

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Los Vidrios (2602),
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							
2602	LOS VIDRIOS	6.7	2.0	3.694147	0.0	1.005854	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 2602 LOS VIDRIOS, ESTADO DE SONORA***

México, D.F. Enero 2010

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	3
	Antecedentes.....	3
1.1.	Localización	3
1.2.	Situación administrativa del acuífero.....	5
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3.	FISIOGRAFÍA	6
3.1.	Provincias fisiográficas	6
3.2.	Clima.....	7
3.3.	Hidrografía	7
3.4.	Geomorfología	7
4.	GEOLOGÍA.....	8
4.1.	Estratigrafía.....	10
4.2.	Geología estructural	15
4.3.	Geología del subsuelo	16
5.	HIDROGEOLOGÍA	17
5.1.	Tipo de acuífero	17
5.2.	Parámetros hidráulicos	17
5.3.	Piezometría.....	18
5.4.	Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1.	Profundidad al nivel estático.....	18
5.4.2.	Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3.	Evolución del nivel estático.....	18
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	19
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	21
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	22
7.1.	Entradas.....	22
7.1.1.	Recarga vertical (Rv)	23
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	25
7.2.	Salidas	26
7.2.1.	Bombeo (B).....	26
7.2.2.	Evapotranspiración (ETR)	26
7.2.3.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	27
7.3.	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	27
8.	DISPONIBILIDAD	28
8.1.	Recarga total media anual (Rt).....	28
8.2.	Descarga natural comprometida (DNCOM)	28
8.3.	Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	29
8.4.	Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS).....	29
9.	BIBLIOGRAFIA.....	30

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 Los Vidrios, definido con la clave 2602 del sistema de información geográfica para el manejo de aguas subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza al noroeste del estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 113° 22' 46.4" y 114° 25' 13.7" de longitud oeste, y 31° 30' y 32° 21' 8.0" de latitud norte cubriendo una superficie de 5,668 km².

Colinda al norte con Estados Unidos de América, al sur con el Golfo de California, al este con el acuífero Sonoyta – Puerto Peñasco y al oeste con el acuífero Valle de San Luis Río Colorado, todos ellos pertenecientes al estado de Sonora (figura 1).

Geopolíticamente comprende parte de los municipios de San Luis Río Colorado, Puerto Peñasco y General Plutarco Elías Calles (Sonoyta).

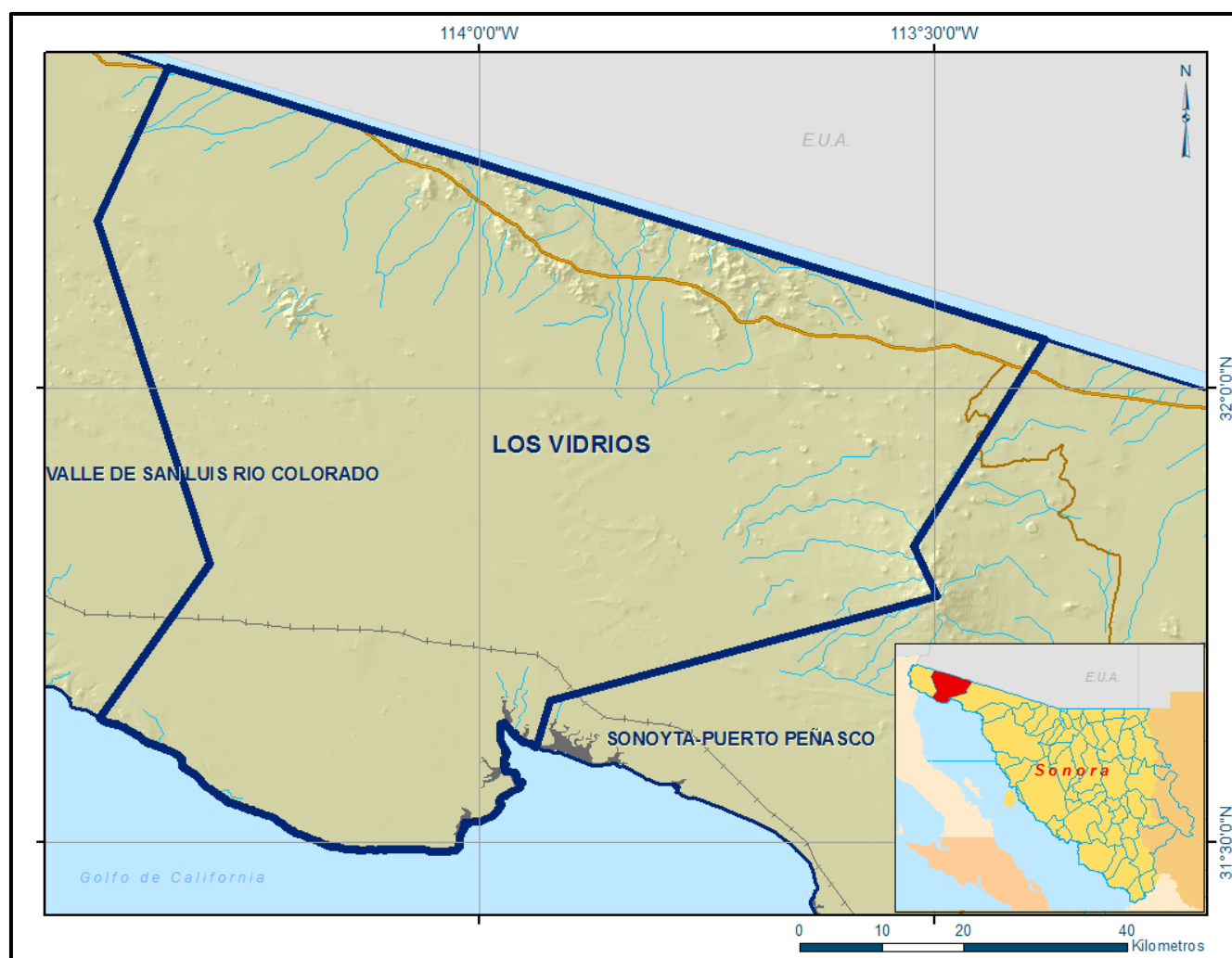


Figura 1. Localización del acuífero

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 2602 LOS VIDRIOS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	114	20	35.0	32	21	8.0	del 1 al 2 por el límite internacional
2	113	22	46.4	32	3	12.7	
3	113	31	23.8	31	49	34.9	
4	113	29	51.3	31	46	16.8	
5	113	55	23.0	31	39	20.8	
6	113	56	15.6	31	36	18.5	del 6 al 7 por la línea de bajamar a lo largo de la costa
7	114	25	6.2	31	38	12.8	
8	114	17	49.4	31	48	22.8	
9	114	25	13.7	32	10	58.7	
1	114	20	35.0	32	21	8.0	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Los Vidrios pertenece al Organismo de Cuenca “Noroeste”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. En la mayor parte del territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se amplía, la zona vedada para el alumbramiento de aguas del subsuelo a que se refiere el Decreto de 16 de noviembre de 1955, a toda el área y extensión geopolítica del Municipio de San Luis Río Colorado, Sonora”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 22 de marzo de 1969. Este decreto es de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La porción oriental del acuífero se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de septiembre de 1978. Este decreto es de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2010), los municipios de San Luis Río Colorado, Puerto Peñasco y Plutarco Elías Calles se localizan en la zona de disponibilidad 4. El usuario principal del agua es el sector pecuario. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguno, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el comité técnico de aguas subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo diversos estudios geohidrológicos de evaluación. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

INFORME DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE LOS VIDRIOS – SAN LUIS RÍO COLORADO EN EL ESTADO DE SONORA, elaborado por la empresa **Geoexploraciones y Construcciones, S. A.**, para la **Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos**, en **1981**. El objetivo del estudio fue conocer el marco geohidrológico del agua subterránea para definir el modelo conceptual del funcionamiento del sistema acuífero, incluyendo una descripción general de la calidad del agua subterránea así como su disponibilidad. El estudio incluyó censo y piezometría, muestreo y ejecución de 40 sondeos de resistividad. La información obtenida de las 12 obras hidráulicas existentes fue muy escasa, pues solo se pudo obtener la profundidad al nivel estático en tres de ellas, dado que la mayoría se encontraban inactivas. A pesar que su objetivo fue la cuantificación del volumen de agua subterránea para extracción, este no fue determinado probablemente debido a la poca información piezométrica.

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA EL ESTADO DE SONORA Y DISEÑO DE UNA RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO, elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en 2005. El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la Gerencia Regional Noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. A parte de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de configuración del nivel estático. Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos, aunque en el acuífero Los Vidrios no se pudo medir la profundidad al nivel estático a ningún aprovechamiento.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LOS VIDRIOS, RÍO ALISOS, ARROYO SAHUARO, SAHUARAL Y CUITACA, elaborado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS), para la Comisión Nacional del Agua, en 2009. El estudio incluyó actividades de campo que incluyeron el 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.

La información geofísica e hidráulica del primer estudio, así como la información general, climatológica, piezométrica e hidrogeoquímica del último, constituyen la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se mencionan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el área de estudio se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Llanura Sonorense, dentro de las subprovincias Desierto de Altar, Sierras y Llanuras Sonorenses y Sierra del Pinacate (Álvarez Jr., 1961). La primera se manifiesta en la mayor parte del acuífero, pues abarca el 74% de su área; la segunda se encuentra en la parte norte, sobre la línea fronteriza, cubriendo el 15% del acuífero, en tanto que la Sierra del Pinacate se ubica en la parte este, abarcando el área restante.

Las formas fisiográficas que predominan en el acuífero son: Campo de dunas, Meseta basáltica con cráteres, Gran bajada con lomerío y Campo de dunas con lomerío ocupando el 61%, 9%, 8% y 8% del área total del acuífero, respectivamente. La primera cubre la parte central del acuífero y se extiende principalmente hacia el noreste, sureste y suroeste. La meseta basáltica se manifiesta rodeando a la Sierra El Pinacate, la Gran Bajada con Lomerío hacia el norte, sobre la línea fronteriza; y el campo de dunas con lomerío en la porción oeste. Otras formas fisiográficas de menor extensión son: Llanura costera salina con ciénegas (4%), Sierra escarpada del noroeste (3%), Sierra escarpada

con llanuras (2%), Sierra escarpada volcánica el Pinacate (2%) y Lomerío con cañadas (1%), Sierra escarpada (1%) y Meseta basáltica (1%).

3.2. Clima

El clima que prevalece en la región según la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García (1964), es el BWhw(x'), que corresponde a un clima muy seco con lluvias en verano, semi-cálido con un invierno fresco y presencia de lluvia invernal; es decir, la que ocurre en los primeros meses del año y supera los 10.2 mm. Con base en el análisis climatológico se obtuvo una lámina de precipitación media anual de 68.2 mm para la superficie que cubre el acuífero.

El acuífero no cuenta con estaciones climatológicas, por lo que para el análisis se consideró la información de las tres estaciones climatológicas más cercanas, todas ellas administradas por la Comisión Nacional del Agua: San Luis Río Colorado, Sonoyta y Puerto Peñasco.

La temperatura media anual es mayor a los 18 °C, la temperatura media máxima se registra en los meses de julio y agosto, con 10.7 °C y 10.8 °C, respectivamente, mientras que las temperaturas medias mínimas se presentan en los meses de diciembre y enero, con 4.4 °C y 4.5 °C. El valor de la temperatura promedio anual es de 22.4 °C. La evaporación potencial media anual en el acuífero de acuerdo a los polígonos de Thiessen es de 2,337 mm.

3.3. Hidrografía

Hidrológicamente el acuífero Arroyo Sahuaro se encuentra casi en su totalidad dentro de la región hidrológica RH-8 "Sonora Norte", dentro de la cuenca del Río Sonoyta (C), subcuenca Desierto de Altar (c). Una pequeña porción de la porción noreste del acuífero, en la línea fronteriza, se encuentra dentro de la región hidrológica RH-7 "Río Colorado", cuenca Ríos Gila y San Pedro (C), subcuenca Cabeza Prieta (a). En el acuífero prevalecen condiciones extremas de aridez con grandes extensiones cubiertas de dunas, donde los cauces de las corrientes no están bien definidos y sus escurrimientos superficiales son prácticamente nulos. Al presentarse las escasas precipitaciones pluviales, el agua escurre hacia las partes bajas formando diferentes cauces e infiltrándose en las arenas del desierto, por lo que el agua llega excepcionalmente al Golfo de California en volúmenes muy reducidos.

3.4. Geomorfología

De acuerdo a la carta de unidades Geomorfológicas de México (Lugo, 1990), el área de estudio se caracteriza por presentar cuatro geoformas: ladera montañosa, lomeríos, pie de monte y planicies, las cuales están clasificadas con base en su forma, altura, pendiente, litología y edad. Las planicies predominan en un 85% de la superficie del acuífero de manera que su topografía es suave, con

pendiente general uniforme hacia el suroeste, seguidas de los lomeríos con un 12%. Las principales formaciones montañosas dentro de la cuenca tienen altitudes comprendidas entre 150 y 1,150 m. Las pendientes fuertes se presentan en la cercanía de los afloramientos de rocas volcánicas, en la zona volcánica “El Pinacate”.

4. GEOLOGÍA

Las características geológicas y estructurales presentes en el noroeste de Sonora, particularmente en la región del Desierto de Altar, determinan una evolución tectónica que está dada por un conjunto de eventos magmático-estructurales que han operado continuamente desde el Jurásico Tardío hasta el reciente (Staude y Barton 2001), que dejan clara una serie de eventos sobrepuestos cuya resultante principal es una fuerte dispersión de afloramientos orientados NW-SE que dan lugar a la morfología típica de la Provincia Fisiográfica Llanuras Sonorenses y de la Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses y de las Subprovincia del Desierto de Altar.

El orden de ocurrencia de estos eventos, así como su continua y subsecuente sobreposición, no permiten definir con claridad la tectónica anterior al Cretácico. Sin embargo, muchos autores han logrado poner en evidencia la ocurrencia de dos grandes bloques Proterozoicos yuxtapuestos durante el Jurásico mediante un sistema de estructuras corticales de movimientos transpresivos sinestrales de grandes desplazamientos laterales conocido como *Megacizalla Mojave-Sonora* (Anderson & Silver, 2005, y referencias incluidas), cuya influencia estructural muestra una traza continua desde Sonora central hasta el Oeste de Arizona. Posiblemente estos desplazamientos corticales dan origen a la configuración actual dispersa del basamento Proterozoico, registrado en diversas partes del estado mediante cuerpos ígneo-metamórficos segmentados (zócalo estructural) y secuencias sedimentarias marinas detrítico-carbonatadas (cobertura estructural), también del Proterozoico (Rodríguez-Castañeda, 1984; Longoria & Pérez, 1978).

Así, la reciente controversia generada por tratar de demostrar la existencia de la *Megacizalla Mojave-Sonora* (Silver & Anderson, 1974; Anderson & Silver, 2005, y referencias incluidas) ha llevado a la producción de una gran cantidad de trabajos descriptivos y geocronológicos que a su vez conducen a la comprobación de dos basamentos estructuralmente yuxtapuestos: el Complejo Metamórfico del este que corresponde al bloque Norteamérica, y El Complejo Metamórfico del oeste que corresponde con el bloque Caborca (Anderson & Silver, 1979). Ambos son gneises metaplutónicos Paleoproterozoicos que ocurren con gneises de grano fino y presentan grados metamórficos de facies anfíbolita, sin embargo, sus protolitos y edades de metamorfismo son distintos (Nourse *et al.*, 2005). El límite entre ambos basamentos está trazado por la Sierra El Águila, ubicada a 10 km al noroeste del Campo Volcánico El Pinacate. Esta estructura regional es de gran importancia, ya que modifica la composición y estructura del basamento y puede dar lugar a fuertes heterogeneidades que afecten el comportamiento del acuífero con la presencia de parteaguas subterráneos, heterogeneidades estructurales y/o con la presencia de variaciones litológicas.

Por otro lado, está bien documentado también que durante el Cretácico Superior, aproximadamente a partir de los 90 Ma, inició un largo período de subducción de la Placa Farallón (ahora extinta) bajo la Placa Norteamérica (Nakanishi y Winterer, 1998). En este proceso la Placa Farallón, la cual consistía de una corteza oceánica que incluía fragmentos de corteza continental (posiblemente arcos de islas) que fueron intermitentemente acrecionados a la Placa Norteamérica, ocasionó la activación de un fuerte magmatismo y deformación continental mediante sistemas estructurales compresivos y generación de grandes fallas inversas de bajo ángulo (cabalgaduras) en la corteza superior (Stern, 2004).

A este episodio orogénico se conoce con el nombre de Orogenia Laramídica y se extiende a lo largo del margen Pacífico de Norteamérica sobreponiéndose a los eventos tectónicos anteriores y afectando a todas las secuencias Cretácicas y pre-Cretácicas, de tal forma que el registro litológico queda seriamente afectado con plegamiento, segmentación estructural, metamorfismo y deformación frágil y dúctil. Este evento está muy poco registrado dentro del área del acuífero Los Vidrios, ya que no ocurren secuencias volcanosedimentarias de gran espesor ni cuerpos plutónicos de composición granítica típicos de este evento, sin embargo, es posible encontrar algunas masas ígneas cortando las unidades del Proterozoico.

Hacia el final de este período de subducción, durante el Eoceno-Oligoceno, se emplazan enormes cantidades de riolitas e ignimbritas que edifican la Sierra Madre Occidental (SMO; McDowell & Clabaugh, 1979), magmatismo que ha sido generalmente asociado al cese de la subducción. Es posible que la mayoría de los yacimientos magmático-hidrotermales del Estado de Sonora, estén relacionados al magmatismo Paleoceno-Eoceno asociado a este volcanismo (Staude & Barton, 2001). Aunque es un evento tectonomagmático de gran repercusión en la evolución tectónica del noroeste de México, sus límites geográficos le restringen a la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, y no se conocen afloramientos de este evento dentro del área que abarca el acuífero Los Vidrios.

Una vez concluido el proceso de subducción, inicia un relajamiento cortical asociado a la pérdida de energía acumulada durante la subducción (Peccerillo, 2005) que dio origen a la provincia extensional del *Basin and Range* durante el Mioceno aproximadamente entre los 25 y los 12 Ma (McDowell & Roldán-Quintana, 1991; Bartolini *et al.*, 1992; Gans, 1997). Así, los bajos estructurales (*graben*) son cuencas alargadas NW-SE que son rellenadas por molasas continentales producto de la erosión de los altos estructurales (*horst*). Esta unidad sedimentaria sintectónica típicamente está representada por conglomerados polimícticos (ocasionalmente oligomícticos) generalmente consolidados y cementados con material autigénico carbonatado y zeolitas que son el producto de la degradación directa de los epiclastos vítreos del volcanismo riolítico de la Sierra Madre Occidental (Cochemé *et al.*, 1988). Esta secuencia sedimentaria se deposita contemporáneamente con un volcanismo basáltico cuyo emplazamiento se propicia gracias a la presencia de las fallas profundas con ángulos obtusos, típicas de sistemas estructurales en extensión. Las zonas de máxima extensión cortical de

este episodio tectónico, ocurren hacia el W-NW del Estado, y particularmente dentro del área de estudio es evidente que el grado de segmentación de afloramientos y desarrollo de amplios valles puede asociarse a este fenómeno.

Hacia el final del *Basin and Range*, en el Plioceno, ocurre otro cambio en el régimen tectónico regional e inicia una ruptura continental asociada a la apertura del Golfo de California (~12 Ma), el cual actualmente se encuentra activo y ha sido un claro ejemplo de *rifting* continental mundialmente documentado desde el surgimiento de la teoría de la tectónica de placas (Aguillón-Robles, 2002; Wilson *et al.*, 2005; Vidal-Solano, 2005; Pallares, 2007). Este proceso de rompimiento genera un área de afectación estructural que es conocida como Provincia Extensional del Golfo (Martín-Barajas, 2000) que se asocia a un volcanismo intermedio a ácido y posee una situación estructural cuya influencia afecta tanto a Sonora como a Baja California.

El Cuaternario se encuentra representado por una *aparente* estabilidad tectónica, sin embargo, el emplazamiento de un volcanismo basáltico reciente demuestra que se trata de un sistema actualmente activo. Además, la sedimentación de unidades detríticas-continuales asociadas a las grandes llanuras desérticas del Desierto de Altar y de las amplias planicies costeras del noroeste de Sonora son elementos importantes que definen mayormente las condiciones superficiales y subterráneas del acuífero Los Vidrios, ya que las unidades expuestas corresponden predominantemente con unidades sedimentarias depositadas en estos dos ambientes.

4.1. Estratigrafía

El Acuífero Los Vidrios cuenta con 19 unidades litoestratigráficas que varían en edad del Proterozoico al Cuaternario (reciente) y están representadas por rocas ígneas plutónicas y volcánicas, rocas metamórficas y rocas sedimentarias (figura 2). Particularmente, la presencia de amplias llanuras costeras propicia el desarrollo de diversos ambientes sedimentarios que depositan unidades de diferentes tipos, característica importante a considerar desde el punto de vista geológico. Las Unidades se describen a continuación en un orden cronoestratigráfico de la base a la cima:

Proterozoico Inferior-Medio (pTimGn-E, pTmGr)

Estas unidades representan las unidades litoestratigráficas más antiguas de la región y que afloran dentro de los límites administrativos del acuífero. Están formados por gneises y esquistos del Proterozoico Inferior a Medio que poseen edades U-Pb entre 1,777 y 1,600 Ma (Iriando, 2001, Anderson y Silver, 1979).

Se caracterizan por ser auge gneises con grados de metamorfismo de facies anfibolita y esquistos micáceos cortados por diques aplíticos y dioríticos (pTimGn-E). Característicamente, estas unidades están cortadas por intrusivos anorogénicos que poseen edades K-Ar de 1,450 Ma (Anderson y Roldán-Quintana, 1979), que se caracterizan por tener una composición que varía de granito a

granodiorita de feldespato potásico que también muestran un metamorfismo que genera una foliación moderada (pTmGr); la relación de corte con los gneises y esquistos del Proterozoico Inferior-Medio, puede ser observada al Este de la Sierra Choclo Duro. Aunque los ambientes genéticos de todas las unidades que componen este basamento han sido determinadas (Iriondo, 2001; Anderson y Silver, 2005), la actual disposición de los afloramientos está fuertemente controlada por la tectónica distensiva del Basin and Range como puede ser observado en los lineamientos de las Sierras Los Alacranes, Tinajas Altas, El Águila, Choclo Duro y El Rosario.

Sin embargo, su distribución delimita con cierta exactitud la traza de la Megacizalla Mojave-Sonora; al sur de ésta, ocurren afloramientos de rocas antiguas, mientras que al norte son escasos y/o son unidades más recientes. También es definida por la presencia de las masas ígneas del Jurásico.

Paleozoico Superior - Triásico Inferior (PpTRsMa-E)

Esta unidad ocurre con afloramientos muy escasos hacia el noroeste del acuífero, al sur del Ejido Aquiles Serdán. La unidad consta de mármoles esquistos y en menor proporción cuarcitas. Esta secuencia posee abundante fauna fósil que por su similitud (bioestratigráfica y litoestratigráfica) pueden ser correlacionadas con algunas unidades de la Secuencia Triásica del Gran Cañón.

Jurásico Medio (JmGr-Gd)

Esta unidad ocurre con afloramientos muy reducidos al noroeste de la Sierra El Rosario. Se encuentran formando una relación cortante-intrusiva sobre las unidades metamórficas del Proterozoico. Aunque la disponibilidad de afloramientos limita su interpretación, dataciones por el método U-Pb en zircones provenientes de esta unidad, arrojan edades de 170 Ma (Anderson, 1989). Son los únicos afloramientos de esta unidad, alrededor de ellos existen intrusivos más recientes (Cretácico Superior-Paleoceno) que pueden estar intrusionando a todas las unidades mencionadas anteriormente.

Cretácico Superior-Paleoceno (KsGd-Tn, K-TpaGr-Gd)

Estos cuerpos intrusivos del Cretácico Superior-Paleoceno ocurren en algunas ocasiones mediante contacto ígneo y en otras mediante contacto estructural con fallas normales de alto ángulo y orientación NW-SE que puede asociarse al estilo de deformación extensiva del Mioceno, cortando a diferentes unidades del Proterozoico y del Jurásico.

Aunque la composición de estos cuerpos intrusivos es muy amplia, ya que varía desde tonalita hasta granito-granodiorita pasando por ciertos miembros intermedios como monzonita, es posible que se trate de un mismo evento tectonomagmático que emplaza líquidos con distintos grados de diferenciación magmática, produciendo la amplia gama composicional. Estos cuerpos ocurren principalmente al noreste de la Sierra El Rosario hasta Sierra El Águila y al sur hasta Sierra Enterrada, Sierra Hornaday y Sierra Blanca.

Terciario

Paleoceno –Mioceno (TpaGd, TeMzGr-GdTn, TmA-B)

Las unidades que representan al Terciario, corresponden mayormente con cuerpos ígneos intrusivos y en menor proporción a rocas volcánicas. Las masas granitoides más abundantes corresponden a rocas granodioríticas del Paleoceno (TpaGd) que afloran principalmente en la Sierra El Rosario, donde ocurre como un único cuerpo que no posee relaciones cortantes con alguna otra unidad más antigua. Estas rocas se encuentran dispuestas según los mismos patrones estructurales NW-SE que definen las tendencias estructurales del Basin and Range. Este intrusivo presenta una mineralogía muy consistente que permite asociarlo al Batolito Peninsular de Baja California. Dentro del acuífero Los Vidrios la unidad aflora en la porción occidental y a pesar de su expresión geomorfológica baja, es posible que su participación dentro del sistema hidrogeológico se relacione mayormente con su extensión subsuperficial.

Por otro lado, la unidad TeMzGr-GdTn del Eoceno también es considerada como perteneciente al magmatismo batolítico Peninsular de Baja California, sin embargo, esta unidad presenta fuertes variaciones composicionales y de facies (desde granito-granodiorita hasta monzonita-tonalita). Se

asociada al magmatismo que dio origen al Batolito Peninsular de Baja California. Por lo general, se encuentra intrusionando a las unidades del Proterozoico y en ocasiones está afectada por sistemas de fallas y fracturas complejas.

La unidad más joven del Terciario está representada por una serie de rocas volcánicas formadas por intercalaciones de andesitas y basaltos, y en una muy reducida proporción ocurren tobas y derrames de composición riolítica. Estas rocas volcánicas ocurren de forma dispersa en toda la región, pero sus afloramientos principales se encuentran hacia el norte y el sur del Escudo Volcánico El Pinacate y al norte de la Sierra Los Alacranes. Se encuentran discordantes sobre las unidades intrusivas del Mesozoico, pero por lo general descansan sobre la planicie aluvial donde su base no está expuesta.

Terciario-Cuaternario (Plioceno-Pleistoceno; TplAr, TplQptB-BvB)

Durante el Plioceno ocurrieron una serie de eventos directamente relacionados a la invasión marina asociada a la apertura del Golfo de California que causaron el depósito de sedimentos terrígenos expuestos actualmente al oeste de Bahía Adair (TplAr). Estos sedimentos están compuestos por areniscas, lutitas y conglomerados cuyo ambiente sedimentario marino-continental es prueba de que el nivel del mar ascendió con respecto a su nivel actual.

Aunque es posible relacionarlo a un evento tectónico en particular, es difícil establecer si estas unidades sedimentarias están relacionadas a algún cambio de régimen tectónico, considerando su cercanía al sistema transformante San Andrés. Por otro lado, hacia la parte noreste del Acuífero ocurren unidades volcánicas que forman al Campo Volcánico El Pinacate, magmatismo que está muy representado con más de 400 aparatos volcánicos monogenéticos y derrames de lava que cubren

hasta 1,300 km² de extensión (Gutmann, 1972, Donelly, 1974, Lynch, 1981). Este episodio volcánico inició su actividad hacia 1.8 Ma y la actividad más reciente ha sido datada en 32 Ma (Gutmann y Turrin, 2006) por lo que su actividad se considera como *durmiente*.

La unidad se caracteriza por estar predominantemente representada por una serie magmática completa que varía de traquitas a basaltos; sin embargo, la litología está fuertemente dominada por basaltos. Su interacción con los depósitos eólicos del Desierto de Altar no se conoce, y tampoco se conoce la profundidad a la cual puede estar registrado este evento, por lo que es difícil establecer el nivel de afectación que puede tener sobre la parte norte y noreste del acuífero, si le consideramos como capas de mayor permeabilidad.

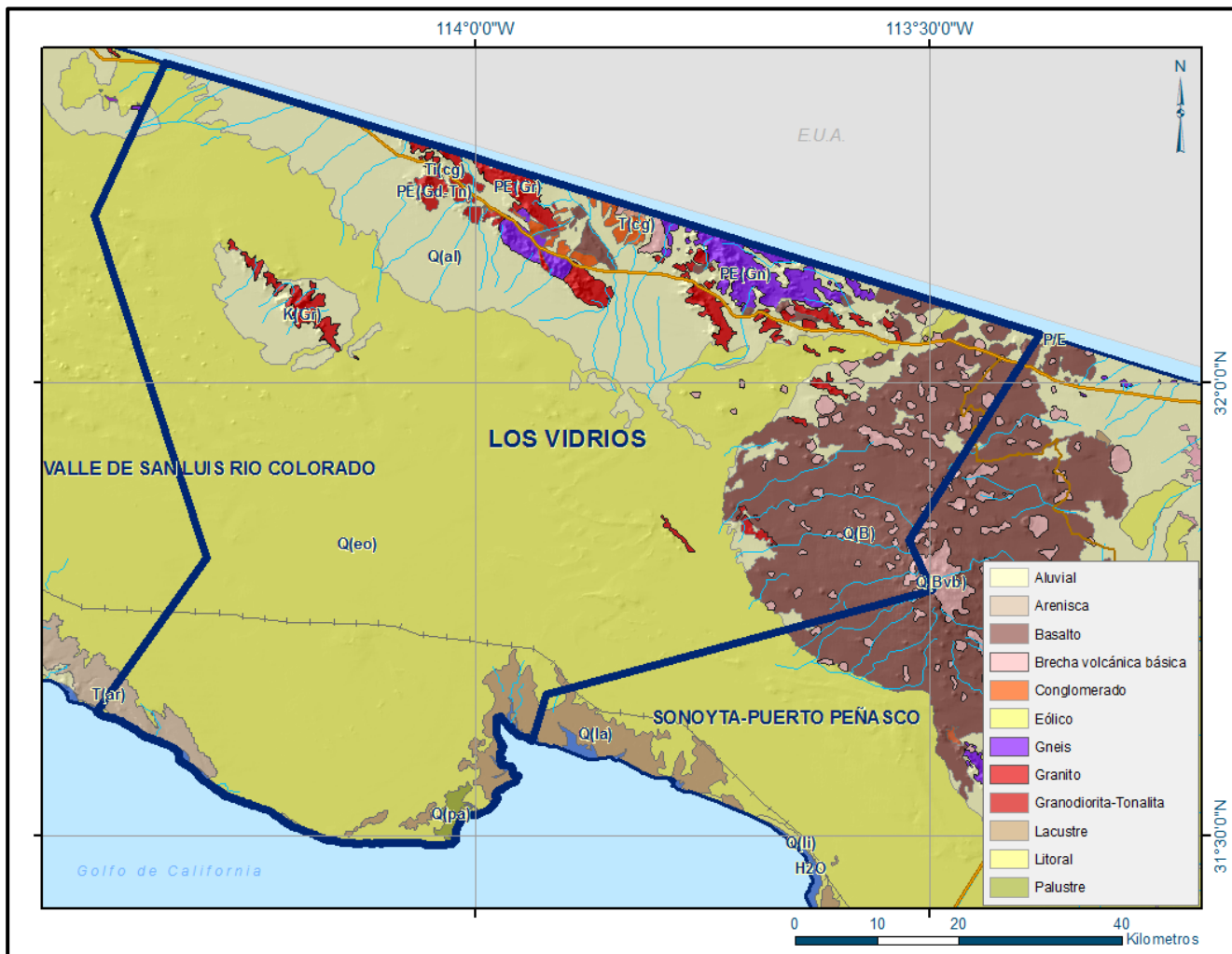


Figura 2. Plano geológico del acuífero

Cuaternario

Pleistoceno-Holoceno (QptCgp, Qptgv-ar, Qhoar-lm, Qhoeo, Qhola, Qhopa, Qholi, Qhoal)

Las unidades consideradas del Cuaternario han sido catalogadas en diversos tipos según el ambiente genético sedimentario en el que fueron depositadas. Así, cada unidad posee una distribución espacial

que es atribuida a su ambiente de depósito de tal forma que pueden llegar a corresponder con unidades geomorfológicas.

La unidad **QptCgp**, se desarrolla en los piedemonte de manera regular, con lo cual su característica más notoria es que se componen de conglomerados-brecha, granulométricamente mal clasificados y compuestos en su mayoría por clastos angulosos cuya composición varía según la zona de la cual derivan. Por lo general se forman por procesos de intemperismo mecánico ocasionado por las temperaturas extremas y el viento.

La unidad **Qptgv-ar** se conforma de sedimentos conglomeráticos no consolidados que ocurren principalmente hacia el sur del acuífero. Se relaciona más a las zonas de llanura costera y por lo general su ambiente de depósito es aluvial-fluvial, por lo que su granulometría será moderadamente bien clasificada con clastos redondeados. Ya que su ambiente aluvial-fluvial no permite el desarrollo de mineralogía autigénica, esta unidad no posee cementante.

La unidad **Qhoar-lm** ocurre principalmente en las llanuras intermontanas y en las planicies costeras. Aunque su distribución es muy amplia, su ambiente de depósitos no es muy claro ya que puede corresponder con depósitos aluviales-fluviales o puede corresponder con unidades formadas en su totalidad por procesos aluviales, siendo en este último caso, solo una remoción de material sedimentario por cualquier agente erosivo y de transporte.

Por las características climáticas de la región, la unidad **Qhoeo** representa la actividad eólica resultante del medio árido-desértico. Una de las principales formas de actividad erosiva de las zonas desérticas es la presencia de dunas y mantos de arena granulométricamente bien clasificada que puede llegar a formar amplias zonas. Dado su origen genético, su distribución está controlada por la capacidad de transporte del viento, lo cual causa que sean móviles. El espesor de esta unidad puede variar desde unos cuantos metros, hasta algunas decenas, sin embargo, es posible que llegue a formas de algunas centenas.

Hacia la parte oeste y suroeste del acuífero, ocurren sedimentos depositados en ambientes lacustres que determinan la unidad **Qhola** y que se constituye de sedimentos finos (limos y arcillas) con estratificación laminar y limitados a pequeñas cuencas cerradas distribuidas paralelamente o sobre la línea de costa. Probablemente se deban a zonas de baja permeabilidad que permiten el almacenamiento de agua superficial ya sea estacionalmente o de forma casi permanente, cuya disposición está parcialmente controlada por la interacción mar-continente. Pueden representar lugares de descarga subterránea o superficial de agua dulce.

La unidad **Qhopa** constituye las zonas de interacción agua dulce-agua salada para dar lugar al desarrollo de zonas de manglares y lugares en los que la vegetación y la fauna están muy bien desarrolladas. Por lo general son sedimentos muy finos cuya abundancia de organismos hace que

sean sedimentos carbonosos y ricos en fragmentos fósiles. Por su ambiente de depósito, se restringen únicamente a la línea de costa. También pueden representar lugares de descarga subterránea o superficial de agua dulce.

La unidad **Qholi** representa ambientes típicamente costeros (de litoral) que principalmente se genera por la actividad marítima de oleaje y marea, siendo el medio causante de la formación de barras de arena y demás geoformas típicas de estos ambientes. Sus sedimentos se constituyen de arenas y limos que por su fácil arrastre y transporte pueden ser constantemente modificados.

La unidad **Qhoal** representa al material aluvial típico que puede encontrarse como sedimentos de arroyos y que solamente representa sedimento en proceso de transporte fluvial.

Aunque existen una gran cantidad de ambientes sedimentarios, por la abundante intensidad de los procesos eólicos, todas las unidades anteriormente mencionadas pueden estar sujetas a procesos de transporte eólico, siendo el proceso sedimentario más dominante.

4.2. Geología estructural

Los distintos eventos tectónicos que han sido documentados generan sistemas estructurales que se sobre imponen y mezclan entre sí. Como resultado de esta mezcla, las fallas y fracturas desarrollan patrones complejos que al final determinan las características de afloramiento de las unidades a nivel regional y local. Así, el análisis de los rasgos fisiográficos y geomorfológicos principales permite observar en términos generales sierras alargadas y orientadas NNW-SSE separados por amplias planicies aluviales y eólicas.

Esta distribución está controlada por estructuras con una misma distribución general NNW-SSE con buzamientos al NE y al SW que en algunas ocasiones muestran lineamientos secundarios representados por fallas y fracturas orientadas NNE-SSW (ortogonales al sistema estructural principal). Esto es, que las sierras están delimitadas por estructuras limítrofes que le otorgan su orientación general, lo que ayuda concebir la presencia de altos y bajos estructurales (*horst* y *graben*), tal como se presentan en las Sierras Tinajas Altas, Los Alacranes y El Águila.

Asimismo, la presencia de unidades basálticas pone en evidencia la presencia de estructuras de alto ángulo y de gran profundidad. Estas relaciones cortantes mediante estructuras limítrofes primarias pueden ser observadas en la distribución cartográfica de los intrusivos de composición granítica-granodiorítica del Cretácico Superior-Eoceno, que son anteriores a la tectónica extensiva y que presentan sistemas de fracturamiento y foliación paralelos a las tendencias estructurales regionales. En general, las tendencias estructurales forman patrones NNW-SSE muy bien definidos que están en su mayor parte determinados por los sistemas extensivos del evento tectónico que generó la provincia morfotectónica del *Basin and Range*, la cual domina en gran parte la geología del noroeste

del Estado. Aunque la presencia de grandes extensiones de coberturas sedimentarias no permite realizar especulaciones acerca de la situación estructural del basamento, las características de los afloramientos proporcionan información suficiente para establecer que los patrones pueden mantenerse a profundidad, dado que una de las variaciones estructurales principales en área del acuífero Los Vidrios es la ausencia de afloramientos por debajo de la traza NW-SE marcada entre Sierra Blanca y Sierra El Rosario que quizá representa un “salto” estructural considerable a escala regional.

Por último, la mayoría de las unidades antiguas (anteriores al Terciario) presentan algún tipo de deformación penetrativa (pliegues y esquistosidad) y metamorfismo, sin embargo, su participación dentro de los patrones estructurales primarios es mínima.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con los resultados de las exploraciones geofísicas es posible definir la presencia de un acuífero constituido en su porción superior por depósitos aluviales y en porción inferior por roca intrusiva compacta muy resistiva que presenta baja permeabilidad.

Con la información de los SEV's y TEM's se construyeron dos secciones geoeléctricas que fueron correlacionadas con la información geológica para definir secciones hidroestratigráficas. La sección norte (figura 3) es paralela a la línea fronteriza y tiene una longitud de 35 km, presentando un rumbo este – oeste; y la sección sur es paralela a la costa (figura 4), con una longitud de 20 km.

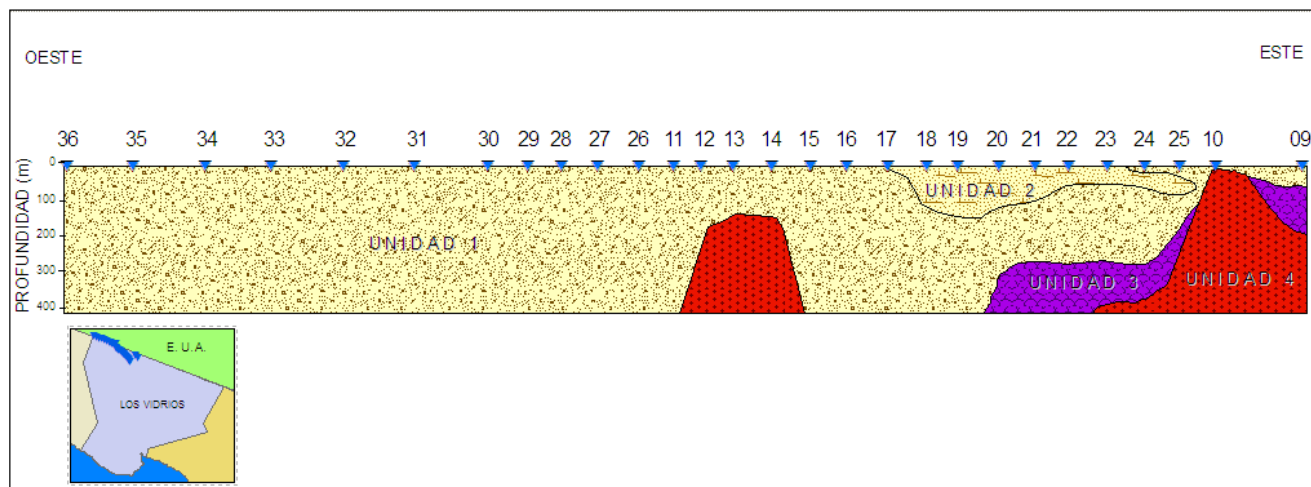


Figura 3. Sección hidrogeológica Norte (modificada por IDEAS 2009 a partir de GyCSA 1981)

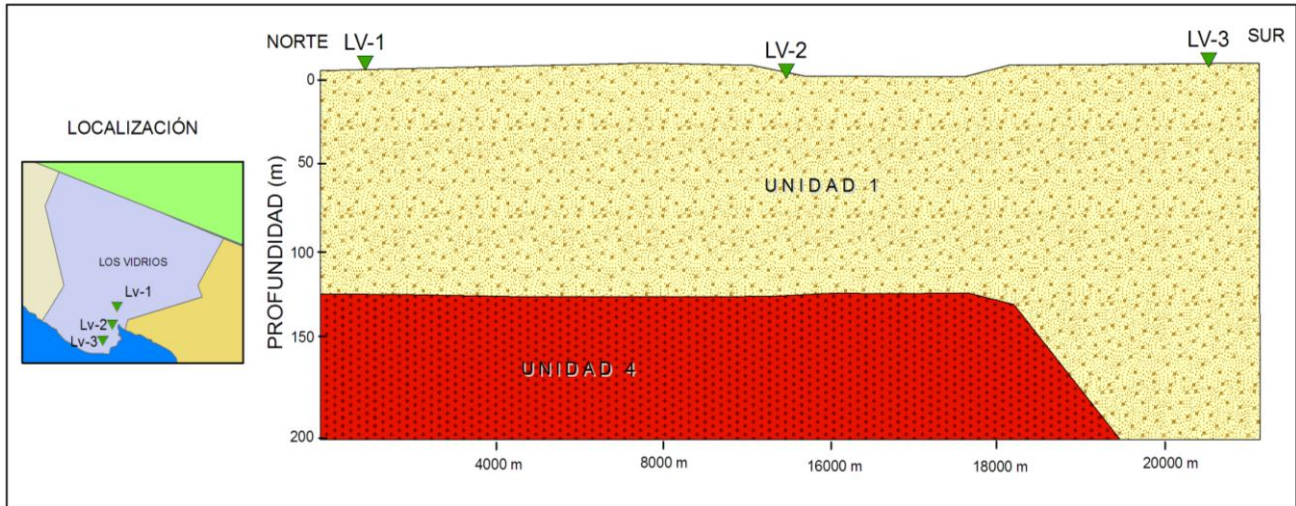


Figura 4. Sección hidrogeológica Sur (IDEAS 2009)

Los depósitos aluviales presentan zonas de alta permeabilidad formadas por arenas y gravas (unidad 1) y zonas de permeabilidad media que incluyen arena y arcilla (unidad 2). En conjunto, estos depósitos presentan un espesor de hasta más de 400 m.

En menor proporción se presentan rocas paleozoicas formadas por gneiss y esquisto que pueden encontrarse saturadas con agua dulce dada su permeabilidad secundaria producto de fracturamiento (unidad 3). Como basamento hidrogeológico se presentan rocas graníticas pobremente fracturadas (unidad 4).

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 por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por gravas y arenas no consolidadas de alta permeabilidad, que contienen agua dulce en la parte norte del acuífero y agua salobre en la línea costera. Su explotación se localiza en la franja costera y en la parte norte, en las proximidades a línea fronteriza. Debajo de esta secuencia el acuífero está conformado por rocas paleozoicas que pueden presentar permeabilidad secundaria por fracturamiento y por rocas intrusivas de permeabilidad muy baja.

5.2. Parámetros hidráulicos

En el acuífero Los Vidrios no se tiene información de pruebas de bombeo, sin embargo en pruebas realizadas cerca de la frontera con México, se determinaron valores de transmisividad entre **10 y 140 $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , consistentes con los obtenidos en el acuífero Valle de San Luis Río Colorado.

5.3. Piezometría

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

Para las configuraciones de los niveles estáticos se cuenta con poco apoyo piezométrico debido a que existen muy pocos aprovechamientos, algunos de los cuales no pudieron sondearse. A pesar de ello, con la información verbal de los propietarios y con criterio hidrogeológico, asumiendo que el acuífero se encuentra en condiciones iniciales y en condición de subexplotación, las configuraciones de profundidad y elevación del NE, son muy semejantes a la configuración topográfica del terreno.

Sólo se cuenta con información piezométrica en dos aprovechamientos, incluidos en el estudio de IDEAS, 2009. Por lo tanto, la descripción del comportamiento hidráulico que se presenta es pobre dada la escasez de datos.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático se obtuvo solamente en dos aprovechamientos ya que son los únicos donde pudo medirse. Los datos se tomaron al sur del acuífero, en la zona costera. La menor de las profundidades es de 0.4 m y la mayor es de 0.82 m (figura 5).

5.4.2. Elevación del nivel estático

En el acuífero Los Vidrios solo pudo obtenerse la elevación del nivel estático en dos aprovechamientos ubicados en la línea de costa. No se tiene precisión en la determinación de la elevación topográfica del terreno y no se pudo establecer una configuración de la elevación del nivel estático confiable. La elevación del nivel estático estimada en los dos aprovechamientos es de 3.21 y 3.62 m.s.n.m., respectivamente.

5.4.3. Evolución del nivel estático

No se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar una configuración de la evolución del nivel estático.

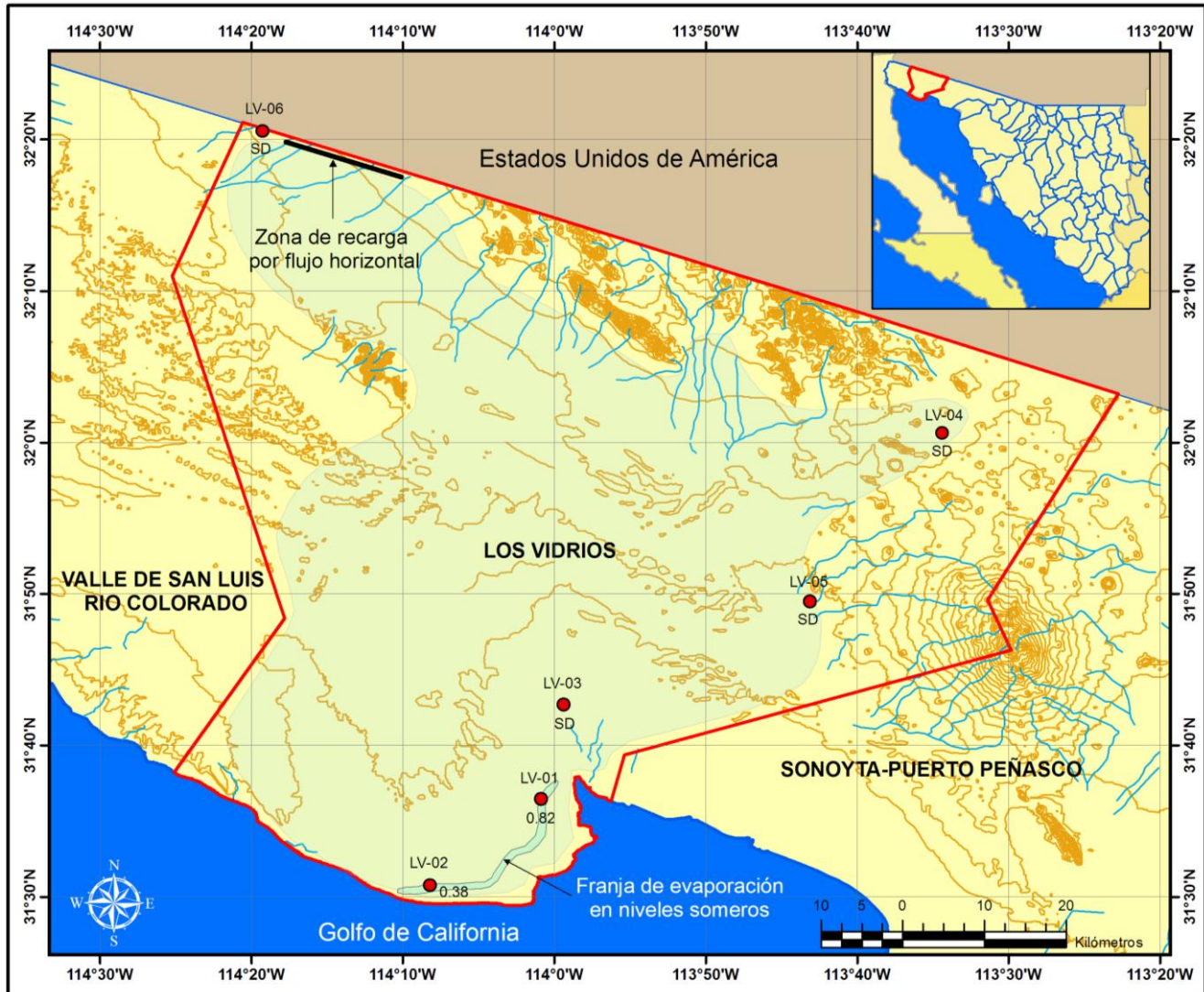


Figura 5. Profundidad al nivel estático en metros (2009)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2009, se tomaron muestras de agua en 5 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente, las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, 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 450 a 4800 ppm.

Con respecto a la conductividad eléctrica, en el acuífero se presenta agua dulce, agua salobre y agua salada, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995). El primer caso se presenta en un aprovechamiento ubicado en la parte este del acuífero, cuyo valor de conductividad eléctrica es de 580 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El segundo caso se encuentra en dos aprovechamientos, uno ubicado en la línea de costa y otro en la parte noroeste del acuífero, sobre la

línea fronteriza, con valores de conductividad eléctrica de 3807 y 3561 μ S/cm, respectivamente. El agua salada se manifiesta en las dos captaciones restantes, con valores de 5592 y 6891 μ S/cm, ambas ubicadas en la parte centro – sur del acuífero, cercanas a la línea de costa (figura 6). Cabe destacar que los aprovechamientos cercanos a la costa se encuentra sobre salinas, por lo que su salinidad puede tener origen en el lixiviado de sales del suelo, y no en una intrusión marina.

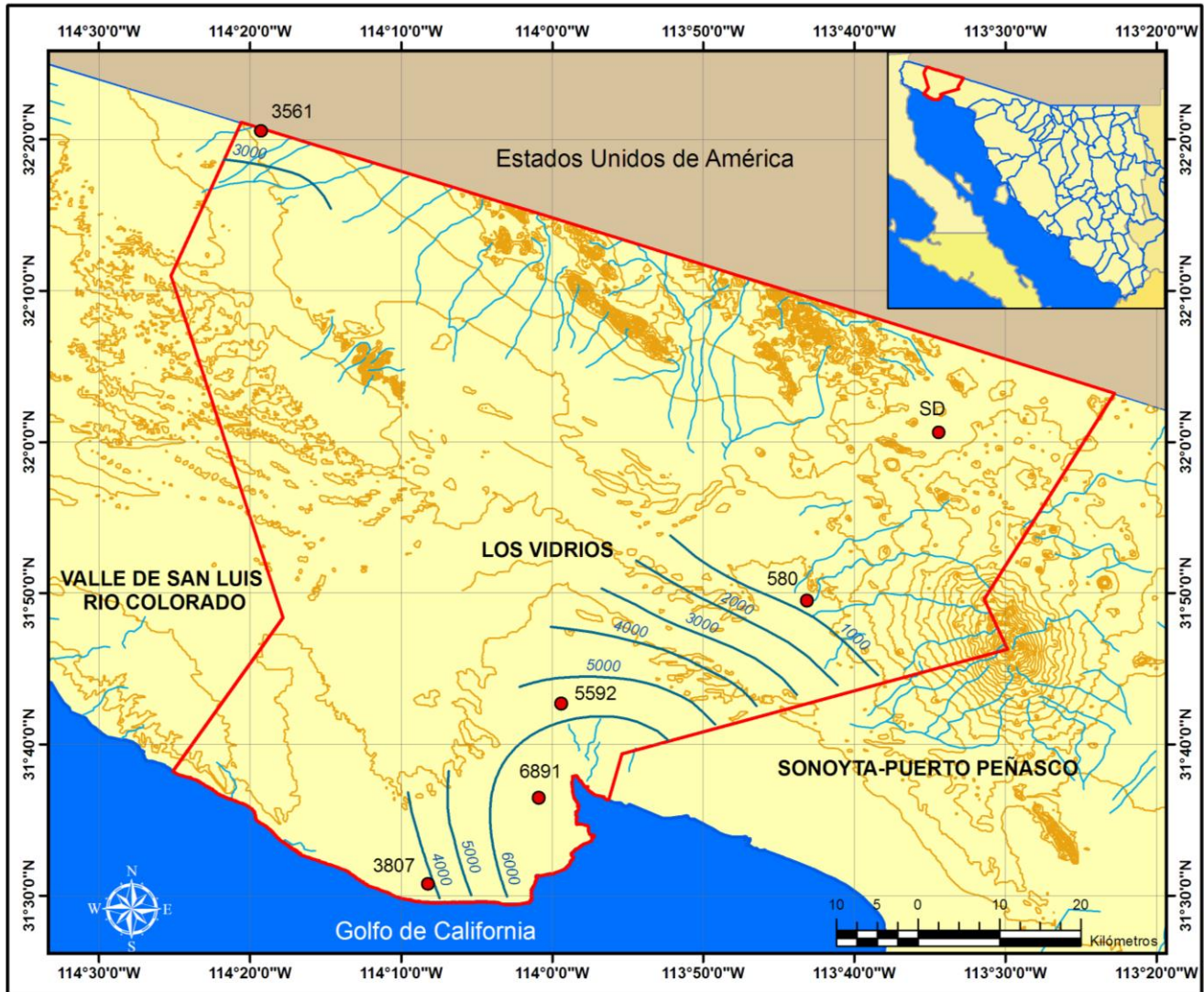


Figura 6. Curvas de isovalores de Conductividad Eléctrica (μ S/cm)

La representación gráfica de los resultados de los análisis fisicoquímicos (diagramas de Piper y Stiff) refleja que la familia de agua que predomina es la Clorurada Cálcica, que corresponde principalmente a los aprovechamientos cercanos a la costa, por lo que es posible que presenten mezcla con el agua de mar o que los aprovechamientos se encuentren cortando algunos horizontes evaporíticos. Uno de los aprovechamientos se encuentra dentro de la familia bicarbonatada sódica, familia que refleja agua de reciente infiltración pero que ha sufrido intercambio catiónico debido a la interacción con el medio geológico (figura 7).

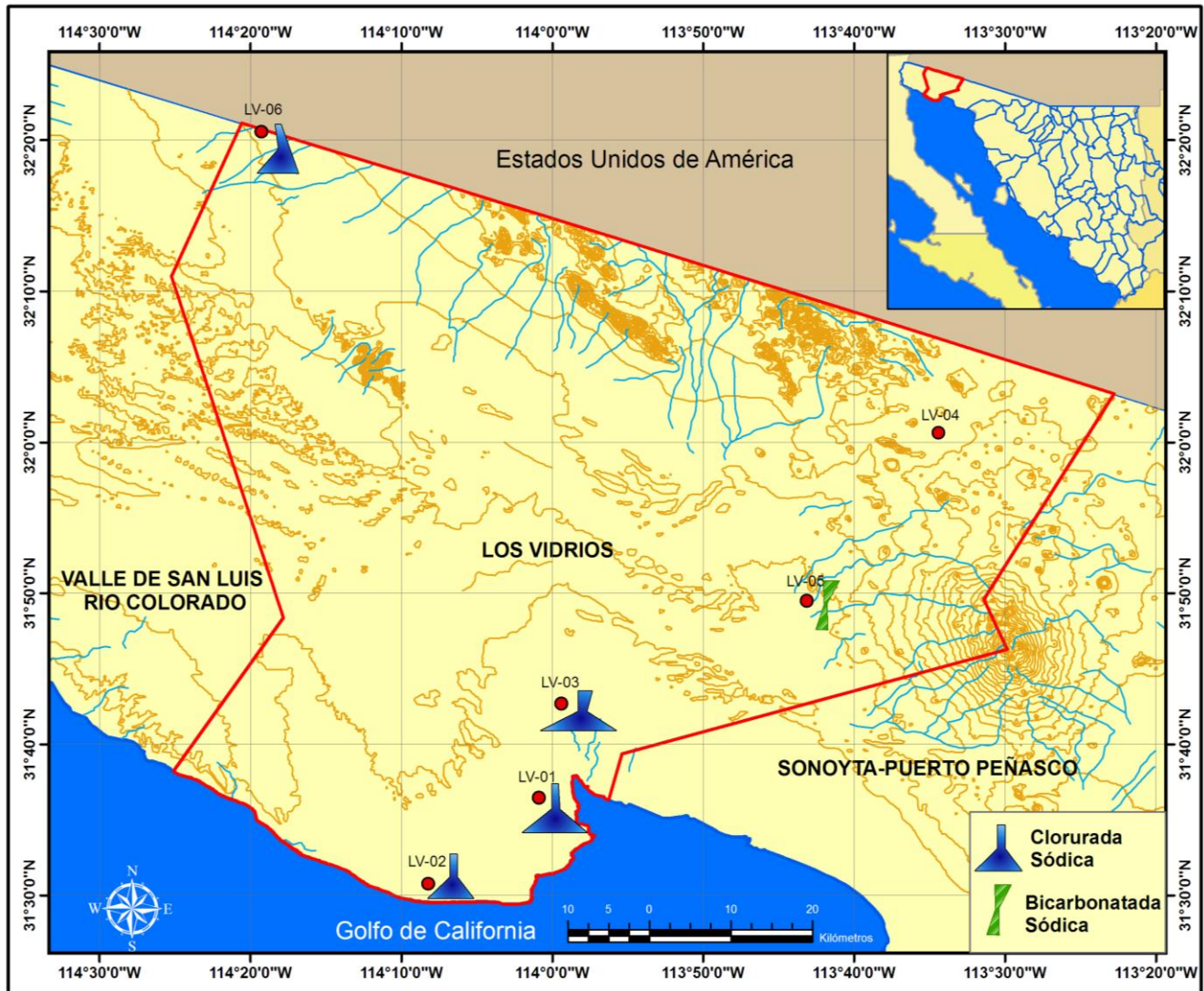


Figura 7. Diagramas de Stiff

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2009, existen en el acuífero un total de 6 aprovechamientos de aguas subterráneas, de los cuales 3 se encuentran activos y los 3 restantes inactivos.

La extracción en el acuífero es despreciable, pues el volumen calculado es de **0.000927 hm³ anuales (927 m³/año)**, de los cuales 416 m³ (45%) se destina al uso agrícola, seguido por el uso pecuario con 365 m³ (39%) y el uso doméstico con 146 m³ (16%).

Para fines del balance, se considera **nula** la extracción.

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 planteó para el año 2009 en una superficie de 3641 km², que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos subterráneos. De esta manera la ecuación de balance propuesta para éste acuífero es la siguiente:

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

Donde:

R_v= Recarga vertical;

E_h= Recarga por flujo horizontal;

B= Bombeo;

ETR= Evapotranspiración real en niveles someros;

S_h= Salidas por flujo horizontal;

ΔV(S)= Cambio en el volumen almacenado;

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia, considerada como recarga vertical (R_v) y por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el volumen de agua destinado al riego agrícola es incipiente, no existe recarga inducida. Por lo que **R_i = 0**.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo, pero debido a que existe una componente de salida del balance que no puede ser evaluada por falta de información piezométrica, la salida por flujo horizontal (Sh), el valor de la recarga vertical por lluvia se estimó a partir de un balance hidrometeorológico.

En la región de estudio el agua de lluvia se evapotranspira o simplemente se evapora, de aquí que el principal proceso de recarga hacia el subsuelo, lo represente la infiltración. Este proceso es la cuantificación de la penetración de agua desde la superficie del terreno hacia su interior. Esta agua toma un tiempo para convertirse en recarga, que depende, además de los factores climáticos, de la profundidad del nivel freático y las características de la zona vadosa. El agua en movimiento descendente es recarga en tránsito o agua de percolación. La recarga vertical, será estimada de acuerdo al balance hidrometeorológico a partir de la expresión:

$$Rv = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (a)$$

Donde:

V_{LL} = Volumen llovido;

V_{ETR} = Volumen evapotranspirado;

V_{ESC} = Volumen escurrido;

Rv = Recarga vertical al acuífero;

Para realizar el balance hidrometeorológico se requiere conocer el volumen de escurrimiento que se presenta por lluvia dentro del área de estudio, es decir, es necesario determinar el volumen de agua que se genera por cuenca propia; sin embargo, no se dispone de aforos específicos que permitan cuantificar dicho volumen.

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se puede utilizar el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF), del 17 de abril de 2002, que señala que en caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado “precipitación-escurrimiento”.

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento. El Coeficiente de Escurrimiento, se determinó de manera indirecta en función del tipo y uso de suelo de la cuenca del acuífero en estudio, a partir del criterio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) y por medio del valor de K. Con apoyo de la cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasificaron los suelos del acuífero en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos

permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), y se determinó el uso actual del suelo. En el caso de que en el acuífero en estudio existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio de cada una de ellas. Con los datos anteriores se determinó un coeficiente de escurrimiento de 0.63 %.

De esta manera, el volumen de escurrimiento estimado resultó de 1.6 hm³/año al multiplicar el coeficiente de escurrimiento por el volumen precipitado en el área de estudio, el cual es de aproximadamente 248.3 hm³/año, valor obtenido en un área de 3641 km², y una lámina de lluvia promedio de 68.2 mm/año. Por otra parte, para estimar el valor de la evapotranspiración (ETR) se utilizó la fórmula empírica de Coutagne, la cual establece lo siguiente:

<p>COUTAGNE</p> <p>ETR = $P - \chi P^2$</p> <p>Donde:</p> <p>ETR= Evapotranspiración m/año</p> <p>P = precipitación en m/año</p> <p>$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$</p> <p>t = temperatura en °C</p>

La temperatura promedio anual es de 22.4 °C, que al sustituirlo en la ecuación de Coutagne junto con el valor de precipitación, se obtiene un valor de evapotranspiración de 67 mm/año, que multiplicado por el área total resulta en un volumen evapotranspirado de 244 hm³/año. Los valores calculados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Balance hidrometeorológico para el acuífero Los Vidrios

Escurrecimiento** (hm ³ /año)	Precipitación (hm ³ /año)	Evapotranspiración (hm ³ /año)	Infiltración (hm ³ /año)
1.6	248.3	244	2.7

Si se sustituyen los valores antes calculados, tanto de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento en la ecuación (a) se obtiene lo siguiente:

$$R_v = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (a)$$

$$R_v = 248.3 - 244 - 1.6$$

$$R_v = 2.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El volumen infiltrado asciende a **2.7 hm³ anuales**, que recargan verticalmente al acuífero en el área de valle, que representa el 1 % del volumen precipitado.

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 de la siguiente manera:

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

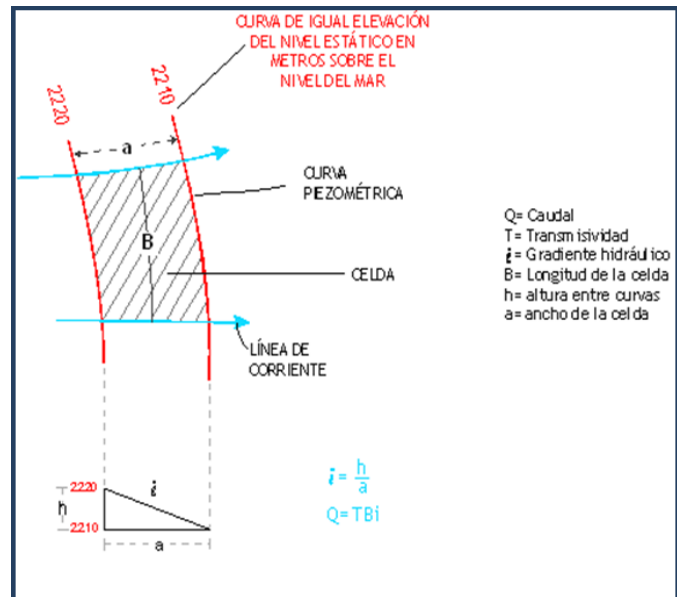
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



En el estudio se cita una transmisividad (T) en la zona de $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, y un gradiente hidráulico $[(h_1 - h_2)/l]$ de $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Por otra parte, de acuerdo a las características hidrogeológicas de esta porción del acuífero, se definió una celda de flujo con una longitud de 12.7 km (figura 5). Estos valores fueron utilizados para estimar el flujo de entrada horizontal (tabla 3).

Tabla 3. Cálculo de volumen de entrada horizontal al acuífero

CANAL	ANCHO B (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($\text{hm}^3/\text{año}$)
E1	12750	0.001	0.01	0.1275	4.0

El volumen estimado de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **4.0 hm^3 anuales**.

El acuífero no cuenta con información piezométrica en su porción noroeste, donde existen entradas subterráneas procedentes de los EUA, que no fueron incluidas en la estimación de la recarga vertical mediante el balance hidrometeorológico. En el estudio realizado por Geoexploraciones y Construcciones S. A. (1981), se presenta información del gradiente hidráulico predominante y de la transmisividad en esa zona, obtenidos a partir de estudios realizados en Estados Unidos. Dado que el estudio se encuentra incompleto, no se tiene el plano de la configuración piezométrica, pero es posible estimar un volumen a partir de los datos descritos.

7.2. Salidas

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

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de $0.000927 \text{ hm}^3/\text{año}$, por tanto la cifra representativa es **B = $0.0 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

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

Debido a que el valor de la precipitación media anual es muy bajo, no se pueden aplicar los métodos empíricos para la estimación de ETR. El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la ausencia de cobertura vegetal. Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos < 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith, 1973, (figura 8).

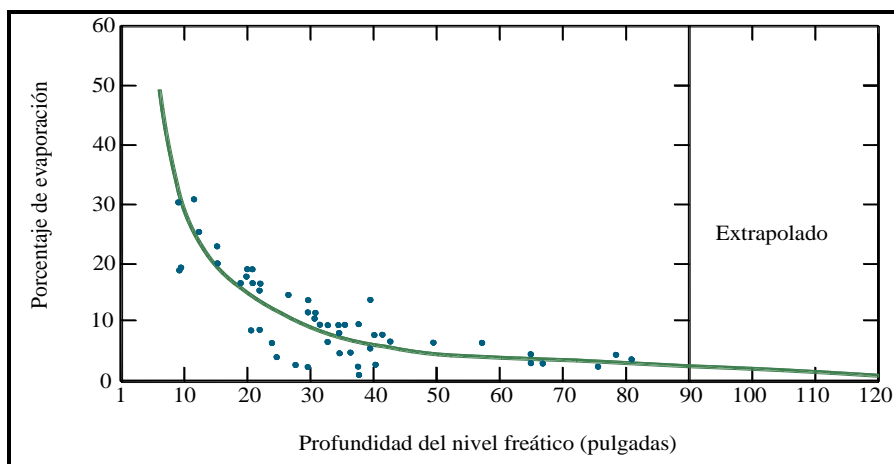


Figura 8. Evaporación del AS expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático (White)

Su valor se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE < a 2 m, mostrada en la figura 5), por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas (2337 mm). El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático. De la figura 8 se deduce que para una profundidad al nivel estático (PNE) de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2% y se considera una superficie de 100 km², donde la PNE es menor a los 2 m, estos datos se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo del volumen de Evaporación

Evaporación potencial media anual (m)	Área (km ²)	% de la Evaporación Potencial	Volumen Evaporación (hm ³ /año)
2.337	100	0.02	4.7

La evaporación se estima que asciende a **4.7 hm³ anuales**.

7.2.3. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Esta componente de salida del balance no pudo ser evaluada por falta de información piezométrica, por lo tanto, será estimada una vez calculados los valores de los parámetros restantes. De esta manera el valor de las salidas subterráneas horizontales se despejará de la ecuación de balance (1):

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

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Debido a que el volumen de extracción es prácticamente igual a cero, no se presentan alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

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

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la descarga por flujo horizontal (Sh), por lo que mediante la expresión (2) definida con anterioridad se calcula:

$$\begin{aligned} \mathbf{Sh} &= \mathbf{Rv + Eh - B - ETR - \Delta V (S)} & \mathbf{(2)} \\ Sh &= 2.7 + 4.0 - 0.0 - 4.7 - 0.0 \\ \mathbf{Sh} &= \mathbf{2.0 \text{ hm}^3/\text{año}} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{Rt} &= \mathbf{Rv + Eh} \\ Rt &= 2.7 + 4.0 \\ \mathbf{Rt} &= \mathbf{6.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

Rt= Recarga total media anual;

DNCOM= Descarga natural comprometida;

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

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **6.7 hm³ anuales**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida, la totalidad del volumen de salidas horizontales, que es de **2.0 hm³ anuales** que deben mantenerse para hacer frente al proceso de intrusión marina.

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 2010, es de 685,087 m³/año.**

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDa.

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

$$\text{DAS} = 6.7 - 2.0 - 0.685087$$

$$\text{DAS} = 4.014913 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **4'014,913 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

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

9. BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, T.H., SILVER, L.T., 1979. The role of the Mojave-Sonora Megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, *en*: T.H. Anderson, J. Roldán-Quintana (eds), *Geology of Northern Sonora, Geological Society of America. Field Trip Guidebook 7*, 59-68

GEOEXPLORACIONES Y CONSTRUCCIONES, S. A., 1981. Informe del estudio Geohidrológico preliminar de la zona de Los Vidrios – San Luis Río Colorado en el estado de Sonora.

CONAGUA, 2005. Atlas de aguas subterráneas para el Estado de Sonora y diseño de una red de monitoreo piezométrico. Realizado por la Universidad de Sonora.

CONAGUA, 2009. Actualización geohidrológica de los acuíferos Los Vidrios, Río Alisos, Arroyo Sahuaro, Sahuaral y Cuitaca. Realizado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, S.A de C.V (IDEAS).

MARTIN-BARAJAS, A., 2000. Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53, 72-83.

McDOWELL, F.W., CLABAUGH, S.E., 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico, *en*: Chapin, C.E., Elston, W.E., eds., *Ash-flow tuffs: Boulder, Colorado. Geological Society of America Special Paper 180*, p. 113-124.

STAUDE, J.-M.G., BARTON, M.D., 2001. Jurassic to Holocene tectonics, magmatism and metallogeny of Northwestern Mexico. *GSA Bulletin*, 113(10), 1357-1374.

STERN, R.J., 2004, Subduction initiation: spontaneous and induced. *Earth and Planetary Science Letters*, 226, 275-292.

WILSON, D.S., McCRORY, P.A., STANLEY, R.G., 2005. Implications of volcanism in coastal California for the Neogene deformation history of western North America. *Tectonics*, 24, TC3008.