



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO SANTO TOMÁS (0213), ESTADO DE  
BAJA CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1 Localización .....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero .....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>4</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
3.1 Provincia fisiográfica .....	5
3.2 Clima .....	6
3.3 Hidrografía.....	6
3.4 Geomorfología.....	6
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>7</b>
4.1 Estratigrafía .....	9
4.2 Geología estructural .....	12
4.3 Geología del subsuelo.....	12
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	13
5.2 Parámetros hidráulicos .....	13
5.3 Piezometría.....	13
5.4 Comportamiento hidráulico.....	14
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	14
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	15
5.4.3 Evolución del nivel estático .....	16
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	16
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>	<b>16</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>17</b>
7.1 Entradas.....	17
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	18
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	18
7.2 Salidas .....	20
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	20
7.2.2 Extracción por bombeo (B).....	22
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	23
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	23
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>23</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	24
8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM).....	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	24
8.4 Disponibilidad de aguas Subterráneas (DAS) .....	25
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>26</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 Santo Tomás, definido con la clave 0213 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroccidental del estado de Baja California y tiene una superficie de 886 km<sup>2</sup>.

Colinda al norte con el Valle de Maneadero, al sur con el Valle de San Vicente, al este con las inmediaciones de la Sierra de Juárez y al oeste con el Océano Pacífico (figura 1). Geopolíticamente, se encuentra ubicado en el municipio de Ensenada.



Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0213 SANTO TOMAS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	116	27	416	31	20	55.2	DEL 1 AL 2 POR LA LINEA DE BAJ AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
2	116	41	213	31	33	17.3	
3	116	35	27.2	31	35	55.3	
4	116	33	20.7	31	36	23.6	
5	116	23	42.7	31	36	12	
6	116	21	57.8	31	36	24.9	
7	116	13	42.7	31	36	24.2	
8	116	9	40.4	31	38	35.7	
9	116	3	48.6	31	38	11.6	
10	116	1	54.7	31	37	23.5	
11	116	2	42.2	31	32	56.0	
12	116	8	35.4	31	30	5.4	
13	116	11	49.4	31	30	40.2	
14	116	12	42.0	31	30	14.9	
15	116	19	24.9	31	30	22.5	
16	116	21	13.2	31	29	34.2	
17	116	23	2.3	31	25	38.6	
18	116	26	21.7	31	24	26.8	
1	116	27	416	31	20	55.2	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Santo Tomás pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1960. Este decreto es de tipo III que permiten 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 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Baja California instalado el 7 de diciembre de 1999. No existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona en la que se ubica el acuífero se han llevado a cabo diversos estudios hidrogeológicos de evaluación, algunos de cobertura regional. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

**INFORME GEOHIDROLÓGICO EN EL EJIDO SAN JACINTO, DELEGACIÓN DE SANTO TOMÁS ELABORADO POR LA SECRETARÍA DE RECURSOS HIDRÁULICOS, DIRECCIÓN DE GEOHIDROLOGÍA, EN 1976.** El objetivo del estudio es definir la posibilidad de extraer agua subterránea para uso de riego, se reportaron los niveles estáticos medidos en los distintos aprovechamientos de 2.84 m y 3.68 m. La precipitación media anual era de 200 mm.

Este estudio concluye que los terrenos del ejido no presentan las condiciones adecuadas para el uso agrícola. En los estudios de geoquímica realizados se obtuvieron valores de sólidos disueltos totales que varían de 299 a 873 ppm y pH de 7.2 a 9.3.

**ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN 20 ACUÍFEROS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA.** Elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. en 2008. El objetivo principal de este estudio fue plantear el balance preliminar de aguas subterráneas para determinar la disponibilidad, mediante la realización actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y nivelación de brocales.

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

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincia fisiográfica**

De acuerdo a la clasificación de las Provincias Fisiográficas del INEGI (1997), el acuífero Santo Tomás se encuentra ubicado dentro de la Provincia Fisiográfica Penínsulas de Baja California. En la porción norte destaca la Sierra de San Pedro Mártir con alturas que sobrepasan los 3,000 m (La encantada 3,100msnm) forma parte también la subprovincia de la Sierra Cristalina (Álvarez 1964).

Geográficamente se encuentra limitada por el Océano Pacífico; al este por el complejo volcánico de San Pedro Mártir y al suroeste por la subprovincia de la Llanura Costera de Baja California.

Dentro de las elevaciones más importantes dentro del acuífero se encuentra el Cerro El Burro principalmente, con una elevación de 800 msnm y El León en la parte más alta, con una orientación Noreste a Suroeste, presentando una forma alargada con una ampliación media de 10 km., la zona acuífera está representada en la parte más estrecha por un cañón que conforma el cauce principal del arroyo en el cual concurren al dren principal denominado arroyo Santo Tomás, una serie de escurrimientos provenientes de las serranías que comprende el acuífero, que posteriormente se unen al dren principal para desembocar en el Océano Pacífico, con un recorrido desde su origen al punto de descarga de 70 km aproximadamente. La zona de Valles que comprende también la zona acuífera principalmente la comprende La Bocana, Agua Dulce, Ejido Uruapan, Ajusco, El Palomar y Santo Tomás con elevaciones del orden de 0 a 170 msnm.

### **3.2 Clima**

Considerando la nomenclatura propuesta por Köppen modificada por E. García (1964). Los climas presentes en el área son los climas secos BSo (con lluvias en invierno) de subtipo seco mediterráneo templado: BSKs y BSKs (x'). La estación climatológica de Santo Tomás para el periodo de 1948-2007 indica una temperatura media anual de 17.8° C en el mes de agosto la temperatura más alta promedio es de 24.5° C y la más fría en enero de 12.3° C. El valle de Santo Tomás presenta una precipitación anual muy variable para el periodo 1948-2007, la precipitación media anual es de 260.5 mm.

### **3.3 Hidrografía**

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No. 1 Baja California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Río Tijuana, cuenca del Arroyo Las Animas-Arroyo Santo Domingo. En el área el arroyo, que drena al Valle de Santo Tomás de forma longitudinal, tiene su origen en las inmediaciones de la Sierra de Juárez. Existen otros arroyos de menor importancia que son tributarios del arroyo Santo Tomás y finalmente desembocan en el Océano Pacífico, alcanzando un desarrollo de 70 km desde su nacimiento hasta su desembocadura.

### **3.4 Geomorfología**

El acuífero Santo Tomás se encuentra en una zona que se caracteriza por presentar una variación de relieve visible, en el que se pueden observar valles, cañadas, cerros, cañones y sierras. La elevación máxima es de 1580 msnm definida por el Cerro el León que marca el límite este del acuífero.

El relieve de tipo montañoso es predominante aunque también existen zonas de baja altitud como es el caso del Valle Agua Dulce, Santo Tomás en los que presenta un fuerte control estructural.

La topografía presenta una forma alargada, que es delimitada por las cañadas que tienen orientación preferencial NW-SE debido a los rasgos estructurales regionales. El tipo de drenaje que se observa a lo largo del acuífero va de subdendrítico a paralelo aguas arriba, mientras que en la zona cercana a la costa el drenaje que se observa es de tipo dendrítico bien marcado.

#### **4. GEOLOGÍA**

La geología regional es el reflejo de una zonificación litológica-estructural que se manifiesta a lo largo de toda la península de Baja California.

En el territorio del estado de Baja California Norte se encuentra expuesta una secuencia estratigráfica cuyo rango geocronológico varía desde el Paleozoico hasta el Reciente. La distribución de las diferentes unidades litológicas se puede definir según tres cinturones pre Paleógeno-Neógeno que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciables. Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por depósitos volcánicos y sedimentarios del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, su distribución de oeste a este es como sigue:

El primer cinturón, ubicado en el extremo occidental de la península, está representado por una secuencia de sedimentos marinos y continentales del Cretácico Superior, poco consolidados y sin fuertes deformaciones tectónicas. Esta secuencia fue definida formalmente por Beal (1948) como Formación Rosario y consiste de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados, que contienen tanto fauna marina como huesos de dinosaurios, lo que refleja el desarrollo de ambientes que variaron desde continentales hasta de plataforma y talud con líneas de costa fluctuantes, semiparalelas a la línea que divide a este cinturón de los terrenos ubicados al oriente, los cuales constituyeron la fuente de suministro de sedimentos clásticos. Gastil et al. (1975) denominan a este límite "Línea Santillán-Barrera" y consideran que este rasgo ha controlado la sedimentación por largos periodos.

El siguiente cinturón está conformado por secuencias de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias cuya edad asignada corresponde al Cretácico Inferior. La secuencia superior y de mayor distribución fue definida originalmente por Santillán y Barrera (1930), en INEGI (1984), como Formación Alisitos, en la localidad tipo Rancho Alisitos ubicada al sur de Ensenada.

El tercer cinturón, ubicado en el borde oriental de la porción norte de la península, está constituido por rocas intrusivas y metamórficas producto del metamorfismo regional de rocas sedimentarias. En el caso de las rocas sedimentarias existentes en la zona afloran secuencias de areniscas con intercalaciones de yeso selenita estos afloramientos se observan erosionados debido al agente eólico característico de la zona (figura 2).

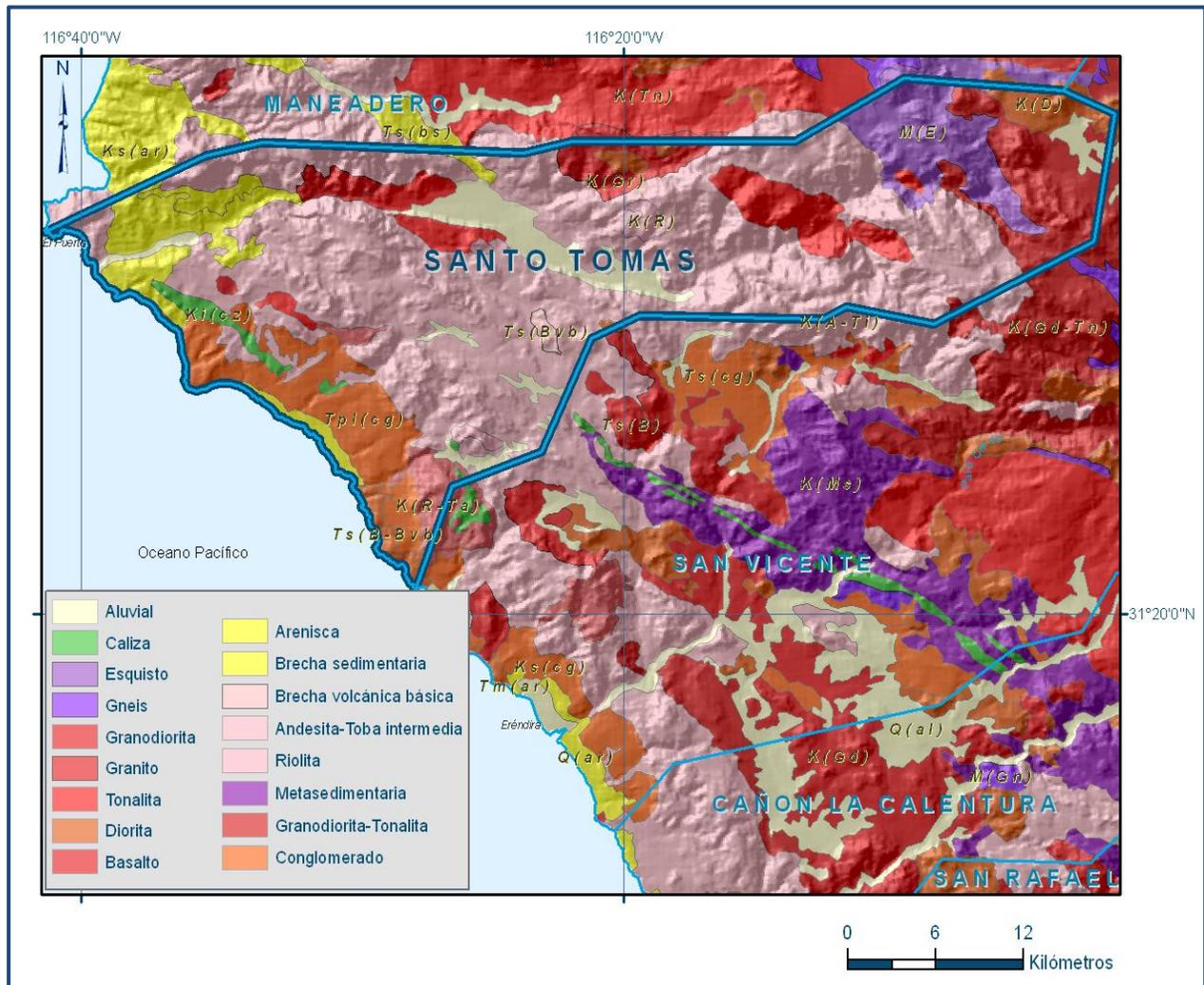


Figura 2. Geología general del acuífero

A esta franja pertenecen los batolitos mesozoicos (tonalitas-granodioritas y granitos) y rocas prebatolíticas anteriores a la Formación Alisitos, cuya edad no ha sido aún bien definida. Las secuencias metamórficas prebatolíticas asociadas a este cinturón presentan diferentes facies metamórficas y su edad es motivo de discusión. Predominan los esquistos, gneises, cuarcitas y pizarras.

#### **4.1 Estratigrafía**

En el acuífero Santo Tomás aflora una variedad de rocas ígneas y sedimentarias. Aflorando rocas ígneas intrusivas (granitos, granodioritas y tonalitas) y rocas ígneas extrusivas, representadas principalmente por derrames de lavas básicas.

#### **CRETÁCICO INFERIOR**

**Formación Alisitos (Kas):** en esta área la secuencia consta de cuatro miembros, de abajo hacia arriba: Tobas en capas delgadas con sills de diorita, Calizas y Areniscas, Rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición intermedia. El miembro superior consiste de calizas biógenas que hacia la cima se interdigitan con rocas volcánicas intermedias.

Consiste en rocas calcáreas y derrames de composición riolítica que se encuentran interestratificadas. Las calizas se presentan en estratos masivos a delgados, predominando en estos últimos, de color gris oscuro a claro, con lentes de limolita calcárea y algo de arcillas. La caliza está silicificada y algo metamorfoseada. Su fracturamiento es intenso y en algunas áreas tiene aspecto lajoso.

La unidad calcárea está interestratificada también con tobas líticas de composición ácida. En las áreas cercanas al cuerpo intrusivo presenta aureola de metamorfismo.

En los alrededores del Arroyo de Santo Domingo y hacia el norte y sur del área, se encuentra una secuencia metasedimentaria formada por pizarras, esquisto, meta arenisca, meta conglomerado, calizas y escaso mármol, afectada por diques andesíticos o fuertemente plegada.

Estas unidades han sido correlacionadas con la Formación Alisitos (Castil, 1975), pero teniendo en cuenta sus características litológicas y estructurales, podrían ser más antiguas.

**Formación Rosario (Kr):** Formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino. Esta formación se presenta poco consolidada y así como el tectonismo poco marcado, se le encuentra descansando en discordancia angular a la formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico), y cuyo límite oriental es la denominada línea “Santillana Barrera”, que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos. Tiene un espesor aproximado de más de 750 m situado en el Maestrichtiano. Sus principales afloramientos se localizan sobre la costa del Pacífico.

**Formación Bedford Canyon (KsGd - Tn):** La integran un conjunto de bloques caóticos empastados en una masa arcillosa (olistostroma), de calizas del Jurásico Medio al Tardío. Con base en la similitud litológica al complejo Franciscano, los protolitos de la Formación Bedford Canyon y por analogía de la Formación Valle Frenchman así como la del esquisto Julián han sido interpretados como trincheras o depósitos trincheratalud.

Los ambientes de cuenca, forearc y backarc (Retro-arco y Ante-arco) respectivamente, también son posibles (Todd, 1988). La parte oriental está interpretada por granitoides fuertemente deformados con edad Jurásico Medio. Su historia geológica se deduce del esquisto Julián así como su localidad tipo.

Por la sedimentación de un protolito siliciclástico de grano fino-grueso en un ambiente tectónico incierto, intrusión de restos pegmatíticos delgados.

**Formación Esquisto Julián:** La localidad tipo de esta formación se encuentra en el poblado de Julián, Condado de San Diego, California, Estados Unidos, el cual consiste en lutitas, areniscas y conglomerados metamorfoseados, con pequeños cuerpos de anfibolita y mármol. La unidad consiste de una secuencia metasedimentaria la cual se encuentran paquetes ínter digitados de esquistos, Filitas, pizarras y, predominando en algunas partes, gneis. En la secuencia predominan los colores oscuros, pero los gneis presentan colores claros.

En general, el grado de metamorfismo es muy variable. Los esquistos que se encuentran son micáceos y aquellos con abundante clorita de facies esquisto verde; en algunas áreas como la del Arroyo Corral Blanco, se presentan talcosos.

**Formación San Diego (Plc):** Suprayace a la Formación Rosarito Beach y en discordancia a la formación Linda vista, está formada por conglomerados y con intercalaciones de arenisca de matriz café a rojiza, presenta además sedimentos fluviales depositados en los lechos de los ríos, coluviales; estos asociados a pendientes fuertes y aluviones debido a movimientos de ladera.

**Sierra Las Pintas (KsD):** Rocas volcánicas que pertenecen a dos probables períodos de vulcanismo; el primero genero andesitas y dacitas andesíticas que aflora en la porción centro-norte, la edad varía entre 7.6 a 9.5  $\pm$  1.0 Ma. (Gastil, 1975), estas rocas se encuentran afectadas por pequeños cuerpos intrusivos hipabisales de tipo porfídico y de composición andesítica y riódacítica. El segundo período de vulcanismo generó derrames de tobas riolíticas y riolitas y andesíticas afloran en la misma porción que las rocas volcánicas anteriores.

Las rocas volcánicas descritas, pertenecen a la secuencia volcánica Sierra Las Pintas con espesor de más de 1500 m, sobreyacen a rocas metamórficas paleozoicas y graníticas cretácicas (Leie-Hangel-Hardt, 1993); además, presentan discordancias internas y bloques basculados que sugieren que este centro volcánico fue deformado tectónicamente.

Sobreyaciendo concordantemente a esta secuencia y discordantemente a las unidades paleozoicas y mesozoicas se encuentra la unidad de basalto de edad Mioceno tardío.

**Unidad Eólica (Qhoal):** integrada por arena de grano fino a medio, se encuentran bien redondeadas y clasificadas, derivada de rocas ígneas y metamórficas, presenta además minerales y fragmentos de moluscos, expuestos en las zonas costeras y en algunos valles presentando pocos metros de espesor y formando dunas paralelas a la línea de costa.

**Aluvión (Qal):** Los depósitos cuaternarios fluviales y aluviales que afloran y conforman el relleno a lo largo de los cauces.

Desde el punto de vista geohidrológico, estos depósitos son de gran importancia, ya que son capaces de proporcionar volúmenes considerables de agua subterránea, susceptibles de ser aprovechados.

#### **4.2 Geología estructural**

El valle de Santo Tomas es afectado por una de las estructuras más importantes y antiguas de la Península de Baja California que corresponde a la Falla Agua Blanca, descrita por primera vez por Allen et al. (1960).

Siendo esta una estructura de tipo lateral con rumbo N72°W, a lo largo de su historia ha tenido un desplazamiento aproximado de 22 Km y en una de sus ramificaciones corta al Valle de Santo Tomas, tramo en el que lleva este nombre. Esta falla es muy compleja ya que presenta geometría en abanico, su edad Mesozoico Tardío.

Los rasgos morfológicos que genera la deformación producida por la falla son muy visibles en la zona que le corresponde al acuífero de Santo Tomas ya que corta las Sierras generando Cañones, cañadas y valles con orientación NW-SE, formando facetas triangulares y valles en escalón. En el Valle Santo Tomas torna levemente su cinemática al moverse oblicuamente más que de forma lateral. Esta estructura es sumamente activa ya que se desplaza a una velocidad promedio de 4 mm/año.

#### **4.3 Geología del subsuelo**

Las unidades hidrogeológicas que constituyen el acuífero Santo Tomas son las siguientes:

**Unidad impermeable:** agrupa a las formaciones geológicas sólidas representadas por rocas ígneas extrusivas específicamente las volcánicas no diferenciadas; ígneas intrusivas como tonalitas, granodiorita y gabro; metamórficas (gneis), plutónicas y metamórficas mezcladas.

**Unidad semipermeable:** La constituyen principalmente conglomerados no consolidados y brechas de composición calcárea, así como las rocas riolíticas, brechas, andesitas y basaltos con fracturamiento.

**Unidad permeable:** Integrada por depósitos aluviales y fluviales constituidos por boleos y cantos rodados, así como arenas, gravas, gravillas y arcilla, los cuales presentan una mayor capacidad de almacenamiento.

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la geología del subsuelo y la estratigrafía del área se deduce que se trata de un acuífero **libre**, conformado por sedimentos aluviales y areniscas. Los basaltos, tobas y andesitas constituyen en superficie zonas de recarga, pero a profundidad pueden alojar acuíferos potenciales.

Las unidades de roca que presentan mayor potencial de almacenamiento son aquellas de tipo sedimentario compuestas por material granular como las arenas y areniscas localizadas hacia la zona costera, donde también se observan depósitos eólicos. Las rocas ígneas presentan alta permeabilidad y potencial de almacenamiento debido al fuerte fracturamiento y fallamiento por el que fueron afectadas, formando además la zona que recarga al acuífero.

### 5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo con las pruebas de bombeo realizadas en 1979, para algunos aprovechamientos, los valores obtenidos de transmisividad varían de  **$3.7 \times 10^{-4}$  a  $0.0024 \text{ m}^2/\text{s}$** . Mediante pruebas de bombeo (1979) se obtuvieron los parámetros observados en la tabla 2:

Tabla 2. Parámetros Hidráulicos

POZO No.11	POZO No.14	POZO No.23	POZO No.63
Q= 43.0 lps	Q= 30.0 lps	Q= 39.0 lps	Q= 5.0 lps
$\Delta S= 0.5 \text{ m}$	$\Delta S= 0.3 \text{ m}$	$\Delta S= 0.155 \text{ m}$	$\Delta S= 0.0075 \text{ m}$
T=76422.5 $\text{m}^2/\text{día}$	T=17775.0 $\text{m}^2/\text{día}$	T=17423.33 $\text{m}^2/\text{día}$	T=11850 $\text{m}^2/\text{día}$

### 5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento del acuífero únicamente se cuenta con información correspondiente al año 2008. Para las configuraciones del nivel estático 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.

## 5.4 Comportamiento hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la configuración realizada para el año 2008 se observa que la profundidad al nivel estático varía entre 1.80 a 35.2 m, localizándose las mayores profundidades al noreste del área del acuífero (figura 3), observándose un descenso gradual del nivel piezométrico hacia la costa.

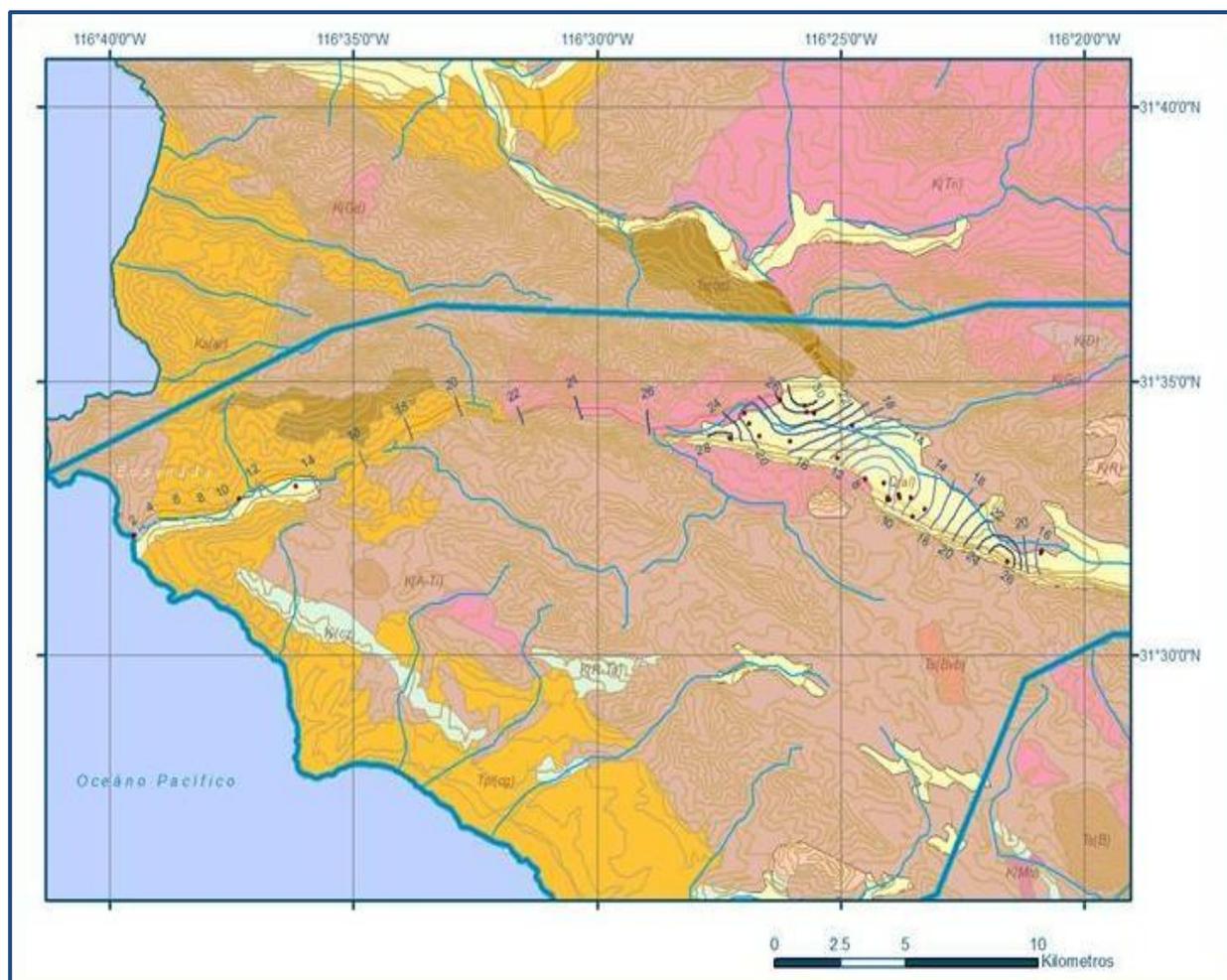


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2008)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 4), se observa que sus valores son el reflejo de la topografía, evidenciando de esta manera que el flujo subterráneo en condiciones naturales no ha sufrido alteraciones importantes causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

Los valores de elevación varían de 3.18 a 215 msnm, en el área más estrecha del acuífero las elevaciones van de 90 a 25 msnm y en las zonas cercanas a la costa la elevación es de aproximadamente 3 msnm.

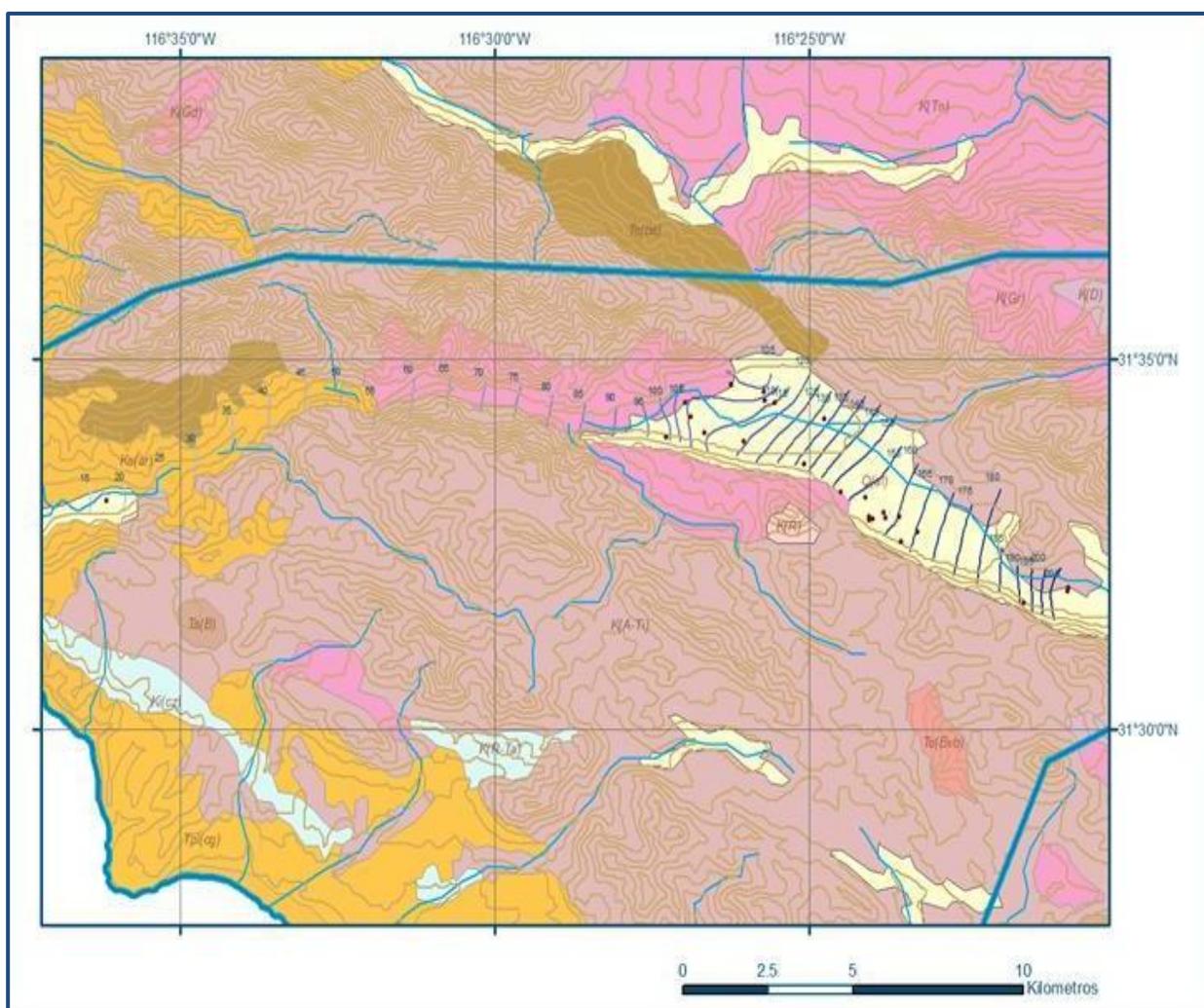


Figura 4. Elevación del nivel estático en 2008

### **5.4.3 Evolución del nivel estático**

De acuerdo con los estudios realizados se observó en el análisis de evolución del mismo para un periodo de octubre de 2007 a octubre 2008 (Figura 5).

En la parte centro y este del Valle se presentan algunos decrementos, estos coinciden con el área de mayor explotación, las mayores variaciones en el Ejido Ajusco son de -0.35m, en la zona que corresponde al Ejido Uruapan se presentan variaciones de -2.6m las cuales se deben principalmente a la topografía del terreno.

Concluyendo de este modo que la recarga se da en la porción este de la zona, en la que existe un flujo bien definido en dirección este a noroeste y suroeste.

### **5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

De acuerdo con la información de los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua que se realizaron en 1981, 1983 y 2008 para determinar la calidad del agua para riego, se midieron los siguientes parámetros, ph, CE y Temperatura.

Determinándose que el ph varía entre 7.2 y 8.3, la CE 1.250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (768 ppm aproximadamente) a 1.8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (1150 ppm aproximadamente), la temperatura va de 18.90° C a en la zona cercana a la costa y 22.7° C en la parte alta., las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 361 a 1150 ppm, de acuerdo con la clasificación de la calidad de agua de riego de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) el agua extraída se clasifica como de salinidad media ( $C_2$ ) a alta ( $C_3$ ) y contenido bajo de sodio ( $S_1$ ).

Esto indica que el agua en general es de buena calidad siendo utilizada para los diferentes usos; agrícola, doméstico, industrial y pecuario.

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

El REPDA (Registro Público de Derechos del Agua), manifiesta la existencia de 151 aprovechamientos; el volumen total concesionado dentro del acuífero es de 10.4  $\text{hm}^3$ , de este 10.2  $\text{hm}^3$  (98.3%) son para uso agrícola y el resto (1.7%) para otros usos.

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

El balance de agua subterránea se planteó únicamente para el año 2008, en una superficie de 39 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.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa se expresa como:

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

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

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

### **7.1 Entradas**

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, el riego agrícola es incipiente y utiliza sistema tecnificado, no existe recarga inducida.

### 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:

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

Donde:

**Rv:** Recarga vertical

**Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal

**B:** Bombeo

**Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal

**ETR:** Evapotranspiración real

**$\Delta V(S)$ :** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 5). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de ( $\Delta h$ ). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

**K**= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

**i** = Gradiente hidráulico ( $\Delta h / \Delta L$ )  $\Delta h$  y  $\Delta L$  son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad  $T = K \cdot a$ , la ecuación queda reducida a:

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

Donde:

**T** = Transmisividad en  $m^2 / s$ .

**B**= Longitud de la celda en m.

**i** = Gradiente Hidráulico, en m.

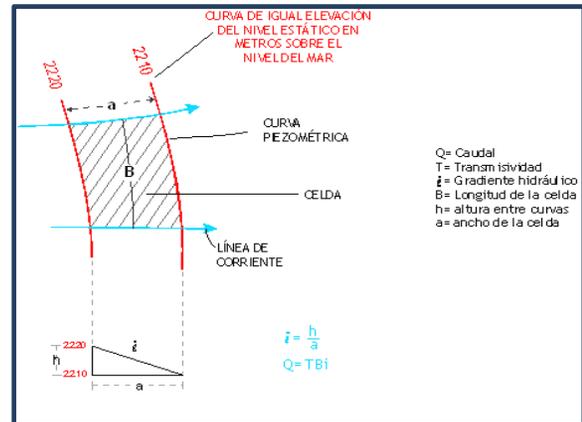


Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2008

Celda	T ( $10^{-3} m^2/s$ )	B ( $10^{-3} m$ )	i	Q1 ( $m^3 / s$ )	Voll anual ( $hm^3$ )
ENTRADAS LATERALES					
E1	8.333	1.103	0.01715	0.1577	5
E2	3.704	0.573	0.01656	0.0351	1.1

El cálculo de volumen total por entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) para el 2008 es de **6.1  $hm^3$** .

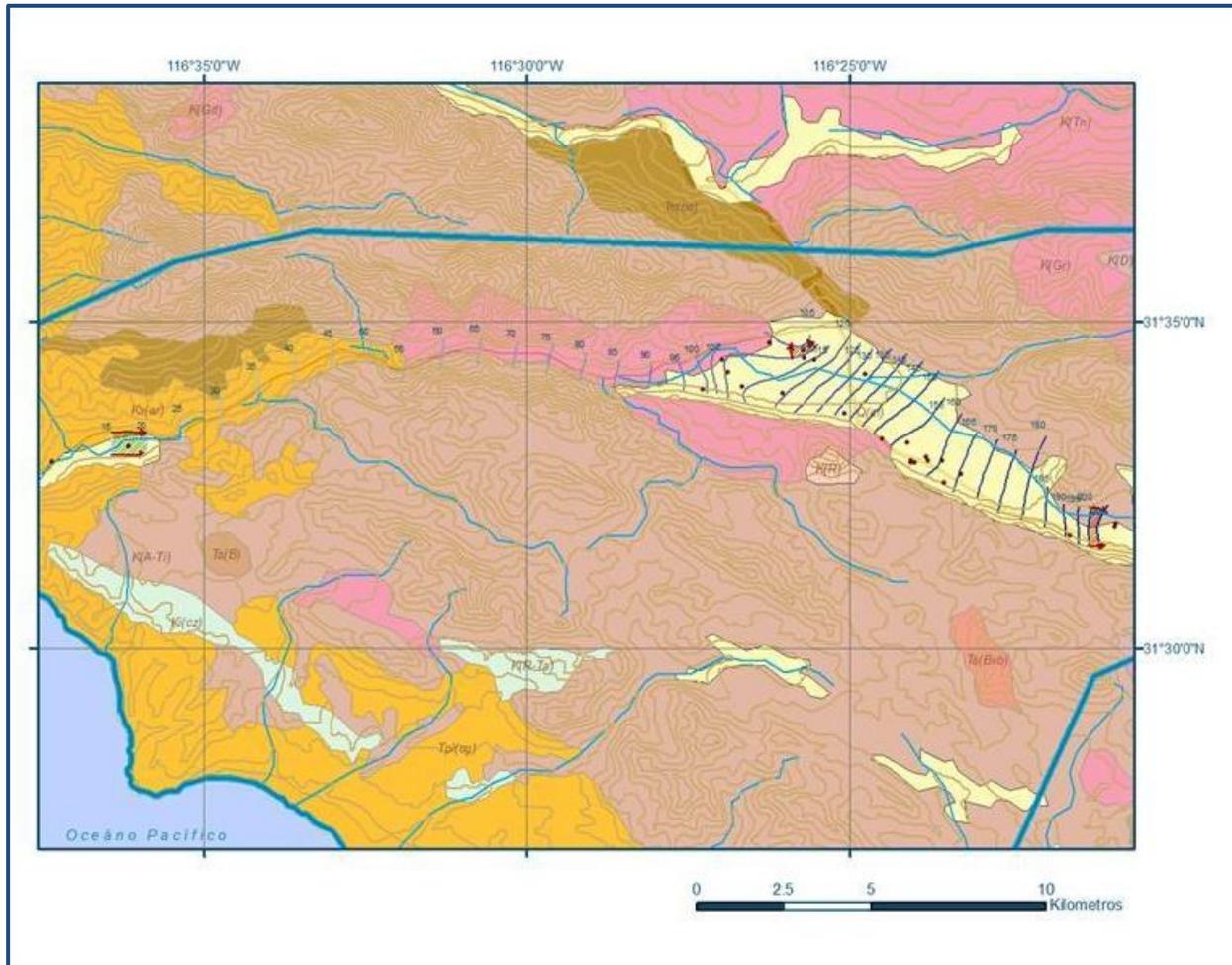


Figura 5. Red y celdas de flujo subterráneo

## 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh) y la evapotranspiración (ETR). No existen manantiales ni descarga de flujo base a lo largo del arroyo.

### 7.2.1 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, 1) la que considera el contenido de humedad en el suelo y 2) 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) son parámetros utilizados para estimar la recarga potencial por infiltración.

Esta componente está representada por la descarga de una unidad hidrogeológica a la atmósfera y tiene lugar por evaporación directa del agua freática somera o bien por la transpiración de la flora, que en esta zona no es significativa por el tipo de vegetación.

Para su cuantificación se utilizó la relación empírica de Gardner y Fireman (1958), la cual determina la tasa máxima de evaporación, a partir de las propiedades hidráulicas del medio y su granulometría. Su expresión matemática es:

$$E = K_s \left[ \frac{-a\pi}{LN(\text{sen}(\pi / N))} \right]^N$$

Donde:

$K_s$  = Conductividad Hidráulica a Saturación (cm/día).

$a$  y  $N$  = Parámetros que representan la forma del suelo. Donde  $a$  se expresa en (cm), mientras que  $N$  se considera adimensional. (adim).

$L$  = Profundidad (cm).

El área, presenta una granulometría que varía de media a gruesa, predominando el material grueso hacia la zona de costa conformada depósitos eólicos y algunos cantos rodados arrastrados a lo largo del arroyo.

En la parte sureste del Valle es más abundante la cantidad de material grueso, mientras que en la parte central hay mayor concentración de material medio. Los parámetros  $a$  y  $N$  seleccionados de acuerdo a las características descritas arriba, son de  $a = -18$  cm y  $N = 3.8$ , mientras que  $K_s = 120$  cm/día.

Con estos parámetros se construye la gráfica para la relación tasa máxima de evaporación-profundidad de influencia figura 6.

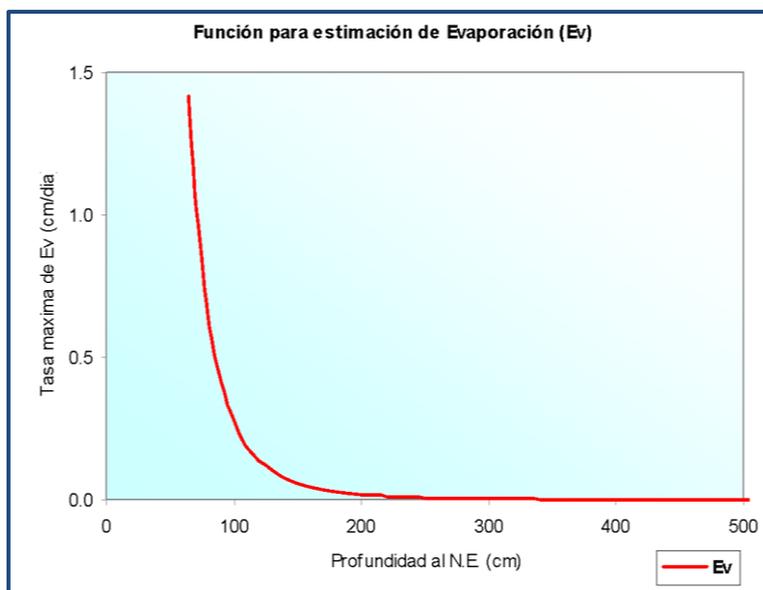


Figura 6. Relación de la tasa máxima de evaporación y profundidad de influencia

Tabla 3. Volumen de la evapotranspiración

Profundidad media al nivel estático (cm)	Área (km <sup>2</sup> )	Tasa de evaporación (mm/día)	Volumen de evapotranspiración (hm <sup>3</sup> )
2008			
100	0.13	2.76	0.13
200	0.08	0.20	0.01
300	0.17	0.04	0.00

El valor estimado de volumen para este componente para 2008 es de **0.1 hm<sup>3</sup>**.

### 7.2.2 Extracción por bombeo (B)

Esta componente se determinó de acuerdo al volumen reportado por el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), en donde se indica una concesión total de 10.4 hm<sup>3</sup>/año, siendo el 98.29% para uso agrícola con un volumen de 10.2 hm<sup>3</sup>/año, sin embargo, de acuerdo a los recorridos de campo se estimó una extracción para este uso menor, siendo esta del orden de 6.82 hm<sup>3</sup>/año, los cuales riegan una aproximado de 682.5 has con una lámina de riego de 1 m para dos ciclos agrícolas de hortalizas, considerando este volumen y el concesionado para el uso pecuario, público urbano, doméstico, industrial, servicios y usos múltiples se determinó una extracción por bombeo para los años de balance de **7.0 hm<sup>3</sup>/año**.

### 7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del NE presentada en la figura 5. El volumen de salida obtenido es de **0.4 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 4. Estimación del volumen de salida por flujo subterráneo 2008

Celda	T (10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s)	B (10 <sup>-3</sup> m)	i	Q1 (m <sup>3</sup> /s)	Vol anual (hm <sup>3</sup> )
SALIDAS LATERALES					
S <sub>1</sub>	3.472	0.626	0.0057	0.0124	0.391

### 7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cambio de almacenamiento se estimó a partir de la evolución de las elevaciones de los niveles estáticos del periodo 2007–2008. Para esta determinación se utilizaron las configuraciones de las elevaciones de los niveles estáticos, realizadas para los años mencionados, obteniendo de acuerdo a estas un cambio en el volumen almacenado de **-1.0 hm<sup>3</sup>**.

### Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 0.4 + 7.0 + 0.1 - 1.0 - 6.1$$

$$R_v = 0.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, y las entradas horizontales subterráneas.

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.4 + 6.1$$

$$R = 6.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

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, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es **6.5 hm<sup>3</sup>/año**.

### 8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. En este caso la descarga natural comprometida se considera como un porcentaje de las salidas por flujo subterráneo horizontal el cual se estimó en un 50% con un volumen de **0.2 hm<sup>3</sup> anuales**, el porcentaje se considera porque la zona no presenta un entorno ecológico el cual requiera de este recurso para sostenerse o bien mantenerse en equilibrio, por lo que se propone controlar el bombeo dentro de la zona cercana a la costa manteniendo los niveles de agua dulce por arriba del nivel del mar, para de cierta forma no incrementar la entrada de agua de mar hacia el área de explotación. **DNC = 0.2 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 (REPDA), 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 **10,610,128 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

#### **8.4 Disponibilidad de aguas Subterráneas (DAS)**

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 6.5 - 0.2 - 10.610128 \\ \text{DMA} &= -4.310128 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **4,310,128 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua. 2005. Estudio para Actualizar la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Nacionales Superficiales en las 85 (ochenta y cinco) Sub-regiones Hidrológicas de las 7 (siete) Regiones Hidrológicas de la Península de Baja California, Mediante la Aplicación de la NOM-011-CNA-2000. Universidad Autónoma de Baja California.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Península de Baja California. 2008. Estudio Técnico para determinar la Disponibilidad de las Aguas Subterráneas en 20 acuíferos del estado de Baja California, elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V.