



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO TEPENTÚ (0327), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA SUR**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica	6
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	10
4.2 Geología estructural.....	11
4.3 Geología del subsuelo.....	12
5. HIDROGEOLOGÍA.....	13
5.1 Tipo de acuífero.....	13
5.2 Parámetros hidráulicos	14
5.3 Piezometría.....	14
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	17
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	17
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	18
7.1 Entradas.....	18
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	19
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	19
7.2 Salidas.....	20
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	20
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	20
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	21
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	23
8. DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R)	24
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	24
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)	25
9. BIBLIOGRAFÍA	26

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 Tepentú, definido con la clave 0327 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-suroccidental del Estado de Baja California Sur, entre los paralelos 25°03' y 25°41' de latitud norte y los meridianos 110°51' a 111°17' de longitud oeste cubriendo una superficie de 511 km².

Colinda al norte con el acuífero Loreto, al oeste con el acuífero Santo Domingo, al sur con los acuíferos Santa Rita y Alfredo V. Bonfil y al este con el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios de Loreto y Comondú. Una pequeña porción al sur pertenece al municipio de La Paz.

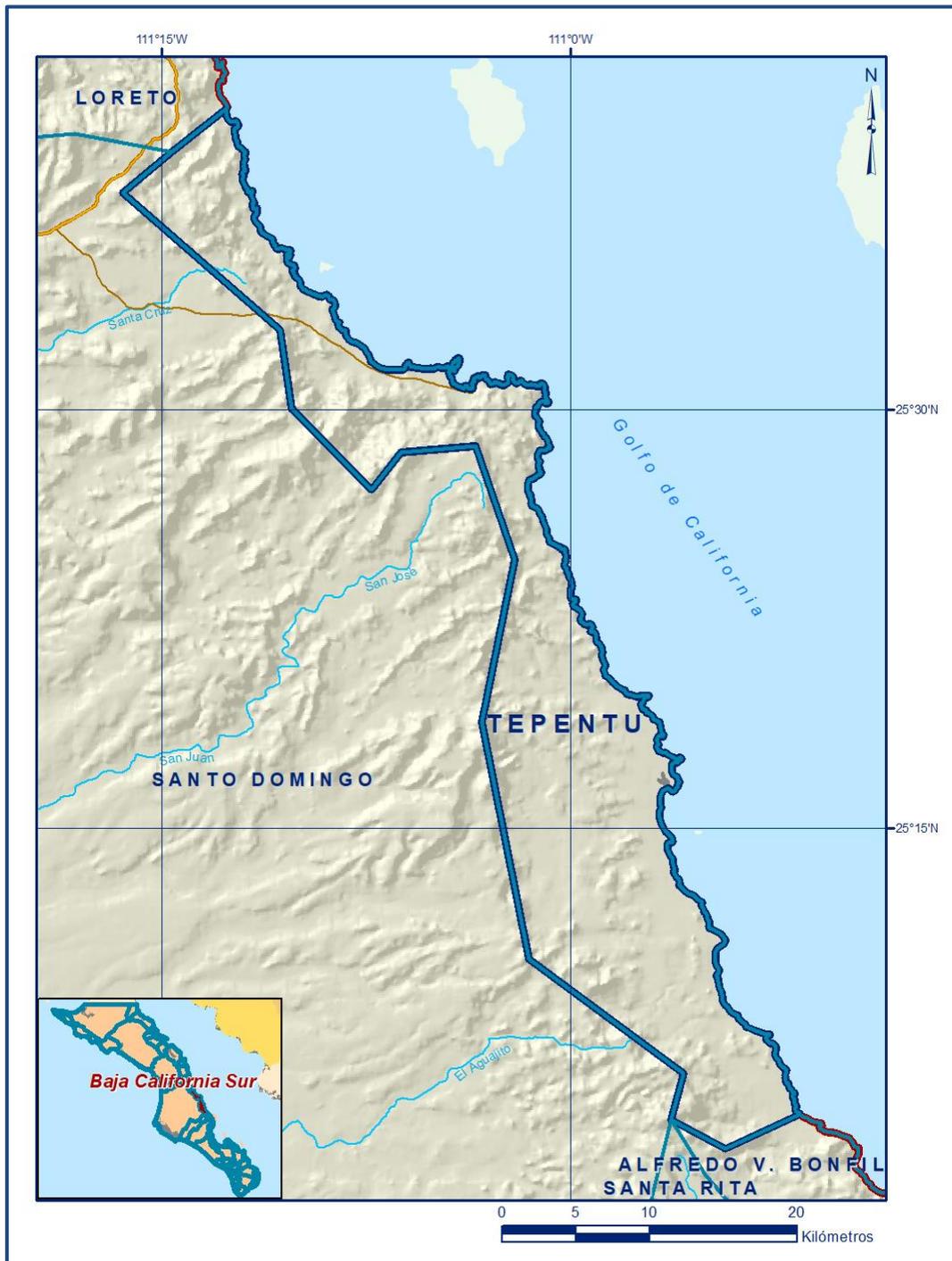


Figura 1. Localización del acuífero

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 0327 TEPENTU							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	51	34.9	25	4	43.7	
2	110	54	19.2	25	3	29.7	
3	110	56	18.6	25	4	31.5	
4	110	55	52.9	25	6	10.7	
5	111	1	32.8	25	10	18.5	
6	111	3	16.4	25	18	47.6	
7	111	2	3.8	25	24	37.6	
8	111	3	30.2	25	28	42.6	
9	111	6	14.8	25	28	28.4	
10	111	7	18.7	25	27	9.1	
11	111	10	14.3	25	30	4.0	
12	111	10	39.6	25	32	54.2	
13	111	16	27.0	25	37	48.9	
14	111	14	39.4	25	39	16.7	
15	111	12	36.9	25	40	50.1	DEL 15 AL 1 POR LA LINEA DE BAJ AMARA LO LARGO DE LA COSTA
1	110	51	34.9	25	4	43.7	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tepentú pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Baja California Sur. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del “Acuerdo que establece el Distrito Nacional de Riego de Baja California Sur, declarando de utilidad pública la construcción de las obras que lo forman”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de julio de 1954. Esta veda se clasifica como 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 4.

El usuario principal es el doméstico. No existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero no se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación. Únicamente se cuenta con información geológica y estratigráfica a nivel regional de las cartas geológico-mineras editadas por el Consejo de Recursos Minerales

(hoy Servicio Geológico Mexicano), así como algunos estudios geohidrológicos en acuíferos vecinos. Entre los más recientes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO FOTOGEOLOGICO EN LA ZONA DE CUENCA DE TEPENTÚ, B.C.S., elaborado por la empresa Fotoin, S.A. en 1981. El objetivo de este estudio fue evaluar la posibilidad de perforar pozos para dotar de agua a las comunidades de la región. Concluye que en la región existe reducida disponibilidad de agua, debido a la escasa precipitación con lluvias torrenciales, altas temperaturas y fuerte evaporación que repercute en el escaso potencial hidráulico subterráneo.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA CUENCA KM 130-LAS POCITAS-SAN HILARIO. Elaborado por la empresa Técnicos y Asesores Constructores S.A (TACSA) en 1981. Su objetivo fue conocer la geometría del acuífero, su disponibilidad, condición de explotación y la calidad del agua subterránea.

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALFREDO V. BONFIL, B.C.S. Elaborado por Clarión, S.A. Planeación de Agua en 1988. Su principal objetivo fue seleccionar zonas adecuadas para la perforación de pozos y la identificación de sitios propicios para la construcción de obras para el almacenamiento de aguas superficiales. Los resultados indican que dadas las características fisiográficas e hidrográficas del área, se puede dividir en dos zonas: Zona Norte y Zona Sur. La Zona Norte tiene una topografía con gradientes fuertes hacia el mar; la zona sur, en cambio, presenta zonas de planicie costera con pendientes menores muy suaves.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE SAN JUAN B. LONDÓ Y LORETO, B.C.S., elaborado por la empresa Lesser y Asociados, S.A. de C.V, en 2006. Este estudio tuvo como objetivo actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos con el objeto de establecer un diagnóstico de la evolución de los niveles del agua y contar con la información geohidrológica necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea. Las actividades realizadas durante este estudio incluyeron el censo de aprovechamientos, pruebas de bombeo, sondeos electromagnéticos y análisis fisicoquímicos a la muestra de agua subterránea.

CENSO DE APROVECHAMIENTOS SUBTERRÁNEOS EN EL ACUÍFERO ROSARITO, B.C.S. Realizado por la Subdirección de Asistencia Técnica Operativa, Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua en Baja California Sur en 2010 con la finalidad de

medir la profundidad de los niveles estáticos en los pozos existentes y obtener muestras de agua subterránea para determinar la conductividad eléctrica y la salinidad.

Sus resultados indican que las concentraciones de STD del agua subterránea sobrepasan los valores permitidos para el agua destinada al consumo humano

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de las Provincias fisiográficas del INEGI, el acuífero se encuentra ubicado dentro de la Provincia Península de Baja California, Subprovincia Sierra La Giganta.

La Provincia Península de Baja California está ubicada en el noroeste de la República Mexicana y ocupa desde el norte del paralelo 32, hasta el sur del paralelo 23; en esta última localización se ubica la región de San José del Cabo, más allá del Trópico de Cáncer. Dicha provincia se extiende a lo largo de 1333 km, con un rumbo noroeste-sureste. Las cumbres más elevadas se encuentran en las sierras de la porción norte, donde las elevaciones varían entre los 2,000 y 3,000 msnm.

La Subprovincia Sierra La Giganta forma parte de la cordillera peninsular cuya topografía se caracteriza por presentar elevaciones máximas del orden de 800-1200 msnm y está conformada por rocas volcánicas en forma de mesetas inclinadas hacia el Océano Pacífico y altas crestas hacia el Golfo de California. Las mesetas están cubiertas por derrames basálticos en las zonas altas, a diferencia de las zonas medias e inferiores donde predominan aglomerados y derrames lávicos. En general, el tipo de vegetación de mayor distribución es el matorral sarcocaulé, mientras que los suelos existentes son vertisoles.

3.2 Clima

Con base en los datos históricos de las estaciones climatológicas Ligüi, El Huatamote, Poza de León y La Angostura, con periodo de análisis de 1978-200, ubicadas en la zona aledaña que rodea al acuífero, con apoyo en la carta de climas de Köppen, modificada por E. García para las condiciones de nuestro país adaptada a la Región Hidrológica No.6, se establece que en la zona prevalece el grupo de climas desérticos cálidos Bw(h') hw (x') (e') de tipo desértico cálido, muy cálido con régimen de lluvias en verano, cuya característica principal es lo extremoso de sus temperaturas diurnas y la gran sequedad ambiental, por lo que se considera de tipo caluroso extremoso. Esto se debe a la interacción de diversos factores: latitud, relieve y las corrientes marinas del Golfo de California.

Con los datos de estas estaciones, se establece que la temperatura media anual es de 23.1°C, la máxima de 48°C registrada en el mes de julio y la mínima de -2°C en el mes de febrero. La precipitación varía entre 205 a 254 mm anuales, con un valor promedio de 229.3 mm/año, con precipitaciones máximas extremas de 510.5 mm en el mes de septiembre.

La temporada de lluvias se presenta durante el verano y el invierno en periodos de corta duración, de septiembre a diciembre. El valor de la evaporación potencial media es de 1940 mm, de acuerdo con los datos de las estaciones climatológicas Poza de León y Loreto.

3.3 Hidrografía

El acuífero Tepentú pertenece a la Región Hidrológica 6, Baja California Sur-Este (La Paz). Forma parte de la Cuenca Isla Coronado-Bahía La Paz, correspondiente a la vertiente que drena hacia el Golfo de California, que incluye a los acuíferos de toda la porción sureste del estado, desde Bahía Concepción hasta llegar a Cabo San Lucas.

La región se caracteriza por presentar condiciones de régimen de lluvias en verano con valores bajos de precipitación y escasez natural de agua, que ocasionalmente se ven alteradas debido a la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos debido a la incidencia de tormentas tropicales y huracanes. En ambos casos, los escurrimientos superficiales son de tipo intermitente que generalmente desaparecen por infiltración hacia la planicie costera.

Existen numerosos arroyos de poca importancia que descienden de la sierra y se pierden en la planicie, como son: San Carlos, Salsipuedes, San José, Tembabichi, Santa Martha y San Mateo. No existen estaciones hidrométricas, ni infraestructura hidráulica para el almacenamiento de las corrientes superficiales. En general el patrón de drenaje en el área de estudio presenta variaciones relacionadas con la litología y la topográfica; predominan los patrones paralelo y dendrítico.

3.4 Geomorfología

De acuerdo a los rasgos geomorfológicos expuestos en el área, se infiere que se trata de un bloque levantado cuya pendiente hacia el poniente es mucho más suave que hacia el Golfo de California. Se distinguen 3 unidades geomorfológicas que denotan madurez temprana: sierras, mesetas y bajadas con lomeríos.

La sierra se manifiesta en la parte oeste del acuífero con elevaciones que sobrepasan los 1,100 msnm. Sus pendientes son fuertes y están constituidas por rocas de origen volcánico, en ellas nacen todos los arroyos, los cuales presentan drenaje recto y dendrítico con cauces regularmente estrechos y profundos.

Las mesetas están constituidas generalmente por rocas volcánicas, especialmente basaltos, tobas y brechas volcánicas en el extremo oeste del acuífero.

El drenaje es dendrítico y paralelo, debido a que en esta zona aún existe baja pendiente lo que origina cauces poco profundos.

Las bajadas con lomeríos están constituidas principalmente por rocas sedimentarias, que debido a su bajo grado de compactación presentan menor competencia ante los agentes erosivos. Estos rasgos fisiográficos y geomorfológicos limitan el desarrollo de un acuífero debido a la presencia de la vertiente oriental de la Sierra La Giganta, con pendientes fuertes y muy cercanas a la línea de costa.

4. GEOLOGÍA

La geología general del acuífero está representada por rocas ígneas intrusivas del Cretácico, rocas terciarias de la Formación El Cien y Comondú sobreyacidas por depósitos cuaternarios (figura 2).

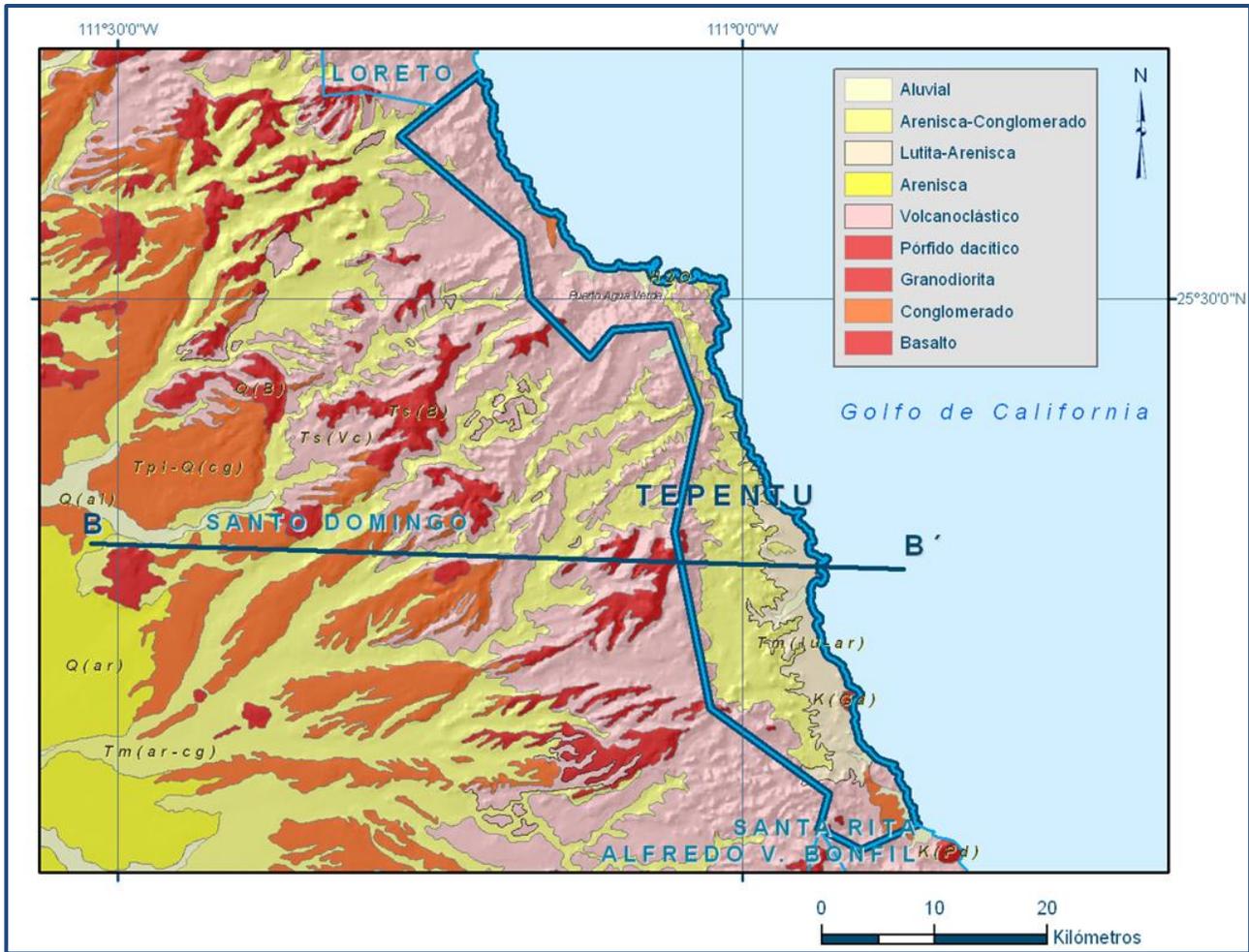


Figura 2. Geología general del acuífero

Las rocas cretácicas consisten principalmente en granodioritas, el Terciario está representado por la Formación El Cien, conformada por una secuencia sedimentaria constituida principalmente por sedimentos marinos como areniscas, limolitas y lutitas. La sedimentación fue controlada por el levantamiento relativo del nivel del mar y una fuerte influencia terrígena.

La Formación Comondú está compuesta por rocas volcánicas, piroclásticas y vulcanoclasticas que ocupan las dos terceras partes de la ladera oriental de la Sierra La Giganta, la cual está conformada por más de 1,200 m de espesor de estos sedimentos que se depositaron sobre las rocas graníticas del batolito peninsular. Del Cuaternario se tienen terrazas constituidas por materiales recientes, aluvión y material eólico.

4.1 Estratigrafía

Rocas ígneas intrusivas

Están representadas por granodioritas consideradas como parte del batolito peninsular, discordantemente sobreyacidas por rocas sedimentarias y volcánicas de la Formación El Cien y Comondú respectivamente. Se encuentran expuestas al sur de Tembabiche, sobre los márgenes de los arroyos Salsipuedes y Montalva.

Formación El Cien

La Formación El Cien (antes llamada Formación San Gregorio y Formación San Isidro) tiene una edad del Oligoceno Superior a Medio Inferior. Está compuesta de sedimentos marinos clásticos con un espesor que varía de 125 a 175 m y consiste en los miembros San Juan y Cerro Colorado (Fischer *et al.* 1995).

El Miembro San Juan está compuesto por rocas tobáceas y frecuentemente por lutitas, areniscas, limolitas fosfáticas, conglomerados y tobas, reflejando un ambiente de depósito que se extiende desde la costa hasta la plataforma abierta.

El Miembro Cerro Colorado está compuesto por areniscas conglomeráticas intercaladas con areniscas coquinoides, limolitas, areniscas con fosfato retrabajado y en menor proporción lutitas silicificadas con horizontes de tobas.

Otros autores se refieren a la Formación El Cien como Formación San Isidro y la describen integrada por una secuencia de rocas sedimentarias de origen marino y vulcanosedimentarias de origen continental de un típico color verdoso.

La sedimentación fue controlada por el levantamiento relativo del nivel del mar y una fuerte influencia terrígena. Los principales afloramientos encontrados se ubican dentro de la zona que comprende desde el arroyo San Francisquito, ubicado al sur de Santa Martha, hasta el arroyo San José en la parte sur del acuífero.

Formación Comondú

La Formación Comondú aflora formando la Sierra La Giganta cuyo origen se asocia a un arco volcánico del Oligoceno-Mioceno (Heim Arnold, 1922). Está constituida por una alternancia de materiales volcánicos y sedimentarios que incluyen areniscas, conglomerados, brechas volcánicas, andesitas y tobas. Las areniscas se presentan bien consolidadas y compactas, en tanto que los conglomerados están constituidos por fragmentos redondeados, de origen ígneo, empacados en arenas.

Ambas litologías se encuentran complejamente interestratificadas e intrusionadas por diques de composición intermedia y básica. Las tobas y brechas presentan una composición predominantemente básica. Las brechas están constituidas por una mezcla de fragmentos, empacadas en una matriz tobácea, intrusionadas por diques. Constituye la mayor parte de las elevaciones topográficas que corresponden a la Sierra La Giganta. Presenta una estratificación casi horizontal, con una sensible inclinación hacia el poniente. Su espesor se estima en más de 1,200 metros.

La Formación fue dividida en dos unidades por Federico Mina (1957). La primera formada por rocas piroclásticas y volcánicas, presenta composición andesítica, basáltica y riolítica, así como conglomerados lenticulares y brechas de talud. La segunda unidad, que subyace a la anterior, está formada principalmente por conglomerados, areniscas y ocasionales argilitas.

Hausback (1984) restringe el nombre de Formación Comondú al arco miocénico representado por rocas volcánicas y vulcanoclásticas que conforman la mayor parte de la Sierra La Giganta. La distribución de los afloramientos de la Formación Comondú se encuentra cubriendo la totalidad de la zona de las sierras y mesetas ubicadas dentro del acuífero.

Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios que se encuentran expuestos en la zona están constituidos por terrazas, materiales de acarreo, rellenos aluviales y sedimentos eólicos en la zona cercana a la costa y planicies de inundación (sabkas). Las terrazas están constituidas por materiales arenosos y conglomerados.

Los materiales de acarreo están constituidos por gravas, arenas gruesas y materiales de boleo ubicados en los cauces de los arroyos principales.

Los rellenos aluviales están conformados principalmente por arenas, gravas, limos y arcillas, así como las dunas cercanas a la línea de costa.

4.2 Geología estructural

La historia tectónica del Golfo de California y provincias peninsulares es muy compleja debido al hecho de estar ubicadas sobre una margen continental que ha sido afectada por varios procesos de convergencia y divergencia.

Sin embargo, dos importantes eventos tectónicos regionales están expuestos en el área. Uno corresponde a la Orogenia Laramide (Cretácico Superior), responsable del movimiento compresivo producto del choque de la Placa Farallón con la Placa Norteamericana, lo que dio origen a la intrusión de grandes masas ígneas (parte del Batolito Peninsular), que presentan rasgos producidos por esfuerzos compresivos que generaron una deformación cataclástica dúctil que pudo haber iniciado durante la fase terminal de la Orogenia Laramide, al final del Cretácico y que probablemente se reactivó con los posteriores procesos extensivos.

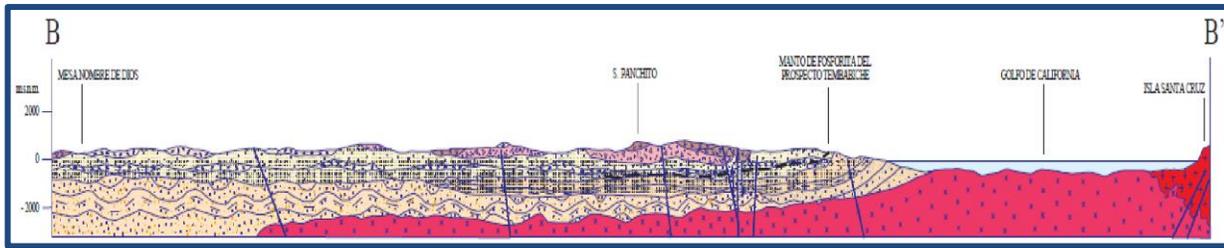
Un segundo evento tectónico se desarrolló del Mioceno Medio al Plioceno Temprano, cuando ocurrió la configuración del límite entre la Placa Pacífica y la Placa Norteamericana, lo que dio origen al Golfo de California, por medio de movimientos oblicuos extensionales con orientación NW-SE, modelando de esta manera un relieve peninsular gobernado por bloques escalonados, con sensible basculamiento hacia el poniente y fallas laterales dextrales. Este periodo es muy importante en la región ya que se le asocia a la intrusión de estructuras tabulares de diferente composición.

Dentro de la superficie del acuífero se encuentra la Falla La Giganta con dirección NW-SE casi N-S, con pequeños cambios de dirección hacia el NE.

Abarca desde el sur de Tembabichi hasta la localidad de Agua Verde, para después perderse en el golfo de California, al sur de la ciudad de Loreto. Los lineamientos y fallas existentes presentan dirección preferencial NE-SW que en ocasiones definen la dirección de red de drenaje de algunos arroyos. Los lineamientos y fallas son más dominantes en la zona serrana de la región de San Cosme y Santa Martha.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de los cortes litológicos de pozos y las evidencias de campo es posible definir que el acuífero se aloja en los sedimentos aluviales y fluviales provenientes de la erosión de las partes altas de la Sierra La Giganta, que han sido transportados por los escurrimientos superficiales y depositados en los cauces de los arroyos y en la planicie costera. Su espesor se considera que es sólo algunos metros y conforma un acuífero de baja capacidad de almacenamiento (figura 3), que es el que actualmente se explota. El acuífero se encuentra bordeado por las rocas volcánicas impermeables de la Formación Comondú, que generalmente funcionan como barreras laterales e inferiores.



Fuente: SGM (2002). Carta geológico-Minera G-12-5 Loreto, escala 1:250,000

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica y piezométrica, es posible identificar que el acuífero es de tipo **libre** y está constituido por sedimentos aluviales y fluviales depositados tanto en los subálveos de los arroyos como en la planicie costera. La mayoría de los aprovechamientos han alcanzado las facies permeables de los depósitos de material aluvial depositados por la erosión de las partes altas de la Sierra La Giganta. La permeabilidad del acuífero es media a alta, pero se considera que su potencial es pobre debido a que su escaso espesor y reducidas dimensiones le confieren muy baja capacidad de almacenamiento. La distribución y composición de estos sedimentos es muy variada de acuerdo con su ubicación.

La recarga que recibe el acuífero procede de la infiltración directa de la lluvia, así como por la infiltración del agua superficial que escurre a través de los arroyos intermitentes, durante la época de lluvias. La descarga se produce de manera natural por flujo subterráneo hacia el mar y por evapotranspiración en zonas que presentan niveles freáticos someros; de manera artificial se efectúa por medio de la extracción por bombeo.

Es importante destacar que no existen condiciones geomorfológicas que permitan el desarrollo de un acuífero de importancia, debido a que la zona montañosa está muy próxima a la línea de costa.

Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es bajo, la presencia ocasional de fenómenos hidrometeorológicos como; huracanes, tormentas tropicales, depresiones y lluvias de temporada, tienen un efecto muy importante sobre la recarga subterránea al acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

En la superficie que cubre el acuífero no se han realizado pruebas de bombeo para determinar las características hidráulicas del acuífero. Sin embargo, por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos San Juan B. Londó, Loreto y Las Pocitas-San Hilario con características litológicas y evolución geológica similar, es posible adoptar valores característicos de transmisividad.

De esta manera, los valores promedio de transmisividad, adaptados a la geología y espesor saturado, pueden variar entre **0.5×10^{-3} a $3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , aunque hacia los cauces de los arroyos se pueden incrementar debido a la mayor granulometría de los depósitos.

5.3 Piezometría

Con respecto a la información piezométrica, no existe registro histórico en el acuífero, sólo se dispone de información para 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010 (figura 4), se puede observar que los valores varían de 3 a 12 m para los aprovechamientos localizados a lo largo del acuífero.

La zona de menor profundidad al nivel del agua se encuentra en el rancho San Carlos, localizado en la desembocadura del arroyo del mismo nombre, mientras que los niveles más profundos se registraron en la localidad de Agua Verde.

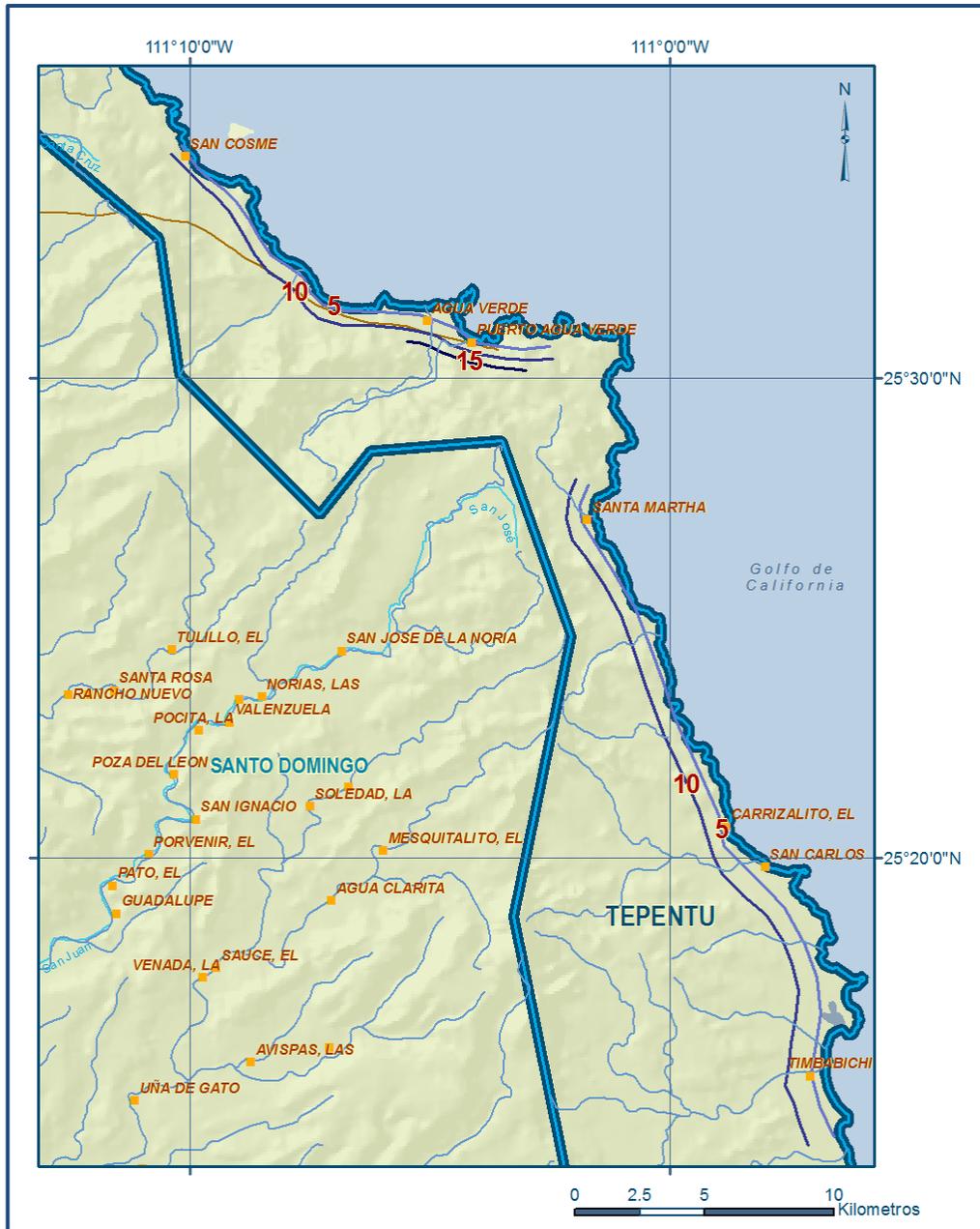


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Para el año 2010 la elevación del nivel estático (figura 5) al igual que la profundidad, muestra claramente el reflejo de la topografía, con los valores más bajos hacia la zona costera, los cuales se incrementan gradualmente hacia las estribaciones de la sierra, mostrando de esta manera que la dirección preferencial del flujo subterráneo es hacia el Este, para descargar en el mar, en sentido paralelo a la dirección del escurrimiento de los arroyos.

Esto es una evidencia de que el flujo subterráneo no ha sufrido modificaciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

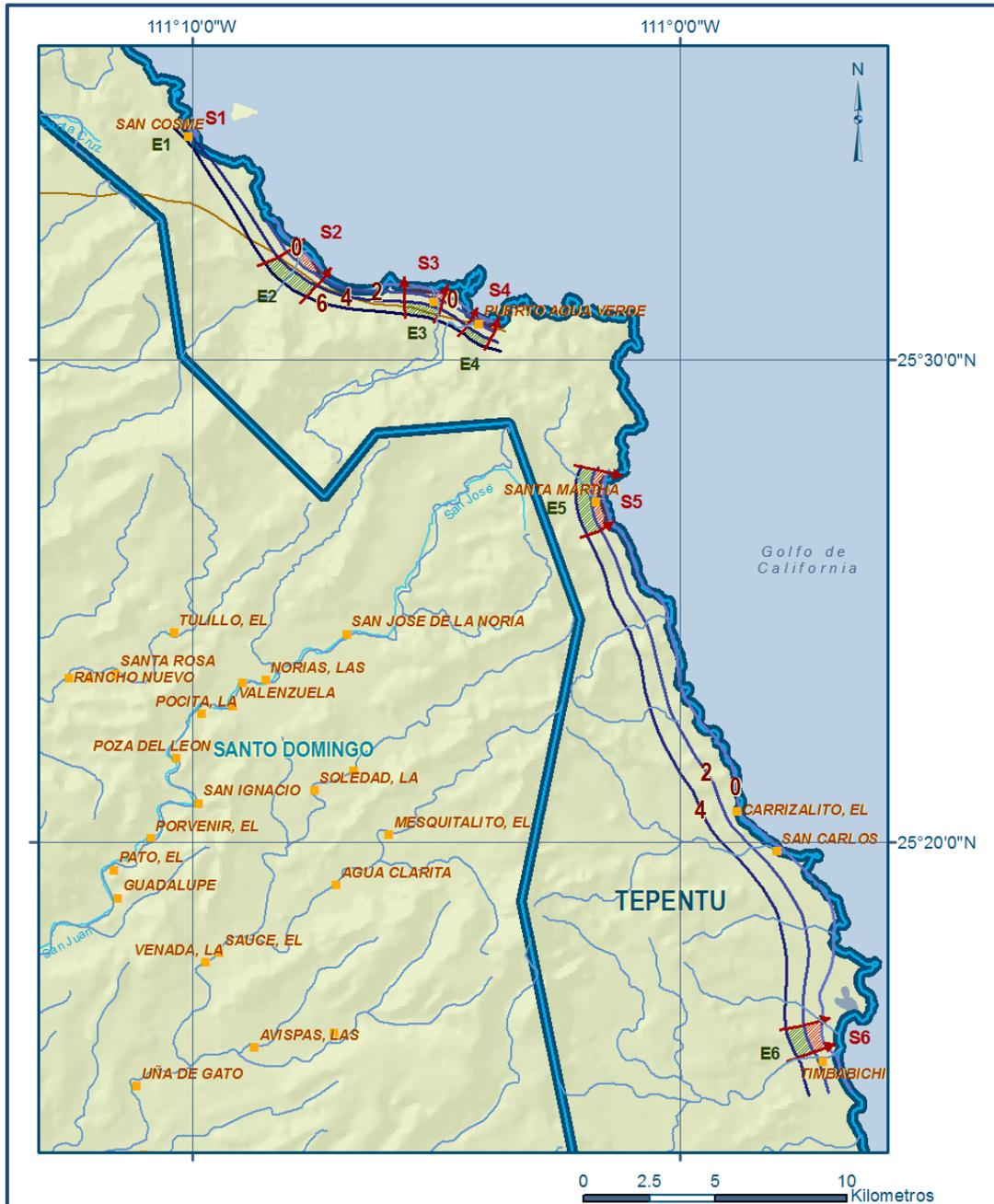


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita la configuración.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas se encuentran dispersas y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que los niveles del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En el área que cubre el acuífero, no existen antecedentes de muestreos de agua subterránea para su análisis químico, la única información que se tiene es la realizada en 2010. Como parte de los trabajos de campo realizados, se tomaron 15 muestras de agua para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las mediciones hechas en laboratorio incluyeron; conductividad eléctrica, pH, dureza total, alcalinidad 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) en su totalidad sobrepasan el valor máximo permisible de 1000 mg/lit establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua".

Por otra parte, los valores de conductividad eléctrica del agua varían de 1454 $\mu\text{mhos/cm}$, que se registraron en Tembabichi, a 11770 $\mu\text{mhos/cm}$ que se registraron en la localidad de Agua Verde, localizado en margen este del acuífero.

De manera general, las concentraciones se incrementan de la parte alta del acuífero hacia la costa, en la dirección del flujo subterráneo. Las concentraciones más altas se deben a la influencia de la zona costera. En esta región, aunque la salinidad puede estar asociada con su cercanía al mar, uno de los factores claves para explicar el descenso de la calidad del agua se relaciona directamente con la presencia de las areniscas y lutitas de origen marino en la secuencia geológica inferior de la cuenca.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua en Baja California Sur en el 2010, se registraron un total de 21 aprovechamientos, de los cuales 18 están activos y los 3 restantes inactivos.

Los aprovechamientos activos se destinan principalmente para uso pecuario y doméstico.

En conjunto el volumen de extracción asciende a **0.1 hm³ anuales**, de los cuales 0.04 hm³ (40%) se destinan para satisfacer las necesidades del uso doméstico, 0.05 hm³ (50%) para agrícola y los 0.01 hm³ restantes (10%) para dotación de agua potable a la de población de Tembabiche.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2010, en una superficie de 112 km² en la que están dispersos los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o 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:

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

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 del acuífero:

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

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 los sedimentos arenosos de las formaciones que la constituyen y a lo largo de los escurrimientos (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 otras fuentes 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 y el riego agrícola es incipiente, no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), 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 subterráneas por flujo horizontal;

B= Bombeo;

Sh= Salidas subterráneas por flujo horizontal;

ETR= Evapotranspiración real;

$\Delta V(S)$ = Cambio en el volumen almacenado;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La recarga del acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre las zonas topográficamente más altas del área de estudio y por la infiltración de los escurrimientos superficiales. El agua se infiltra por las fracturas de las rocas 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, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el 2010 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

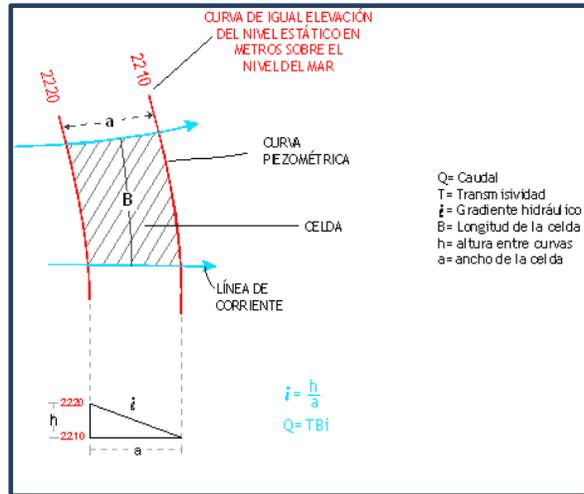
Donde:

Q= gasto;

T= transmisividad;

B= largo de la celda;

i= gradiente hidráulico;



Con base en las configuraciones de elevación del nivel estático para el año 2010 se seleccionaron las celdas de entrada de flujo subterráneo de acuerdo a la geología (figura 5). Los caudales de entradas por flujo subterráneo horizontal calculado se muestran en la tabla 2. La entrada subterránea promedio anual es de **2.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2010)

Canal	Largo (B) (m)	Ancho (a) (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente Hidráulico i	T (m ² /s)	Caudal Q (m ³ /s)	Volumen (hm ³ /año)
E1	590	210	2	0.009524	0.002	0.01124	0.4
E2	1990	540	2	0.003704	0.003	0.02211	0.7
E3	1250	450	2	0.004444	0.003	0.01666	0.5
E4	1070	300	2	0.006667	0.003	0.02140	0.7
E5	2650	510	1	0.001961	0.002	0.01039	0.3
E6	1220	610	1	0.001639	0.003	0.00600	0.2
Total de entradas =							2.8

7.2 Salidas

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **0.1 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del año 2010, mostrada en la figura 5. Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación, hacia el mar.

El valor estimado para cada año de análisis se muestra en la tabla 3. El valor promedio anual de las salidas subterráneas es de **2.7 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2010)

Canal	Largo (B) (m)	Ancho (a) (m)	h ₂ - h ₁ (m)	Gradiente Hidráulico i	T (m ² /s)	Caudal Q (m ³ /s)	Volumen (hm ³ /año)
S1	430	140	2	0.0114286	0.002	0.012286	0.4
S2	1410	420	2	0.004762	0.003	0.020143	0.6
S3	1360	310	2	0.006452	0.003	0.026322	0.8
S4	890	310	2	0.006452	0.002	0.011484	0.4
S5	2050	460	1	0.002174	0.002	0.008913	0.3
S6	1120	520	1	0.001923	0.003	0.006461	0.2
Total de entradas =							2.7

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, se considera 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).

Aunque el valor de la evapotranspiración se estima que es pequeño en este acuífero, dada la escasez natural del agua, se consideró importante estimar su valor para incluirlo en la recarga total que recibe el acuífero. Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

T (°C) =	23.10	P ² =	52578.49
P(mm) =	229.30	L ² =	2231496.848
L =	1493.82		
ETR (mm) =	238.60		

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L.

Entonces, debido a que la precipitación resultó menor que la relación $0.31L = 463.08$, el valor de la evapotranspiración real debe despreciarse, ya que su valor resulta mayor valor de la precipitación.

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 a 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 6).

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE menor a 3 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas Poza de León y Loreto con promedio de **1940 mm** del valor registrado.

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 5 se deduce que para una profundidad al NE de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%. Considerando una superficie promedio de **27 km²** de la porción costera del acuífero, donde la PNE es menor a los 2 m, y un 2% de la evaporación potencial, la evaporación es del orden de los **1.0 hm³**.

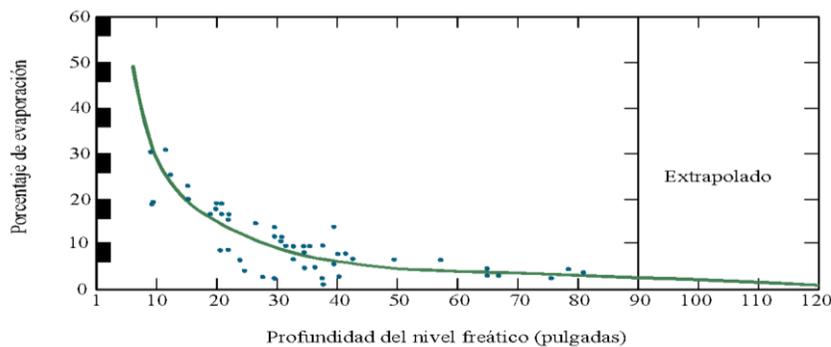


Figura 6. Evaporación del AS expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático

Evaporación potencial media anual (m)	Área (km ²)	% de la Evaporación Potencial	Volumen Evaporación (hm ³ /año)
1.94	27	0.02	1

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 necesaria para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes solo son para el presente año y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

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

Solución de 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:

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

$$R_v = 0.1 + 2.7 + 1.0 - 0.0 - 2.8$$

$$R_v = 1.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h = 1.0 + 2.8$$

$$R = 3.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **3.8 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Tepentú se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de **2.7 hm³ anuales**, que corresponden a la salida por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interface marina. No se considera comprometida la descarga por evaporación porque se trata de agua de mala calidad, que no está sujeta al otorgamiento de concesiones.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de agua subterránea 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 (REPGA), 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 **7,788 m³ 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 media anual de aguas subterráneas (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 3.8 - 2.7 - 0.007788 \\ \text{DMA} &= 1.092212 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,092,212 m³ anuales**.

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

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2006. Actualización Geohidrológica de los Acuíferos San Juan B. Londó y Loreto, B.C.S.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1981. Estudio Fotogeológico en la Zona de la Cuenca de Tepentú, B.C.S. Realizado por la empresa Fotoin, S.A.