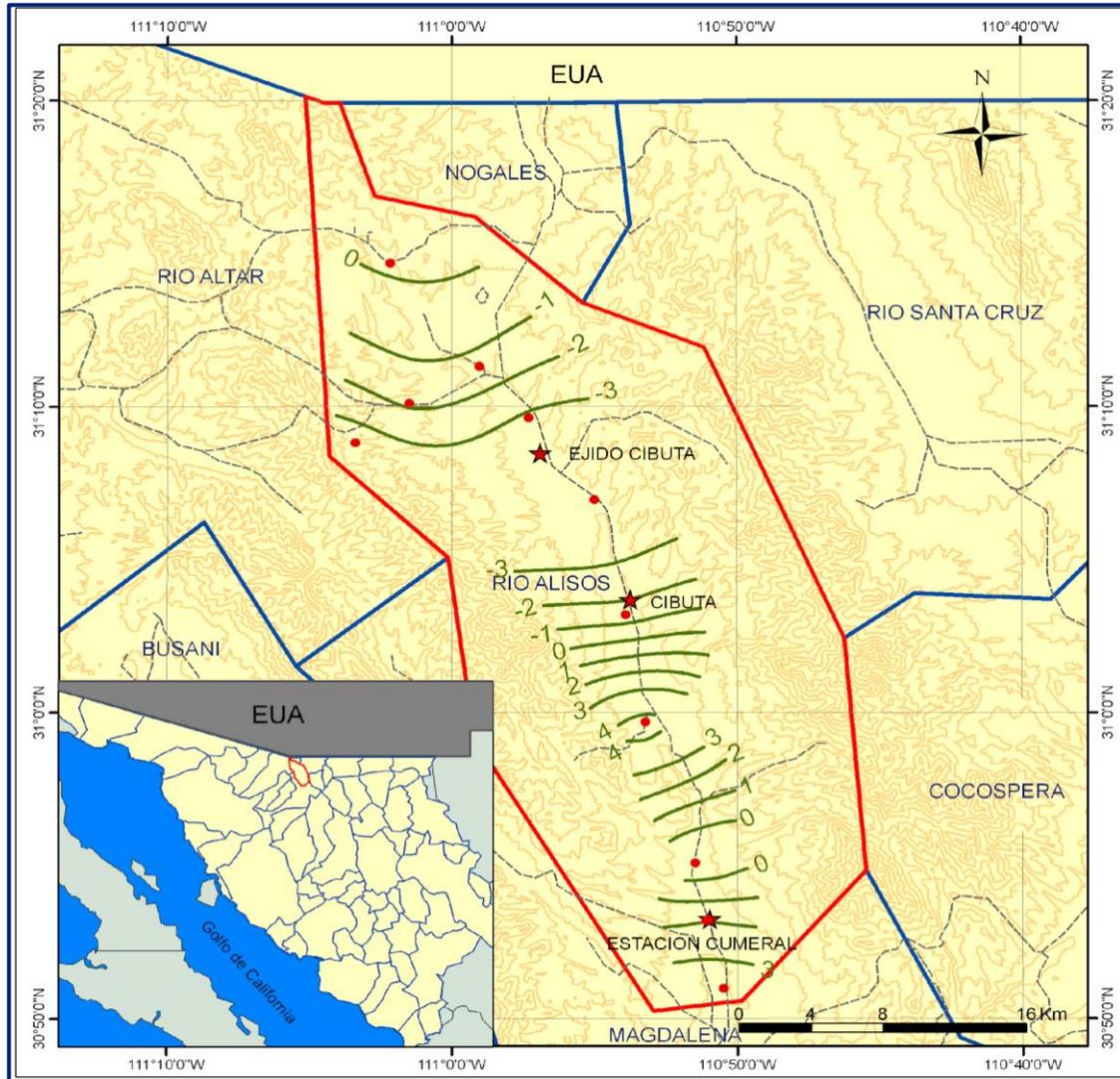


Figura 7. Evolución anual del nivel estático en (2005-2009)

### 5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2009, se tomaron muestras de agua en 15 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayores, temperatura, conductividad eléctrica, pH, nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 65 a 372 mg/l. De acuerdo a los valores de conductividad eléctrica.

El agua se clasifica como dulce, considerando el criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 121 a 448  $\mu$ S/cm (figura 8).

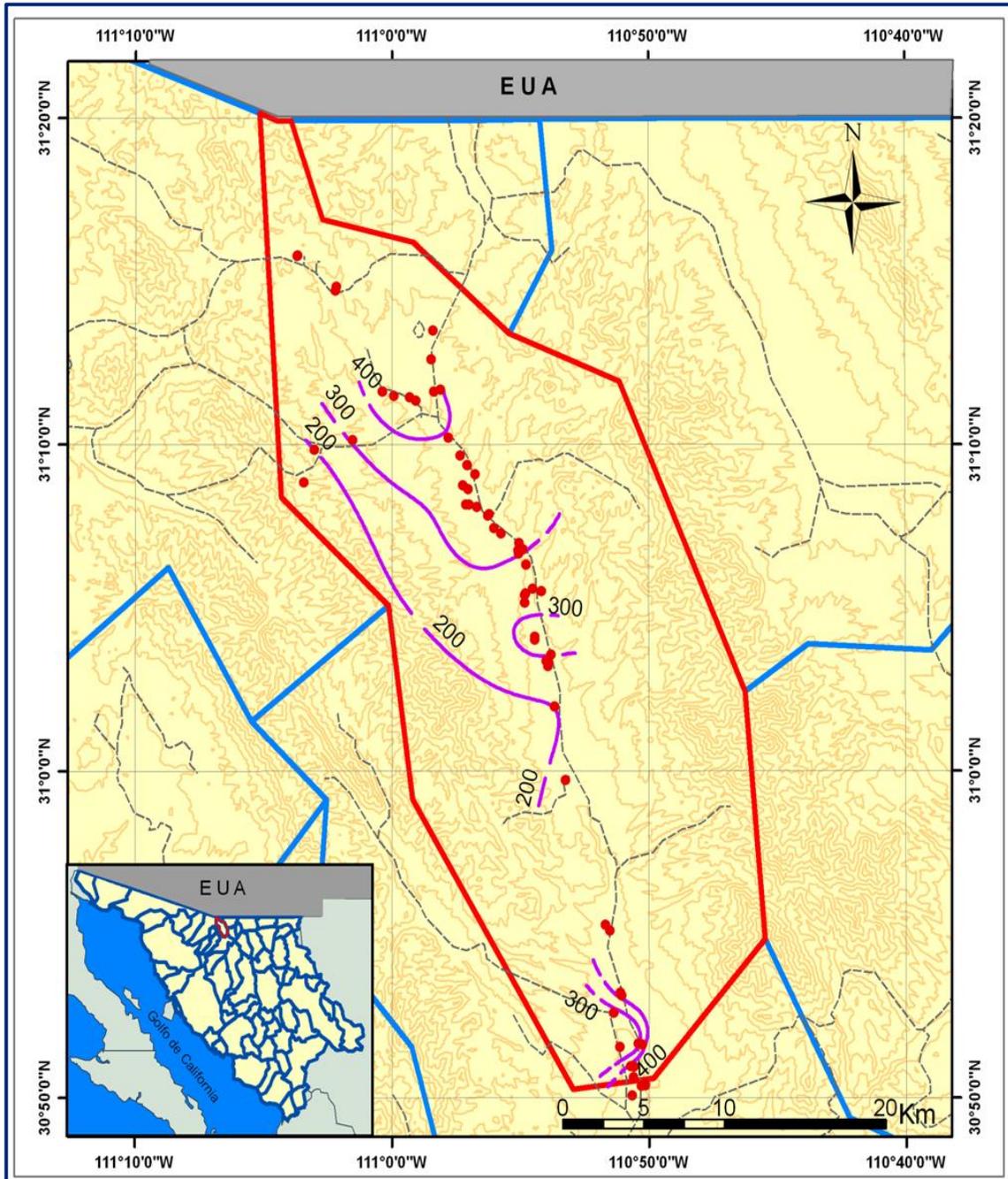


Figura 8. Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}$ ), (CONAGUA, 2009)

La representación gráfica de los resultados de los análisis fisicoquímicos (diagramas de Piper y Stiff) indica que la familia de agua que predomina es la Bicarbonatada Cálctica, que representa agua de reciente infiltración. La muestra obtenida del aprovechamiento ALS-05 es la única que se clasifica dentro de las aguas Bicarbonatadas Sódicas, con una ligera evolución que se manifiesta en la predominancia del catión Na sobre el Ca (figura 9).

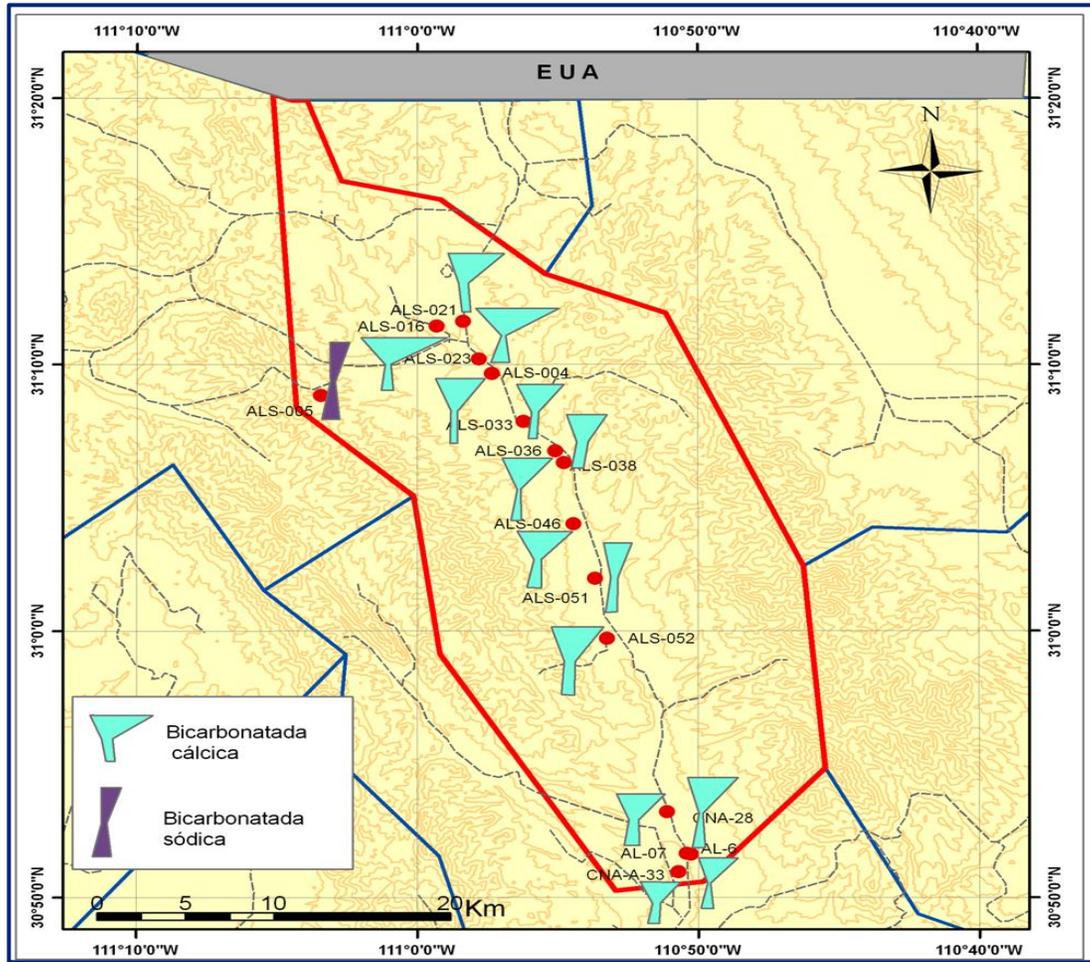


Figura 9. Diagramas de Stiff

## 6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2009, se visitaron en el acuífero un total de 102 aprovechamientos de aguas subterráneas, todas ellos activos.

El volumen de extracción calculado es de **9.5 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 4.6 hm<sup>3</sup> (48.4 %) se destinan al uso público-urbano, 4.6 hm<sup>3</sup> (48.4 %) al uso agrícola, 0.1 hm<sup>3</sup> (1.1 %) para los usos pecuario y doméstico, y los 0.2 hm<sup>3</sup> (2.1 %) restantes para satisfacer las necesidades de los usos industrial, servicios y múltiple.

## 7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

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

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

El balance se definió para el año 2009 en una superficie de 248 km<sup>2</sup>, 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:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Rr:** Recarga Incidental por excedentes de riego
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento

## **7.1 Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (Rt) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos del arroyo principal, 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 representan la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes solo se considera la recarga por retornos agrícolas (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 (1) definida anteriormente.

De esta manera, despejando la recarga vertical se obtiene:

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

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado.

La ley de Darcy, se expresa mediante la siguiente ecuación:

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

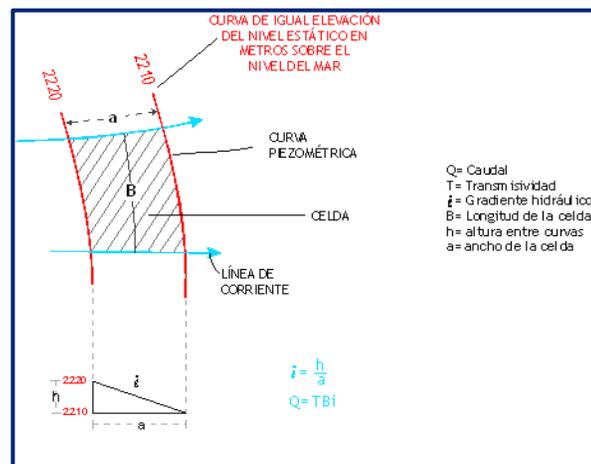
Donde:

**Q**= Gasto;

**T**= Transmisividad;

**B**= Longitud de la celda;

**i**= Gradiente hidráulico;



Los valores de conductividad hidráulica (K) utilizados corresponden al promedio obtenido en las pruebas de bombeo realizadas en el estudio de 2009 para abatimiento y recuperación. En el caso de las celdas ubicadas en la unidad aluvial, se asignó el valor de  $K = 3.67 \times 10^{-4}$  m/s, que corresponde al valor promedio de las pruebas AL-08, ALS-21 y ALS-05, que se ubican en esta unidad.

Para el caso de las celdas que se encuentran en los depósitos fluviales, se utilizó el valor de  $3.96 \times 10^{-6}$  m/s, correspondiente al promedio de las pruebas ejecutadas en las zonas fluviales.

De acuerdo a la figura 3, se estimó un espesor saturado de 10 m para las celdas ubicadas en la unidad aluvial y de 100 m para las zonas fluviales.

De acuerdo a las celdas definidas con base en la configuración del nivel estático para el año 2009 y las unidades geológicas presentes, se obtiene el cálculo del flujo en las celdas de entradas, que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de entradas por flujo subterráneo

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	b (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i (m)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	147	2130	10	20	0.0094	3.67E-04	3.67E-03	0.0051	0.2
E2	124	1152	10	20	0.0174	3.67E-04	3.67E-03	0.0079	0.2
E3	6356	1170	90	25	0.0214	3.95E-06	3.56E-04	0.0483	1.5
E4	254	980	10	20	0.0204	3.67E-04	3.67E-03	0.019	0.6
E5	5604	1120	90	50	0.0446	3.95E-06	3.56E-04	0.0889	2.8
E6	14298	1430	90	50	0.035	3.95E-06	3.56E-04	0.1777	5.6
<b>TOTAL ENTRADAS =</b>									<b>10.9</b>

El volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **10.9 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 7.1.3 Retornos de riego (Rr)

En el acuífero Río Alisos, existe una zona agrícola cuya superficie aproximada es de 412 ha. Los cultivos principales son hortalizas (80 %) y forraje (20 %).

El uso consuntivo promedio ( $\overline{UC}$ ) se calculó como:

$$\overline{UC} = \frac{\sum_1^5 A_i UC_i}{\sum_1^5 A_i}$$

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  $i = 1, 2, 3$  para la alfalfa, forraje y maíz, respectivamente, se tiene:

$$\overline{UC} = \frac{(329.6 \text{ ha} \times 900 \text{ mm}) + (82.4 \text{ ha} \times 1250 \text{ mm})}{412 \text{ ha}} = 970 \text{ mm}$$

Por el método de balance hídrico, la 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 (3'000,000 m<sup>3</sup>/año) y la superficie regada (412 ha), arrojando un valor de 728 mm. La lámina de precipitación en el acuífero es de 509.5 mm.

De esta manera se obtiene lo siguiente:

$$Rr = 509.5 + 728 - 970 = 267.5 \text{ mm}$$

Multiplicada por el área total de riego, la recarga total por riego es de **Rr = 1.1 hm<sup>3</sup>/año**.

## **7.2 Salidas**

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por salidas subterráneas hacia otros acuíferos (Sh) y por evapotranspiración (ETR).

No existen manantiales ni descarga de flujo base.

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

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **9.5 hm<sup>3</sup>/año**.

### **7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)**

El cálculo de las salidas subterráneas se realizó de la misma manera que las entradas subterráneas, utilizando el plano de elevación del nivel estático (figura 6) y aplicando la Ley de Darcy para las celdas de flujo identificadas.

El espesor saturado (b) fue estimado de acuerdo a la información de las secciones hidroestratigráficas en 200 m, el detalle del cálculo se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo subterráneo

CANAL	ANCHO B (m)	LONGITUD L (m)	b (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i (m)	K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
S1	2180	2773	180	50	0.018	3.95E-06	7.11E-04	0.0279	0.9
S2	1131	4951	180	50	0.0101	3.95E-06	7.11E-04	0.0081	0.3
<b>TOTAL SALIDAS =</b>									<b>1.2</b>

El volumen total de salidas por flujo subterráneo asciende a **1.2 hm<sup>3</sup>/año**.

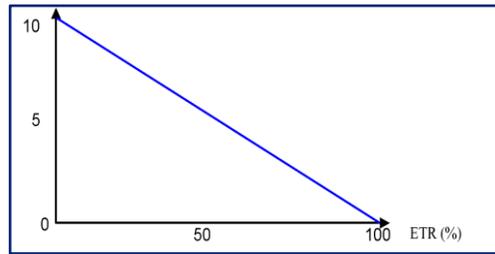
### 7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro equivale a 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). Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

T (°C) =	18.3				
P(mm) =	509.5	P <sup>2</sup> =	259590.25	ETR (mm) =	421.7
L =	1063.92435	L <sup>2</sup> =	1131935.02	ETR (m) =	0.4217

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



A lo largo del cauce del Río Alisos, el nivel estático se encuentra a una profundidad media de 4 m y se tiene la presencia de vegetación nativa. La evapotranspiración en las zonas con niveles someros, se calcula como una fracción de la lámina de evapotranspiración estimada para el acuífero. El detalle del cálculo se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de Evapotranspiración

Intervalo curvas (m)	Profundidad Considerada (m)	Área (km <sup>2</sup> )	%	ETR (m)	Vol ETR (hm <sup>3</sup> /año)
1 a 2	1.5	0.5	0.85	0.4217	0.2
2 a 3	2.5	1.6	0.75	0.4217	0.5
3 a 4	3.5	5.5	0.65	0.4217	1.5
4 a 5	4.5	7.1	0.55	0.4217	1.6
5 a 6	5.5	7	0.45	0.4217	1.3
6 a 7	6.5	5	0.35	0.4217	0.7
7 a 8	7.5	4.9	0.25	0.4217	0.5
<b>TOTAL</b>					<b>6.3</b>

El volumen que pierde el acuífero por evapotranspiración asciende a **6.3 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 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 (figura 7) y del coeficiente de almacenamiento, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

**$\Delta VS$ :** Cambio de almacenamiento en el período analizado

**S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

**A:** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)

**h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Para este caso, dado que el depósito aluvial está constituido por gravas y arenas, puede considerarse un valor de  $S=0.1$  (CONAGUA 1994). El detalle del cálculo del volumen de cambio de almacenamiento, se muestra en la tabla 6.

El volumen que ha perdido el acuífero en el periodo 2005 – 2009 es de  $- 2.8 \text{ hm}^3$ .

Dado a que el almacenamiento en el acuífero es altamente sensible a la recarga local por precipitación, es posible que la evolución esté condicionada al mes en que se realizaron las mediciones en ambos periodos.

Tabla 6. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2005-2009)

Evolución (m)	Área (km <sup>2</sup> )	S	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
-3	8.7	0.1	-2.6
-2.5	4.8	0.1	-1.2
-1.5	5.6	0.1	-0.8
-0.5	3.8	0.1	-0.2
0.5	3.6	0.1	0.2
1.5	2.7	0.1	0.4
2.5	1.7	0.1	0.4
3.5	2.7	0.1	0.9
4	1	0.1	0.4
<b>TOTAL</b>			<b>-2.5</b>
<b>Volumen anual =</b>			<b>-0.6</b>

El cambio neto de almacenamiento es de  **$\Delta VS = - 0.6 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

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

$$\begin{aligned}
 R_v &= B + Sh + ETR - Eh - Ri \pm \Delta V(S) \quad (2) \\
 R_v &= 9.5 + 1.2 + 6.3 - 10.9 - 1.1 - 0.6 \\
 R_v &= 4.4 \text{ hm}^3/\text{año}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 R_t &= R_v + Eh + Ri \\
 R_t &= 4.4 + 10.9 + 1.1 \\
 R_t &= 16.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

## 8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

**DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

**R** = Recarga total media anual

**DNC** = Descarga natural comprometida

**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### 8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **16.4 hm<sup>3</sup>/año**, todos ellos son de recarga natural.

### 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que 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, su valor es de **1.2 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPD), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **10,945,569 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

#### **8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)**

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 16.4 - 1.2 - 10.945569 \\ \text{DMA} &= 4.254431 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,254,431 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9 BIBLIOGRAFIA**