



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SAN SIMÓN (0246), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
	1.1 Localización.....	2
2	SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DEL ACUÍFERO.....	4
3	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
4	FISIOGRAFÍA.....	8
	4.1 Provincia Fisiográfica.....	8
	4.2 Clima.....	8
	4.3 Hidrología superficial.....	9
	4.4 Geomorfología.....	10
5	GEOLOGÍA.....	11
	5.1 Estratigrafía.....	14
	5.2 Geología estructural.....	19
	5.3 Geología del Subsuelo.....	20
6	HIDROGEOLOGÍA.....	20
	6.1 Tipo de acuífero.....	20
	5.1 Parámetros hidráulicos.....	22
	7.2 Piezometría.....	22
	5.3 Comportamiento hidráulico.....	22
	5.3.1 Profundidad al nivel estático.....	22
	5.3.2 Elevación del nivel estático.....	23
	5.3.3 Evolución del nivel estático.....	24
	5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
7	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	27
8	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	28
	7.1 Entradas.....	28
	7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	29
	7.1.1 ENTRADAS POR FLUJO SUBTERRÁNEO HORIZONTAL (AGUA DULCE) (EHD) 29	
	7.1.2 Entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal (Ehs).....	30
	8.2 Salidas.....	31
	8.2.1 Bombeo (B).....	31
	8.2.2. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb).....	31
	8.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	31
	8.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	32
9	DISPONIBILIDAD.....	33
	8.1 Recarga total media anual (R).....	34
	8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	34
	8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS).....	34
	8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DMA).....	35
9	BIBLIOGRAFÍA.....	36

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 San Simón, definido con la clave 0246 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza geográficamente en la porción centro occidental del Estado de Baja California, entre los paralelos 30°20' y 30° 45' de latitud norte y los meridianos 115° 10' y 115° 56' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,967 km².

Limita al norte con el acuífero Colonia Vicente Guerrero; al este con Valle Chico-San Pedro Mártir; al sur con El Socorro y El Rosario; al noroeste y oeste con el acuífero San Quintín; al suroeste su límite es el Océano Pacífico (figura 1). Geopolíticamente, la superficie del acuífero se encuentra en su totalidad dentro del municipio de Ensenada.

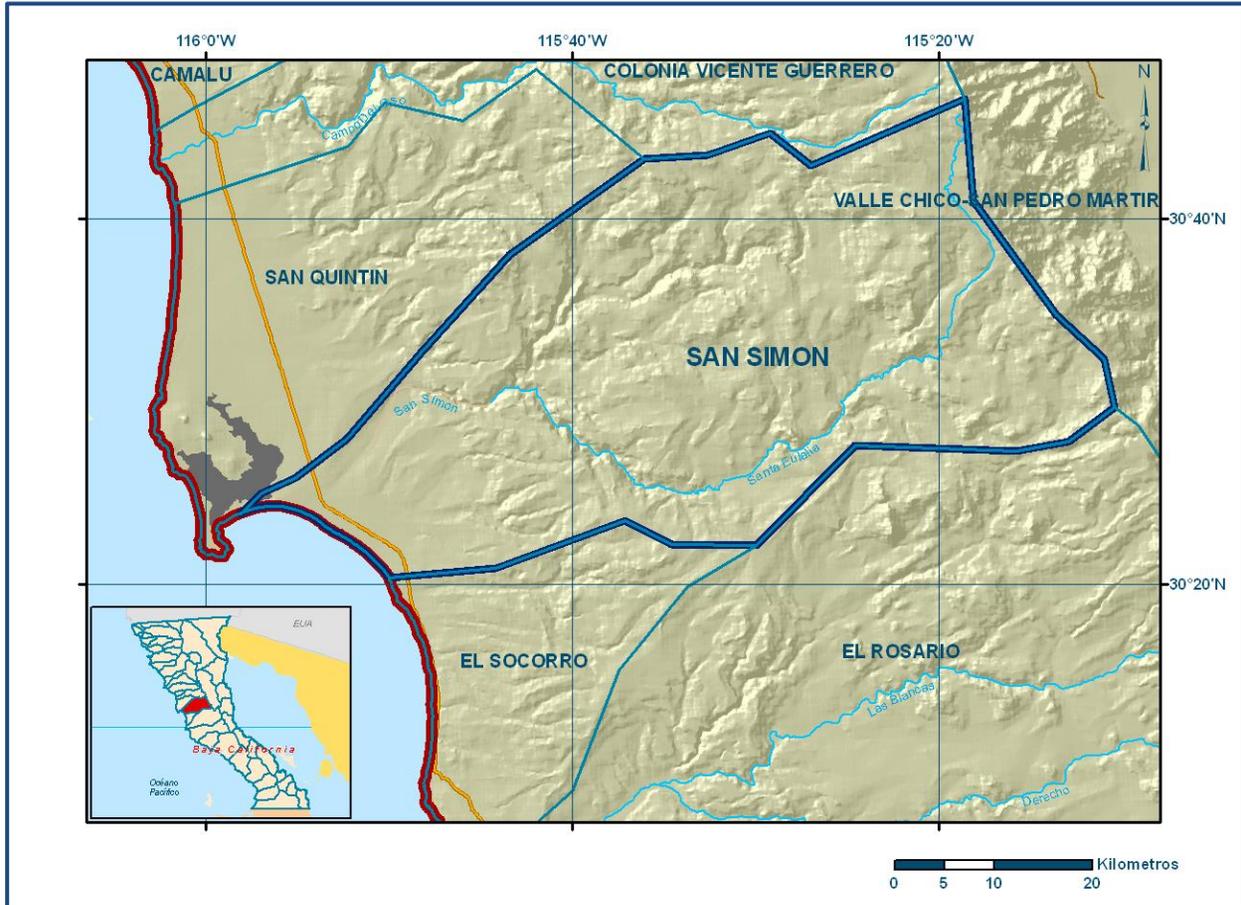


Figura 1. Localización del acuífero

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 0246 SAN SIMON							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	115	10	25.0	30	29	40.2	
2	115	12	55.1	30	27	48.3	
3	115	15	45.3	30	27	15.4	
4	115	24	35.1	30	27	34.3	
5	115	29	56.2	30	22	8.0	
6	115	34	34.3	30	22	8.9	
7	115	37	8.9	30	23	28.7	
8	115	44	8.3	30	20	52.8	
9	115	50	1.4	30	20	22.0	DEL 9 AL 10 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
10	115	58	8.7	30	23	51.7	
11	115	56	56.1	30	24	59.0	
12	115	55	7.0	30	25	48.4	
13	115	52	16.9	30	27	57.3	
14	115	48	16.5	30	32	37.6	
15	115	43	25.5	30	38	0.9	
16	115	36	4.3	30	43	16.4	
17	115	32	34.1	30	43	30.3	
18	115	29	11.9	30	44	40.9	
19	115	26	57.0	30	42	53.9	
20	115	18	35.3	30	46	32.6	
21	115	18	5.1	30	40	58.0	
22	115	13	35.1	30	34	43.1	
23	115	10	56.9	30	32	19.6	
1	115	10	25.0	30	29	40.2	

2 SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DEL ACUÍFERO

El acuífero San Simón pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California. Su territorio se encuentra completamente vedado y 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 1965; esta veda se clasifica como tipo III en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos de Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El principal usuario es el agrícola. En el territorio del acuífero no se localiza ninguna unidad o Distrito de Riego. Los usuarios de aguas subterráneas se encuentran organizados en el COTAS del acuífero San Simón, instalado el 6 de mayo de 1999 y forma parte del Consejo de Cuenca Baja

California, instalado el 7 de diciembre de 1999. En una pequeña porción del norte del acuífero se ubica el Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, decretado el 26 de abril de 1947.

3 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y de otros tipos, algunos de cobertura regional.

A continuación, se mencionan los estudios más recientes e importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE SAN QUINTÍN EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE, elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería S.A. de C.V., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1974. Este estudio incluye 4 sondeos realizados en el área del arroyo San Simón, definiendo 2 zonas de cauces de aluvión con profundidades de entre 40 y 84 m. El espesor saturado en los cauces detectados varía entre 20 y 60 m, en los que la resistividad de la parte saturada oscila entre 9.3 y 11 ohm-m. En dicho estudio se concluyó que el acuífero estaba seriamente sobreexplotado y que la intrusión marina avanzaba en las porciones norte y sur del acuífero. Considera que la cuenca del Valle de San Simón forma parte del acuífero de San Quintín, aunque difieren en sus características geohidrológicas.

Una de las principales recomendaciones del estudio fue la tecnificación del riego y definir la barrera subterránea para reducir la intrusión salina.

RECONNAISSANCE GEOLOGY OF DE STATE OF BAJA CALIFORNIA, elaborado por Gordon Gastil, Richard P. Philips y Edwin C. Allison en 1975. Como resultado se obtuvo un plano geológico a escala 1:250,000, que divide la geología histórica en los siguientes eventos: prebatolítico; emplazamiento en rocas batolíticas, con sus cuatro zonas metamórficas. Estructuralmente clasifica a Baja California en península oriental y central estable; litoral continental inestable y depresión del Golfo.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD HIDROLÓGICA EN SAN QUINTÍN Y MANEADERO, B.C.N., elaborado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1978. En dicho estudio se menciona como cuenca separada la conformada por el Valle de San Simón, reportando una recarga de

3.13 hm³ anuales y extracciones del orden de los 3.06 hm³/año; concluyendo que el acuífero estaba en equilibrio.

Debido a la escasez de agua en zonas aledañas, diversas empresas agrícolas migraron a esta zona, lo que ha provocado en los últimos años el incremento en la construcción de obras con la consecuente reducción en la disponibilidad del agua subterránea; lo anterior trajo como consecuencia el deterioro de la calidad del agua que se extrae en las obras cercanas a la costa debido al avance de la intrusión marina.

ACTUALIZACIÓN PIEZOMÉTRICA EN EL ACUÍFERO SAN SIMÓN, B.C. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1987. Reporta como resultado que el descenso de los niveles del agua subterránea variaba de 1 a 2 m anuales, causados por el incremento de la extracción y de los pozos perforados. Del total de obras censadas y activas se determinó una extracción de 17.0 hm³/año, en tanto que la recarga era de 13.0 hm³/año, lo que arroja un cambio de almacenamiento negativo de 4.0 hm³/año.

ESTUDIO GEOFÍSICO EN EL CAMPO LAS FLORES, REGIÓN DE SAN SIMÓN, VALLE DE SAN QUINTÍN, ENSENADA, B. C realizado por el Ing. Luis F. Cuevas L., para la Comisión Nacional del Agua en 2005. Concluye que los principales materiales que afloran en la zona de la desembocadura del arroyo San Simón, son los sedimentos aluviales cuaternarios que en superficie presentan una cubierta de arcilla y arenas y en la frontera oriental del valle se observa la presencia de rocas sedimentarias constituidas por arcillas, areniscas y conglomerados.

Debajo de la cubierta aluvial continúan los materiales granulares, sedimentos que por sus condiciones de buena permeabilidad permiten el almacenamiento de agua subterránea, susceptible de ser extraída. Se aprecia también una capa subyacente a la anterior, de sedimentos arcillosos de origen marino (localmente conocida como barro azul) que ha sido considerada como el basamento de la zona explotable, por lo que la gran mayoría de las captaciones son perforadas hasta encontrar esta capa.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO SAN SIMÓN, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA, elaborado por la Comisión Nacional del Agua en 2006. Su objetivo fue plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga media anual que recibe el acuífero, mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las

extracciones, realización de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y nivelación de brocales de pozos. Con los resultados del balance determina la disponibilidad del agua subterránea.

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO SAN SIMÓN (0246), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua en 2008.

Es un documento que contiene información general del acuífero, que sustenta la disponibilidad de agua subterránea determinada en 2008; en este caso su valor es negativo, es decir un déficit, del orden de los 17.7 hm³ anuales, que se están extrayendo del almacenamiento no renovable del acuífero.

ESTUDIO DE IMPACTO POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL AVANCE DE LA INTRUSIÓN MARINA DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS SAN QUINTÍN, COLONIA VICENTE GUERRERO Y CAMALÚ, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Realizado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, para la Comisión Nacional del Agua en 2011.

Este estudio tuvo como objetivo llevar a cabo el diagnóstico de la condición geohidrológica actual de los acuíferos, realizar un análisis histórico-estadístico de las variables relacionadas con el clima de la región, definir escenarios del nivel medio del mar y sus impactos e integración de propuestas de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA DE 10 ACUÍFEROS, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Realizado por Moro Ingeniería, S.C. para la Comisión Nacional del Agua en 2013.

Los acuíferos estudiados son Tijuana, Tecate, Las Palmas, Ojos Negros, Laguna Salada, Maneadero, La Trinidad, Camalú, San Quintín y San Simón. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y

conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

4 FISIOGRAFÍA

4.1 Provincia Fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de las provincias fisiográficas realizada por INEGI (1997), la superficie del acuífero se encuentra ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica Península de Baja California, Subprovincia Sierras de Baja California Norte, la cual está representada, en todo su conjunto, por la provincia geológica Batolito de Juárez-San Pedro Mártir, de origen intrusivo, edad mesozoica y evolución geológica de raíz de arco volcánico, asociada a la subducción de la extinta placa tectónica de Farallón (Ortega *et al.*, 1992). La mejor exposición de esta subprovincia está representada por las sierras Juárez, San Felipe y San Pedro Mártir. Esta última, con una elevación máxima de 3,078 msnm en el cerro Pico del Diablo. Se reconoce una gran variedad de tipos litológicos, estructuras y geformas del relieve. Esta provincia está caracterizada por la presencia de tres cinturones pre-terciarios a lo largo de toda la península.

4.2 Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para las condiciones de la República Mexicana por E. García, se determina que en la porción baja de la cuenca en la que se aloja el acuífero predominan los climas muy áridos o secos BW, con lluvias en verano e invierno y escasas todo el año; se presentan tres tipos: seco templado (BSks), muy seco semicálido (BWhs) y muy seco templado (BWks).

El clima muy seco templado se presenta en la mayor parte de la planicie costera, el clima seco templado se registra en el extremo norte; y el tipo muy seco semicálido en la porción central de la zona, en una franja irregular que atraviesa toda el área en sentido NW-SE. Debido al contraste topográfico, existen variaciones de temperatura (semifrío, templado y semicálido) y de humedad (subhúmedo a semiseco). Es por ello que en la parte topográficamente más alta de la cuenca se presenta un clima semifrío subhúmedo C(E)s(x') y templado subhúmedo (Cs).

Para la determinación de las variables climatológicas, se utilizó la información de la estación Santa María del Mar, que tiene un registro que comprende el periodo 1957-2012.

Con base en esta información se determinó que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación son **16.2 °C y 164.6 mm**, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio anual es de **1557 mm**.

El régimen de lluvias se registra principalmente de diciembre a marzo; el máximo valor se presenta en enero y junio es el mes más seco. Las temperaturas mínimas se registran entre los meses de diciembre a febrero, el mes más caluroso es agosto y el más frío es enero. La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía, que eventualmente son interrumpidos por la incidencia de lluvias torrenciales.

Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es muy bajo, las lluvias de temporada y la presencia ocasional de lluvias extraordinarias, tienen un efecto importante sobre la recarga al acuífero.

Las condiciones de aridez, causadas por las bajas precipitaciones pluviales, son agravadas por la presencia de sequías extremas que ocasionan una disminución de los escurrimientos superficiales y del almacenamiento.

4.3 Hidrología superficial

La zona de estudio se ubica en la Región Hidrológica No. 1, Baja California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Río Tijuana, en las cuencas Arroyo La Escopeta-Cañón San Fernando. A la cuenca le corresponde un arroyo de poca importancia conocido como Arroyo La Escopeta y el Cañón de San Fernando que marca el límite sur de la región hidrológica. El cauce principal del arroyo La Escopeta tiene una dirección preferencial este-oeste con una longitud máxima de 115 km. En el tramo medio de su recorrido pasa por la Misión de San Fernando y tiene como subcuencas intermedias el Cañón de San Fernando, Cañón de San Vicente, Arroyo del Rosario, Arroyo del Socorro, Arroyo San Simón y Arroyo La Escopeta.

El acuífero se ubica dentro de la subcuenca hidrológica del Arroyo San Simón, el cual recibe las aportaciones de 2 arroyos de importancia hidrológica: San Pablo y Agua Escondida, que confluyen a 5 km al suroeste del poblado Los Aguajes, con un área drenada de 1,600 km². Estos arroyos se originan al occidente de la Sierra San Pedro Mártir y desembocan finalmente en el Océano Pacífico con el nombre de Arroyo San Simón. En el recorrido de esta red hidrológica no se localiza ninguna estación hidrométrica, atraviesa el cañón del mismo nombre, el cual tiene un ancho medio de

1.1 km, con mesetas en los flancos de hasta 150 m de altura. Sobre el cauce del arroyo y en el delta que se forma al desembocar en el mar, existen muchos pozos que explotan el acuífero.

4.4 Geomorfología

Las condiciones climáticas del área, la escasez de lluvia, el incipiente y poco desarrollo del drenaje y la cercanía con el mar, han contribuido a que el área se encuentre en una etapa de juventud tardía del ciclo geomorfológico.

La región se encuentra conformada por una llanura costera rodeada de mesetas y sierras altas hacia el este. En la superficie del acuífero se identifican tres geoformas.

Valle o Llanura Costera. Está definido por el valle y la planicie costera que conforman una unidad de forma alargada orientada en dirección NW-SE inclinado hacia el SW. Incluye los cañones de los arroyos, por lo que la pendiente no excede los 15° y se encuentra a una altitud comprendida entre los 0 y 100 msnm.

Está constituido por depósitos granulares de textura y tamaño variable; sus corrientes principales son los arroyos San Simón y Las Golondrinas, cuyos cauces se orientan en dirección preferencial este-oeste y constituyen zonas de recarga al acuífero.

Lomeríos y Mesetas. Cubren la mayor parte del área, desde la zona centro hacia al oriente y está representada por la Mesa San Simón y la Mesa El Pabellón cuyas elevaciones varían entre 100 y 200 msnm; en general definen un sistema de drenaje de tipo paralelo, debido a que las mesetas se encuentran disectadas por cañones y cañadas.

Las unidades que las conforman tienen permeabilidad media a baja debido a que su composición litológica incluye arenas arcillosas así como depósitos de talud y abanicos aluviales, localizados al pie de las montañas.

Sierras y Cerros. La zona de sierras se localiza en la porción oriental del acuífero, con una orientación al NW, representa aproximadamente el 90% de la superficie total del acuífero. Las zonas topográficamente más altas forman parte de la Sierra San Pedro Mártir, localizada fuera de los límites del acuífero. Están conformadas por rocas ígneas intrusivas como dioritas y granodioritas en las que el patrón de fallas y fracturas

permite la infiltración del agua de las lluvias.

El drenaje que predomina es de tipo subparalelo y en menor proporción dendrítico. Las elevaciones montañosas que se encuentran en el límite occidental, cuya altitud varía de 500 a 2,100 msnm, se consideran de permeabilidad baja a media, dado que funcionan como zonas de recarga; sin embargo, el agua de las precipitaciones que ocurren en las partes altas transita a gran velocidad debido al gradiente del terreno, dificultando su infiltración al subsuelo.

5 GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, la región se ubica en el Batolito de San Pedro Mártir (Ortega, *et. al.* 1992), de edad Mesozoica, de origen plutónico y de un ambiente de raíz de arco. Este intrusivo, conformado por tonalitas y granodioritas, se desarrolló del Cretácico al Cenozoico tardío y tiene una extensión de más de 400 km². La intrusión causó metamorfismo a las rocas prebatolíticas, transformándolas a gneis y esquisto. El fallamiento fuertemente escalonado que presenta la península de Baja California está relacionado con el desarrollo de los sistemas transformantes que dominan la tectónica regional.

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 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-terciarios que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciables. Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por depósitos volcánicos y sedimentarios del Terciario y Cuaternario; su distribución de oeste a este es la siguiente:

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 saurios.

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), in INEGI (1984), como Formación Alisitos, que está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas.

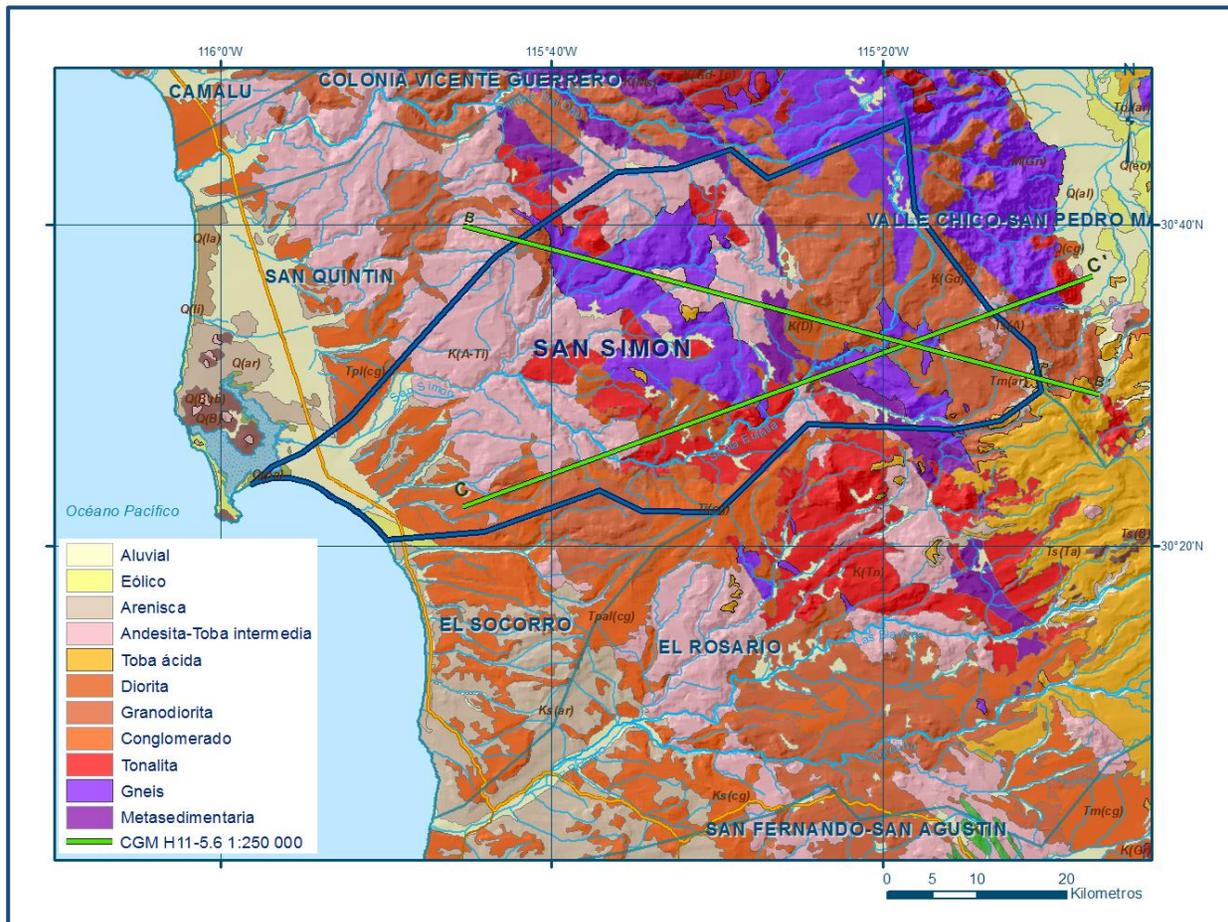


Figura 2. Geología general del acuífero

En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfozada y afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península.

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.

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.

La historia cenozoica está caracterizada por la acumulación de gruesos espesores de sedimentos continentales que afloran en diversas localidades, por el desarrollo de depósitos marinos, sobre todo en el borde occidental de la península, y por una importante actividad volcánica que cubre parcialmente los cinturones mesozoicos descritos.

Durante el Plioceno y Pleistoceno se acumularon depósitos marinos en una serie de terrazas que alcanzan una altura de hasta 500 m, asociadas a cambios glaciales del nivel del mar (Gastil et al., op. cit.), que se desarrollaron en el marco de una serie de levantamientos y basculamientos de las zonas costeras durante el Plioceno-Cuaternario (Ortlieb, 1978). Tierra adentro se presentan depósitos aluviales, eólicos y lacustres, cuya acumulación ocurre en la actualidad.

Regionalmente la zona está representada por un marco geológico que ha sido definido por la sucesión de eventos tectónicos relacionados con la evolución del borde occidental de Norteamérica, así como con los fenómenos que contribuyeron a la separación de la Península de Baja California.

El panorama morfoestructural que presenta hoy la región ha sido establecido por eventos geológicos que datan desde la Era Paleozoica y culminan con la apertura del Golfo de California, dominado por un ambiente de "Rifting", con fallamiento transforme. Las unidades litológicas que afloran pertenecen a dos terrenos tectonoestratigráficos: El Terreno Cortés y el Terreno Alisitos. El primero se distribuye en la porción oriental y el segundo en la región occidental. Las rocas en general se encuentran moderadamente fracturadas y cizalladas.

5.1 Estratigrafía

En el área del acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metasedimentarias cuyo registro estratigráfico varía del Paleozoico al Reciente (figura 2). En la porción occidental del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior. Sobre estas rocas sobreyace una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas. A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que afloran en el área, de la más antigua a la más reciente:

PALEOZOICO

Formaciones Zamora y El Volcán

Constituyen el basamento de la región y forman parte del Terreno Cortés. Están constituidas por rocas metasedimentarias conformadas por esquistos, gneises, pizarras, filitas, mármol, cuarcitas, calizas y hornfels que presentan grados de metamorfismo en facies de esquistos verdes a facies de anfibolitas. La Formación El Volcán sobreyace concordantemente a la Formación Zamora y ambas son correlacionables con la secuencia paleozoica que aflora en la Sierra Las Pintas, asignada al Carbonífero por la presencia de crinoides, corales, bivalvos y braquiópodos.

CRETÁCICO

Formación Alisitos (Cretácico Inferior)

Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), al referirse a *“una secuencia de 200 m de lutitas y areniscas metamorfoseadas del Cretácico Inferior que aflora en el Rancho Alisitos en el Valle de Santo Tomás, en el Estado de Baja California. Esta unidad se extiende en una franja orientada NW-SE por espacio de 500 km de largo y 50 km de ancho (Almazán, 1988), a lo largo de la cual, debido a su naturaleza, presenta frecuentes variaciones horizontales”*.

Consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias con fauna fósil del Albiano Medio o Aptiano y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico que se localizan al este-noreste de El Rosario, Baja California que se considera la sección más completa (López, 1980). Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica.

De acuerdo con Rangin (1978) in: INEGI (1984), la Formación Alisitos constituye un cinturón volcánico-sedimentario desarrollado en la parte noroccidental del país en forma paralela con otro en Sonora, evolucionando ambos sobre corteza continental. Estos cinturones han sido relacionados a la subducción y fusión parcial asociadas a uno o más límites convergentes desarrollados en el noroeste de México durante la apertura del Océano Atlántico y el movimiento de Norteamérica hacia el noroeste.

Está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas.

En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfozada en facies de esquistos verdes, afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. Aflora coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico, en forma discordante.

Formación Rosario (Cretácico Superior)

Su nombre fue designado formalmente por Beal en 1948 (en López, R., 1985), para referirse a un afloramiento de areniscas de color café y arcillas de color oscuro, con lentes de conglomerado, asignándole una edad Campaniano-Maestrichtiano. Su localidad tipo se encuentra en el Arroyo Rosario, ubicado al noreste del poblado del mismo nombre. Está formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino; se presenta poco consolidada y con escasas evidencias de tectonismo. Se encuentra descansando en discordancia angular sobre la Formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico) de los terrenos pre-terciarios de Baja California Norte, cuyo límite oriental es la denominada línea "Santillán-Barrera" que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos.

De acuerdo con Yeo (1984), la Formación Rosario se divide en tres miembros litoestratigráficamente distintos, cada uno de los cuales corresponde a una fase diferente en el cambio del nivel del mar.

Estas unidades son (de la base a la cima): (a) miembro arenoso inferior, (b) miembro lodolítico medio y (c) miembro conglomerático-arenoso superior. Los tres presentan marcados cambios en facies tanto en extensión (de norte a sur y de este a oeste) como en la vertical (en sentido estratigráfico). La transición vertical de estas facies corresponde a variaciones temporales del nivel del mar.

En términos geográficos los cambios de facies más grandes se presentaban de este a oeste, que concuerdan con el trend de la línea de costa hacia la cuenca para el Cretácico Tardío.

Esta formación cubre, en discordancia angular, a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas; subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Neógeno y Cuaternario. Las determinaciones paleontológicas la ubican estratigráficamente en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Su espesor máximo es de 750 m.

Los afloramientos de esta unidad en la región se distribuyen a lo largo de la vertiente occidental de la Sierra San Miguel, configurando una serie de mesas de escasa elevación que se encuentran coronadas por los sedimentos marinos terciarios, sus exposiciones son muy angostas e irregulares y presentan una orientación NW-SE.

TERCIARIO (NEÓGENO)

Rocas ígneas Intrusivas

Las rocas plutónicas que conforman los batolitos varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo, en algunas localidades se han cartografiado pequeños intrusivos de diorita y gabro. Los cuerpos plutónicos varían en edad de W a E, desde cretácicos en Baja California hasta cenozoicos en Chihuahua (Gastil y Krummenacher, 1978; Silver y Anderson, 1978). La mayor parte de estos emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación Alisitos. Se considera que las rocas pertenecen al cinturón orogénico denominado Cordillera Norteamericana, que se estableció durante el Mesozoico. Esta unidad se presenta intrusionando a la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Alisitos y junto con dicha unidad, conforman las partes más elevadas de la región. Sus afloramientos muestran una estructura masiva, están fuertemente fracturadas y su intemperismo es en forma de bloques.

Neógeno Marino (Plioceno)

Se adoptó este nombre para designar a los depósitos de sedimentos que se distribuyen a lo largo de la margen occidental de la Sierra San Miguel que conforman las mesetas. Está constituido por areniscas y conglomerados, cuyos fragmentos fueron derivados de rocas ígneas y sedimentarias más antiguas que conforman los terrenos ubicados inmediatamente al este de la zona costera; presentan estructura masiva, con un grado bajo de fracturamiento. Su espesor estimado difícilmente supera los 50 m. Según Gastil (1975) estos materiales se depositaron en la delgada franja costera que se extiende desde la Ciudad de Los Ángeles hasta los 28° de latitud norte, quedando incluidos en esta franja los sedimentos existentes en la zona de San Simón.

Los depósitos marinos dieron origen a la formación de terrazas que actualmente pueden estar aflorando algunos kilómetros tierra adentro de la península y corresponde con lo que Heim (1922, en Gastil op.cit.) denominó Formación Salada.

Neógeno Continental (Plioceno)

Con este nombre se agruparon los depósitos de talud que se distribuyen sobre las unidades preterciarias que conforman las zonas de topografía elevada. Son materiales granulares producto de la denudación de rocas preexistentes que se encuentran consolidados, formando lomeríos sobre los flancos y base de las sierras. Están conformados por conglomerados de rocas ígneas, cuyos fragmentos se encuentran soportados por una matriz areno-arcillosa, presentan estructura masiva y al intemperizarse tienden a formar bloques, su fracturamiento es escaso y presentan buena compactación.

La edad de estos depósitos fue determinada por Gastil (op. cit.) con base en su relación estratigráfica con los depósitos del Plioceno marino, por lo que les asignó esta misma edad. En el área de estudio se presentan sobreyaciendo discordantemente a los estratos de la Formación Alisitos y a las rocas intrusivas graníticas que conforman la Sierra de San Miguel.

Cuaternario marino (Pleistoceno)

Gastil (1975) encontró depósitos de origen marino en la costa occidental del estado de Baja California.

La Unidad fue estudiada en 1944 por Hertlein (en Gastil, op. cit.), reportando, como principal característica, un paquete de areniscas y conglomerados con alteraciones ferruginosas de color rojo, intercalado con areniscas fosilíferas y coquinas.

Al sur de Rosarito los fragmentos mayores están bien redondeados y son del tamaño de guijarros, soportados por una matriz arenosa poco consolidada. En la planicie costera está cubierto por los materiales aluviales recientes o conformando pequeñas mesetas.

Depósitos recientes

Con este término se denomina a los depósitos más jóvenes que se distribuyen sobre las zonas topográficamente bajas; están representados por aluviones, depósitos de origen eólico, sedimentos lagunares, depósitos de dunas, depósitos de talud (bajo las mesetas) así como los depósitos fluviales sobre el cauce de los arroyos. Conforman el acuífero aluvial que actualmente se encuentra en explotación.

Los depósitos de origen aluvial están compuestos por materiales producto de la denudación de rocas pre-existentes. Se encuentran distribuidos en zonas de pie de monte y en los lechos de cauces de ríos, arroyos y zonas topográficamente bajas, formando en ocasiones abanicos aluviales. Están constituidos principalmente por intercalaciones de gravas y arenas con horizontes de arcilla y limo, generalmente el material está mal clasificado, no consolidado o con escasa compactación. Se encuentran distribuidos por toda el área cubriendo a las rocas más antiguas por medio de discordancias angulares y litológicas. De acuerdo con los cortes litológicos de pozos, su espesor varía de 20 a 80 m.

Los depósitos eólicos conforman dunas en la zona costera o en zonas topográficamente más bajas, en las bahías Santa María y Falsa. Están constituidos por granos de arena cuarzo-feldespática, de granos bien clasificados, subredondeados y de tamaño medio a grueso, frecuentemente con estratificación cruzada, no consolidados, de espesor menor a 20 m.

Los depósitos lacustres se localizan en depresiones lagunares ubicadas en la zona cercana a la costa.

Están conformados por arenas, limos y arcillas que frecuentemente contienen restos de ostrácodos; se presentan en el extremo occidental del área definiendo una franja irregular, interrumpida por afloramientos del cuaternario marino.

5.2 Geología estructural

La característica estructural más importante son las grandes fallas regionales de rumbo NW-SE, truncadas por fallas NE-SW. Esta orientación es típica en la región y es atribuida a un régimen distensivo. Los principales eventos tectónicos que han afectado a la región iniciaron en el Paleozoico, cuando la margen del cratón de Norteamérica se situaba en la actual Península de Baja California, época durante la cual se desarrolló una tectónica pasiva que originó una sedimentación estable.

Durante el Cretácico Inferior se depositaron las rocas del Grupo Alisitos en un ambiente de arco insular. La tectónica compresiva de acreción está evidenciada en el flanco occidental de la Sierra San Pedro Mártir, donde existen cabalgaduras de rumbo general NW-SE contemporáneas al desarrollo de foliación en los granitos, dioritas y sedimentos del Grupo Alisitos del Cretácico Inferior.

Este evento se desarrolló en el Cretácico Superior-Terciario Inferior inmediatamente anterior al emplazamiento del batolito peninsular. Durante el Cretácico Superior se manifiesta una relativa calma tectónica que permite en el sector septentrional de la Península (entre Ensenada y San Quintín) el movimiento transgresivo del mar sobre los terrenos afectados por las intrusiones, permitiendo el depósito de la Formación Rosario, la cual fue afectada por una etapa distensiva que modeló la región en cuencas y pilares.

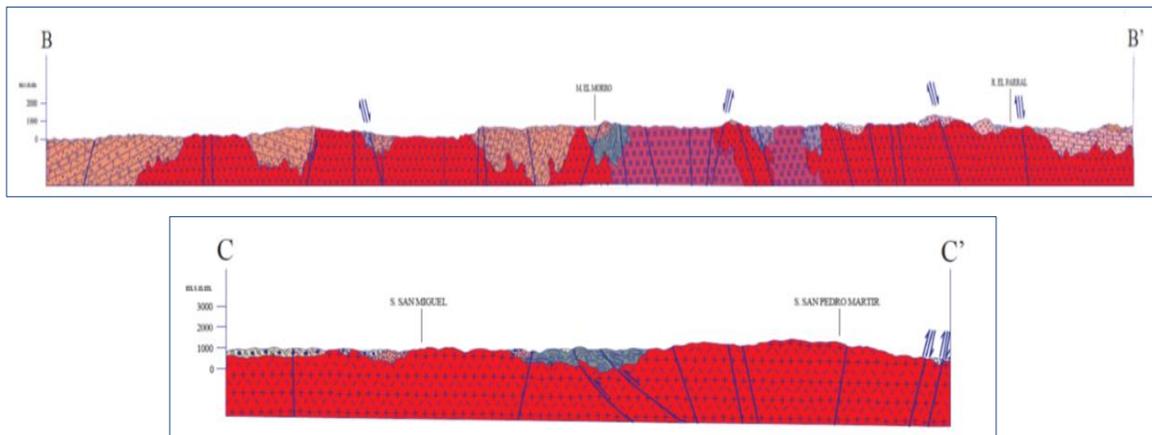
Durante el Mioceno Medio y el Plioceno Temprano ocurre un cambio en la configuración del límite entre la placa Pacífica y la Norteamericana, involucrando diversos procesos tectonomagmáticos en una amplia zona de la margen continental del Norteamérica, ocasionados por el cese de la subducción de la placa Farallón-Guadalupe, ubicada al oeste de Baja California y por la migración hacia el sur de la placa Rivera, originando a la postre la apertura del Golfo de California (Carta Geológico-Minera H11-5-6 "Lázaro Cárdenas", escala 1:250,000 SGM, 2000).

5.3 Geología del Subsuelo

De acuerdo con la interpretación conjunta de la geología superficial y del subsuelo, apoyada con la información geofísica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por depósitos clásticos de origen aluvial, fluvial y eólicos de granulometría variada y conglomerados, depositados en los cauces de los arroyos y en la planicie costera; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas, sedimentarias y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración (figura 3).

Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias (Formación Alisitos) cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración; así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias.

El espesor de los depósitos clásticos es de 20 a 80 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros.



Fuente: Carta Geológica-Minera, Lázaro Cárdenas H-11-5-6. Escala: 1:250 000

Figura 3. Sección geológica

6 HIDROGEOLOGÍA

6.1 Tipo de acuífero

La información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos y la información de la geología superficial, permiten establecer que el acuífero es de **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos.

Está integrado, en su porción superior por un medio granular constituido por sedimentos clásticos de granulometría variada, conglomerados y depósitos eólicos; en su porción inferior por rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

De acuerdo con su permeabilidad, es posible agrupar las distintas litologías en las unidades hidrogeológicas que a continuación se describen, las cuales conforman el medio poroso o granular y el medio fracturado por el que se desplaza el agua subterránea:

I) Depósitos granulares no consolidados de permeabilidad media a alta. Están constituidos por depósitos clásticos no consolidados del Terciario y Cuaternario, que rellenan la porción superior del valle y están compuestos por una gran diversidad de material granular, aluvial, fluvial y eólico; así como las areniscas y conglomerados de la Formación Rosario.

II) Derrames volcánicos, rocas sedimentarias y depósitos vulcanosedimentarios de permeabilidad media a baja. Dentro de esta unidad se considera la secuencia volcánica y vulcanosedimentaria del Cretácico Inferior y los derrames de basaltos cuaternarios.

Su interés hidrogeológico se restringe a las zonas en las que sus afloramientos presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. En general funcionan como barreras al flujo subterráneo y basamento hidrogeológico.

III) Rocas ígneas y metamórficas de baja permeabilidad. Esta unidad está integrada por los cuerpos intrusivos que afloran en la porción nororiental del acuífero, así como las secuencias metasedimentarias constituidas por filitas, esquistos, pizarras y gneises. Son materiales muy compactos, de baja conductividad hidráulica, que funcionan como basamento regional del acuífero y fronteras al flujo del agua subterránea; sin embargo localmente el fracturamiento puede incrementar su permeabilidad. El movimiento del agua subterránea en el medio granular está controlado por las variaciones de permeabilidad de los diferentes depósitos, mientras que en el medio fracturado su trayectoria depende del patrón de fracturas y fallas.

5.1 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2006, se ejecutaron 10 pruebas de bombeo de corta duración (6 a 12 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, se recopilaron 20 pruebas de bombeo de corta duración, también en etapas de abatimiento y recuperación, de estudios previos realizados en este acuífero y otros vecinos. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se determina que los valores de transmisividad varían de **2.0×10^{-3} a $43.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , predominando valores entre **2.0 y $7.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores de conductividad hidráulica varían de **1.1×10^{-5} a $5.1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (1.0 a 446 m/d)**. Los valores más altos se presentan en los depósitos granulares del cauce del río San Simón y arroyos tributarios, y los menores en la planicie costera, asociados a depósitos de granulometría fina. De la interpretación de las pruebas de bombeo por el método de Rathod and Rushton realizadas en el acuífero vecino San Quintín, se obtuvieron coeficientes de almacenamiento que varían de 0.005 a 0.01 y el almacenamiento específico entre 0.01 y 0.15.

7.2 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información para diferentes años; para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2006-2013.

5.3 Comportamiento hidráulico

5.3.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el año 2013 varía de 5 a 30 m, incrementándose por efecto de la topografía desde la zona próxima a la costa hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero. Los valores más someros se presentan en la zona costera del valle, mientras que las zonas con mayor profundidad se registran en la región nororiental del acuífero, en el cañón del Arroyo San Simón. De la porción media del valle hasta el poblado San Simón (Ejido Francisco Villa), la profundidad al nivel del agua subterránea varía de 10 a 25 m (figura 4). La variación de la profundidad del nivel estático no representa de forma directa la sobreexplotación a la que está sometido el acuífero, debido a que la intrusión de agua salobre procedente del mar reemplaza el agua dulce que se está extrayendo.

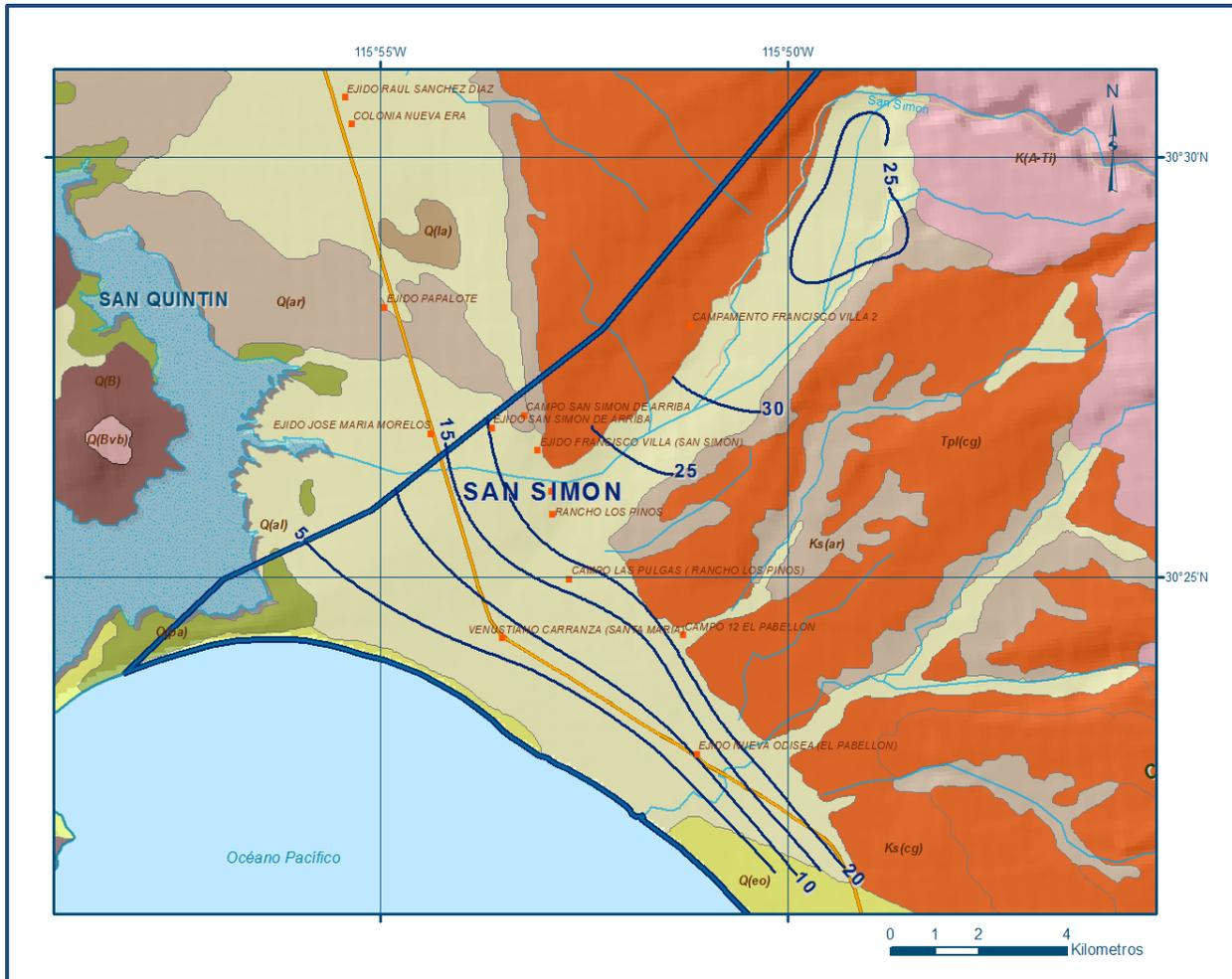


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.3.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático para el 2013, se pueden observar claramente dos zonas; una en la que los valores se localizan bajo el nivel medio del mar (nmm), entre la zona costera y las localidades, que provocan la inversión del gradiente hidráulico tierra adentro y la intrusión marina, en la que se ha formado un extenso cono de abatimiento al que confluyen tanto el agua salobre procedente del mar como el agua dulce que aún existe en el cañón del Arroyo San Simón. A partir de esta zona hacia el noreste, a lo largo del cauce del Arroyo San Simón, los valores de elevación son positivos, hasta alcanzar 31 msnm (figura 5).

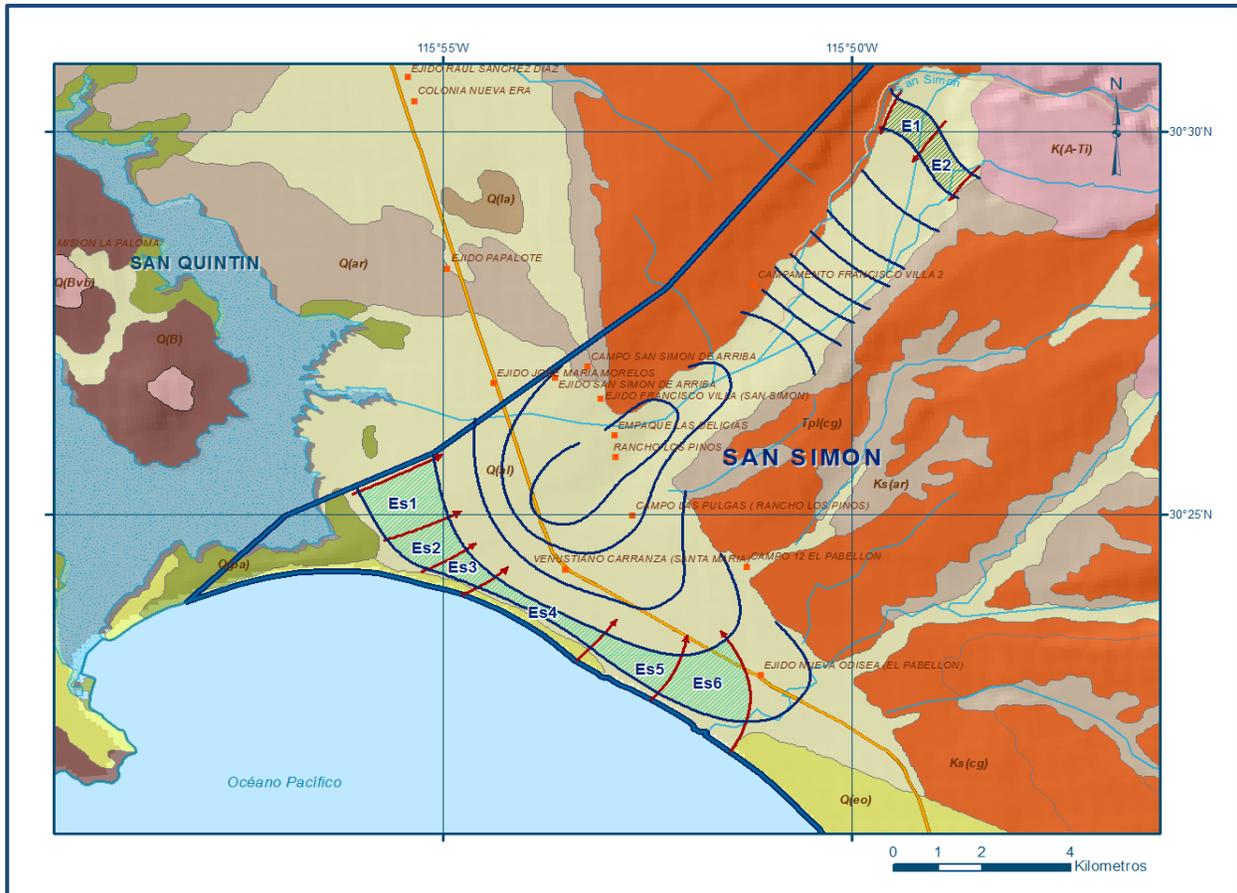


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.3.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2006-2013, se registran valores tanto de abatimiento como de recuperación. En la porción suroriental del acuífero, entre la zona costera y San Simón, se registran abatimientos de 1 a 3; a partir de esta zona hacia el noreste es donde se presentan valores de recuperación también de 1 a 3 m.

Aguas arriba, a lo largo del cauce del Arroyo San Simón, los abatimientos varían de 1 a 4 m (figura 6).

En términos generales, los valores de recuperación y de abatimiento tienden a anularse y como consecuencia el abatimiento medio anual es prácticamente imperceptible, situación que puede interpretarse como una condición de equilibrio hidrogeológico, que en realidad es consecuencia de la intrusión marina la cual al inducir el ingreso de agua salobre anula los abatimientos.

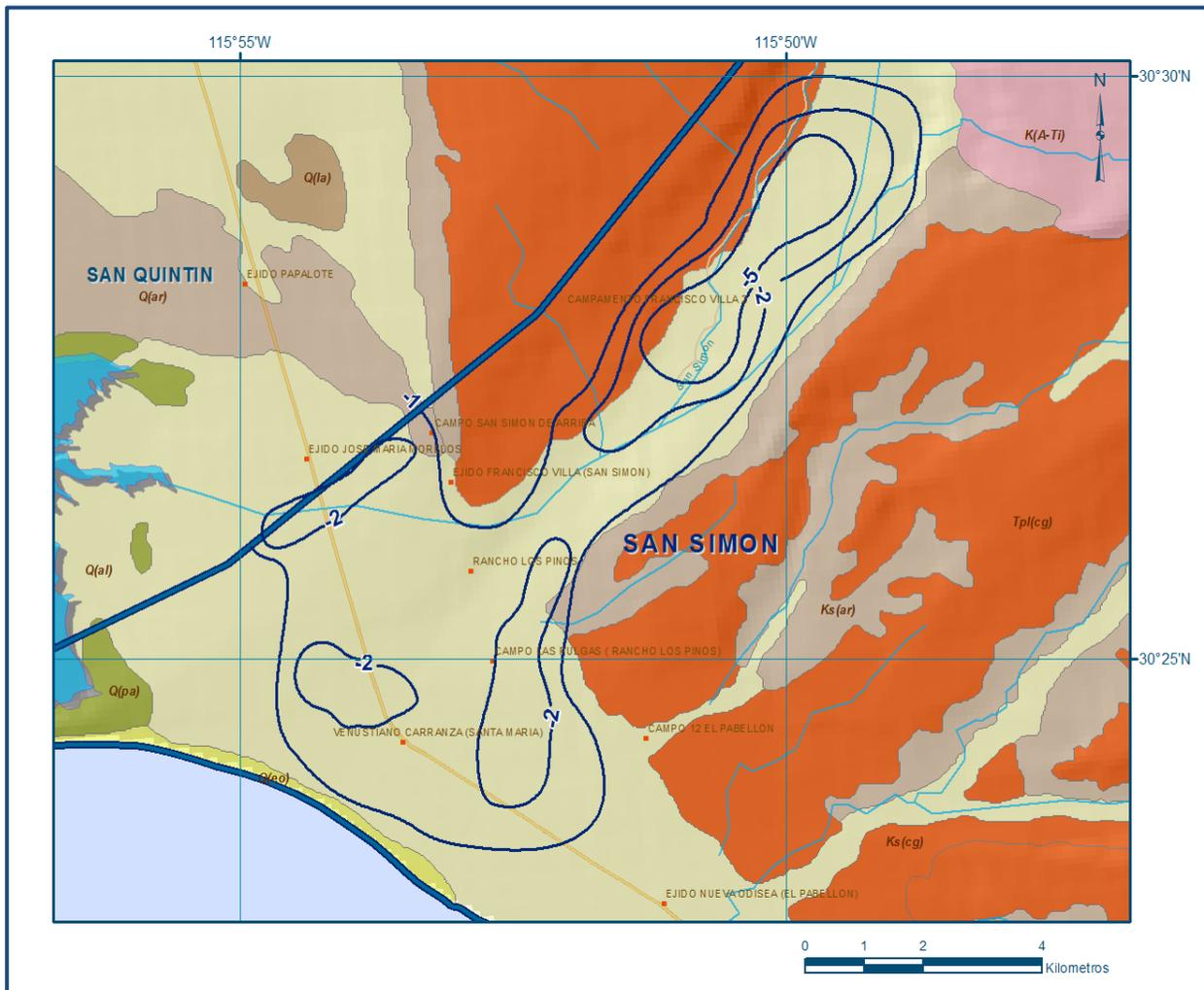


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2006-2013)

5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los estudios realizados en 2006, 2011 y 2013, se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno (pH), dureza y sólidos totales disueltos (STD).

De los resultados de análisis fisicoquímicos se determina que los valores de concentración de STD varían de 800 a 33,740 mg/l.

Excepto una muestra proveniente de un pozos localizado en el cañón del Arroyo San Simón, todas las demás presentan concentraciones de STD mayores a 1000 mg/l que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano, así como de también de las concentraciones de sodio y cloruro.

En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce a marina, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 1,100 a 37,800 μ S/cm. Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la zona costera en donde de manera inducida se produce una mezcla con el agua salobre; las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en la porción nororiental del acuífero. Ambos valores se incrementan gradualmente desde la porción oriental del acuífero hacia la zona costera, en la dirección del escurrimiento superficial del arroyo San Simón.

La interpretación de los perfiles de conductividad eléctrica realizados en 2011 y 2013, relacionados con la concentración de STD, indican que a partir de la elevación 0 (nivel del mar), el nivel saturado en la zona donde el cañón del arroyo San Simón que desemboca en la planicie, presenta concentraciones de STD entre 1000 y 2000 mg/l. Sin embargo a partir de los 10 m de profundidad el agua salobre contenida en la planicie costera presenta concentraciones de STD superiores a 6,000 mg/l que reflejan la intrusión de agua de mar (CONAGUA, 2011 y 2013).

Para la profundidad máxima de 40 m de espesor saturado de los aprovechamientos, los perfiles de salinidad realizados no detectaron una variación importante en el sentido vertical (CONAGUA, 2011). Las variaciones de la conductividad eléctrica, están relacionadas con la ubicación espacial de los sitios con respecto al frente salino.

Los sitios más cercanos a la costa son los que presentan mayores valores de resistividad y los más cercanos a los zonas de recarga registran menores valores y menor cambio con respecto a la profundidad. Con respecto a la familia de agua predominante, de acuerdo con los iones presentes, predomina la familia clorurada sódica cálcica.

Las diferencias en la composición química del agua subterránea se deben a las reacciones de intercambio catiónico que se desarrollan en el acuífero: de tipo directo cuando el Na^+ de la fracción arcillosa del acuífero se intercambia por el Ca^{+2} disuelto en el agua subterránea y de tipo inverso cuando el Ca^{+2} de la fracción arcillosa del acuífero se intercambia por el Na^+ contenido en el agua subterránea.

En este sentido, es posible diferenciar dos grupos: el grupo 1, de mayor salinidad, se caracteriza por presentar altas concentraciones de cloruro y sodio, debido a que no existen aprovechamientos subterráneos que capten el miembro extremo salino; al grupo 2 pertenece la mayor parte de las muestras de agua subterránea, cuya composición química está determinada por la mezcla con agua salina y reacciones de intercambio catiónico inverso, típicas de la intrusión marina. La relación lineal Na vs. Cl muestra que la mayor parte de las muestras de agua subterránea indica una clara evolución hacia la salinización.

Además de la contaminación por intrusión marina, aunque actualmente el acuífero no está contaminado por organismos patógenos, presenta un riesgo potencial a la contaminación por actividades antropogénicas como la agricultura que utiliza agroquímicos, pesticidas y fertilizantes o de los asentamientos humanos que generan aguas residuales.

En la porción central del acuífero se identificó un incremento anómalo de la salinidad, que de acuerdo con su concentración y los isótopos estables del agua (^{18}O y Deuterio), se asoció a la infiltración de las salmueras producidas por las plantas desaladoras, que son descargadas sin control alguno (CONAGUA, 2011).

7 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo de 2013 existe un total de 166 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 149 son pozos y 17 norias.

En conjunto extraen un volumen de **26.4 hm³ anuales**, de los cuales 25.8 hm³ (97.7%) son para uso agrícola, 0.6 hm³ (2.3%) para uso público urbano.

8 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2006 a 2013, en una superficie de 59.0 km², 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 la masa es la siguiente:

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

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 un acuífero:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del 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 (Rv), la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo horizontal (Ehd) y la proveniente del mar como efecto del fenómeno de intrusión marina (Ehs). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, y de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Debido a que la extracción para uso público-urbano es incipiente, sólo se considera la recarga por retornos de riego.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con 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 definida por la expresión:

$$R_v + E_h + E_{hs} - B - ETR - S_{sb} = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v : Recarga vertical

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

E_{hs} : Entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal

B : Bombeo

ETR : Evapotranspiración

S_{sb} : Salidas de agua salobre por bombeo

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + ETR + S_{sb} - E_h - E_{hs} \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.1 entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce) (EHD)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

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

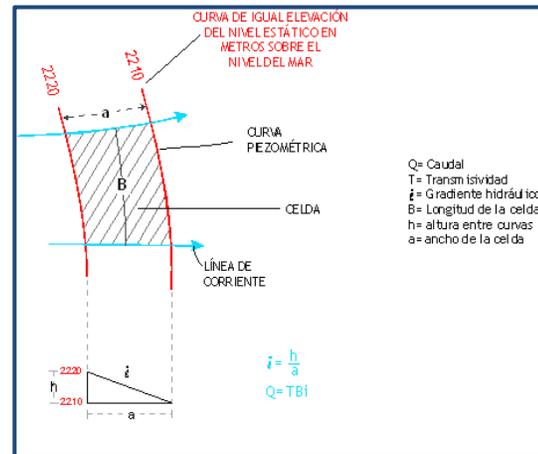
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

T = Transmisividad (m^2/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada celda establecida (tabla 2). El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **11.4 hm³/año**.

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio llevado a cabo en 2013 y otros previos, adaptados al espesor saturado

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (2013)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	1550	670	5	0.00746	0.0200	0.2313	7.3
E2	1345	775	5	0.00645	0.0150	0.1302	4.1
Total entradas							11.4

7.1.2 Entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal (Ehs)

Las entradas de agua salobre, por flujo subterráneo horizontal, fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas de agua dulce, a partir de la configuración del elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5; considerando el mismo valor promedio de transmisividad.

El volumen total de entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal es de **3.9 hm³/año** (tabla 3).

Tabla 3. Entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal (2013)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
Es1	1135	1655	1	0.00060	0.0050	0.0034	0.1
Es2	1035	1345	1	0.00074	0.0050	0.0038	0.1
Es3	1190	725	1	0.00138	0.0080	0.0131	0.4
Es4	3000	365	1	0.00274	0.0080	0.0658	2.1
Es5	2070	620	1	0.00161	0.0080	0.0267	0.8
Es6	1550	1345	1	0.00074	0.0080	0.0092	0.3
Total entradas							3.9

8.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), salidas de agua salobre por bombeo (Ssb) y evapotranspiración (ETR).

8.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **26.4 $hm^3/año$** .

8.2.2. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb)

Las salidas de agua de agua salobre en este acuífero ocurren principalmente a través del bombeo, y se calcula que la magnitud de este volumen es al menos de la misma magnitud de las entradas de agua salobre, este volumen podría ser mayor pues existen evidencias de un sostenido abatimiento anual, sin embargo, el volumen considerado es de **3.9 $hm^3/año$** .

8.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este componente se define como 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 de referencia).

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Coutange, que se basa en la siguiente formulación:

$$ETR = P - \chi P^2$$

Con:

$$X = \frac{1}{(0.8 + 0.14t)}$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real (m)

P = Precipitación anual (m)

t = Temperatura media anual (°C)

La precipitación en la zona del acuífero es de 164.6 mm, la temperatura media anual es de 16.2 °C y la superficie considerada para este cálculo es de 21 km², por lo que el volumen de descarga por efecto de la evapotranspiración es de **3.3 hm³/año**.

8.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2006-2013 (figura 6).

Con base en ella y considerando un rendimiento específico de 0.1, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 59.0 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S = Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A = Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h = Valor de la variación piezométrica en el período (m);

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2006-2013 se pueden observar en la tabla 3. El volumen anual del cambio de almacenamiento es de **-2.5 hm³/año**.

Por lo tanto, **$\Delta V(S) = -2.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$**

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2006-2013)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km²)	Sy	ΔV(S) (hm³/año)
-2	-2	15.0	0.15	-4.5
-1 a -2	-1.5	25.2	0.15	-5.7
-2 a -5	-3.5	5.1	0.15	-2.7
-5	-5	4.0	0.15	-3.0
0 a -2	-1	9.7	0.15	-1.5
Área de balance		59.0		-17.3
			Promedio anual	-2.5

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión (2), establecida anteriormente:

$$R_v = B + ETR + S_{sb} - E_h - E_{hs} \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 26.4 + 3.3 + 3.8 - 11.4 - 3.8 - 2.5$$

$$R_v = 15.8 \text{ hm}^3$$

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

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 15.8 + 11.4$$

$$R = 27.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

9 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:

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

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 a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **27.2 hm³/año**; la totalidad de este volumen corresponden a recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, el volumen considerado como descarga natural comprometida es de **3.3 hm³/año**.

8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (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 (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 **26,231,355 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 27.2 - 3.3 - 26.231355 \\ \text{DMA} &= -2.331355 \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **2,331,355 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1974. Estudio Geohidrológico Valle de San Quintín en el Estado de Baja California Norte. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería S.A. de C.V.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1978. Estudio de Factibilidad Hidrológica en San Quintín y Maneadero, B.C.N. Realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.