



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO
SAN RAFAEL-LA PALMA (0243), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2020

Contenido

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	4
3. FISIOGRAFÍA.....	4
3.1 Provincia fisiográfica	4
3.2 Clima.....	5
3.3 Hidrografía	5
3.4 Geomorfología	6
4. GEOLOGÍA.....	6
4.1 Estratigrafía	7
4.2 Geología estructural.....	9
4.3 Geología del subsuelo	10
5. HIDROGEOLOGÍA.....	10
5.1 Tipo de acuífero	10
5.2 Parámetros hidráulicos	11
5.3 Piezometría	11
5.4 Comportamiento hidráulico	11
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	11
5.4.2 Elevación del nivel estático	11
5.4.3 Evolución del nivel estático	12
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	13
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	13
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	13
7.1 Entradas	14
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	14
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	14
7.2 Salidas	15
7.2.1 Evapotranspiración (ETR)	15
7.2.2 Bombeo (B)	17
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	17
7.2.4 Descarga por manantiales (Dm)	17
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	17
8. DISPONIBILIDAD.....	18
8.1 Recarga total media anual (R)	19
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	19
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	19
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)	19
9. BIBLIOGRAFÍA	21

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 Rafael-La Palma, definido con la clave 0243, en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se encuentra localizado entre los paralelos 28°18” y 28°42” de latitud Norte y los meridianos 113°05” y 113°23” de longitud Oeste, en la porción sureste del estado de Baja California, entre la Sierra Transpeninsular y el Golfo de California, comprende una superficie aproximada de 767 km².

Colinda al norte con el acuífero La Bocana-Llanos de San Pedro y al sur con los acuíferos Llanos del Berrendo y El Progreso-El Barril (figura 1).

Geopolíticamente se localiza totalmente dentro del municipio de Ensenada. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.



Figura 1. Localización del acuífero

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca de la Península de Baja California y su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”. Publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965, este decreto se clasifica como tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2015), el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. Actualmente no existe Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). Y se encuentra dentro de la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “Valle de los Cirios”, con fecha de decreto 20 de junio de 1980.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita el acuífero

ACUIFERO 0243 SAN RAFAEL-LA PALMA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	113	5	22.1	28	25	20.3	
2	113	7	55.7	28	19	44.5	
3	113	9	37.1	28	19	0.3	
4	113	14	38.3	28	19	51.8	
5	113	17	6.7	28	19	14.5	
6	113	22	36.1	28	24	47.7	
7	113	20	30.9	28	28	44.3	
8	113	20	21.7	28	32	42.0	
9	113	18	13.9	28	33	28.2	
10	113	16	49.2	28	37	12.8	
11	113	9	50.0	28	40	31.8	DEL 11 AL 12 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
12	113	5	6.1	28	29	40.9	
1	113	5	22.1	28	25	20.3	

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.

En la región que comprende el territorio que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA SUR DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE, elaborado por la empresa InGeo, S.C., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en 1979. El objetivo fue realizar un reconocimiento de las características hidrogeológicas en el acuífero San Rafael-La Palma y acuíferos aledaños, precisando la geología, hidrología y geofísica.

Este estudio y un reconocimiento de campo efectuado en el año del 2007, fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El área de estudio pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra de Baja California, subprovincia de Sierra Volcánica (según Manuel Álvarez Jr.); localmente se caracteriza por exhibir un relieve abrupto conformado por sierras que corren en sentido Norte a Sur y Noroeste a Sureste, con elevaciones que llegan a los 1,700 m. regionalmente dominan las formas de amplias mesetas constituidas por derrames basálticos, por tobos y brechas riolíticas.

Dentro de las principales elevaciones se encuentra la sierra El Alambrado, ubicada en la porción centro oriental, con una orientación de noroeste a sureste, limitada al poniente por el valle de La Bocana, constituida por derrames basálticos en una zona de fuerte fracturamiento; a su vez se encuentra cortada por una serie de arroyos, mostrando cuerpos de conglomerados terciarios en su extremo sureste, depósitos aluviales no consolidados en su periferia y dunas en su extremo noroeste.

El valle de San Rafael se encuentra limitado al norte y poniente por cerros que se desprenden de las sierras Agua de Sodas y El Alambrado, desarrollándose desde cerca de la línea de costa hacia el sur, con una longitud aproximada de 19 km y ancho máximo de 8 km, cubierta en su mayor parte de material aluvial. Al sureste está limitada por rocas riolíticas fracturadas con permeabilidad secundaria. En la porción costera el flujo subsuperficial descarga sus excedentes hacia el mar.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de climas elaborado por W. Köppen, modificado por E. García para las condiciones de la República Mexicana, regionalmente predomina el de tipo seco o desértico con oscilaciones térmicas sensibles que alcanzan un régimen extremo; con algunas zonas calurosas durante el día y noches que van de frías a muy frías.

El área en particular, muestra algunas variaciones debido al contraste del relieve topográfico que conforman sus diversas altitudes, y que atiende a las serranías y planicies aluviales que las caracterizan, siendo su temperatura media anual de 19° C; registrando los meses más calurosos comprendidos generalmente de marzo a octubre temperaturas que van de 46 a 49° C con máxima absoluta hasta 52° C; en los meses más fríos (Noviembre - Febrero) las temperaturas varían de 2.5 y -5° C, con una mínima absoluta de hasta -7° C.

La precipitación promedio anual para esta zona es de 76 mm/año, presentando un valor mínimo de 31 mm, registrado en la estación San Regis, y un valor máximo extraordinario de 372.1 mm. La lámina de evaporación media oscila entre 1,640 y 2,794 mm. La información anterior fue recabada de las estaciones climatológicas Bahía de los Ángeles, El Barril, Santa Gertrudis y San Regis.

3.3 Hidrografía

El acuífero San Rafael-La Palma pertenece a la Región Hidrológica 5 Baja California Centro Este, la cual está limitada al Norte por el arroyo San Pedro y al Sur por el arroyo San Francisquito, en la porción central se ubica los arroyos La Palma y La Pala que desembocan al Golfo de California, captando en época de lluvias las aguas de diferentes arroyos que descienden de las mesetas El Portezuelo, San Cristóbal y Camalli, que sirven de parteaguas entre San Rafael y El Progreso, así como de la sierra El Alambrado que lo separa del Valle La Bocana.

El colector superficial principal lo constituye el propio arroyo La Palma cuyo cauce presenta características de permeabilidad favorables que permiten la infiltración de los escurrimientos superficiales. Los resultados de la disponibilidad media anual determinada respecto a la subregión hidrológica denominada El Alambrado, que corresponde a la misma cuenca hidrogeológica de San Rafael - La Palma, reporta una disponibilidad superficial media anual de 3.540 hm³.

3.4 Geomorfología

Geomorfológicamente el área presenta dos rasgos importantes bien definidos. El primero lo comprende la Sierra El Alambrado, ubicada en la porción centro oriental, con una orientación noroeste-sureste, se encuentra limitada al poniente por el valle de La Bocana. Esta Sierra está constituida por derrames basálticos y brechas de la misma composición, presenta fuerte fracturamiento, y a su vez se encuentra cortada por una serie de arroyos que drenan hacia el valle de San Rafael, al sureste del área se observa la presencia de conglomerados terciarios, mientras que el valle está constituido en su periferia por depósitos aluviales no consolidados y una serie de dunas en su región noreste.

El segundo rasgo ocupa la superficie acuífera del valle de San Rafael, se encuentra limitado al norte y poniente por un conjunto de cerros que se desprenden de las sierras Agua de Soda al norte y El Alambrado al noroeste, desarrollándose cerca de la línea de costa hacia el sur, con una longitud aproximada de 19 km y un ancho máximo de 8 km. El valle está cubierto en su mayor parte por material aluvial y depósitos eólicos. Al sureste se encuentra limitado por rocas ígneas intrusivas que composición ácida que se encuentran cortadas por un sistema de fracturas con orientación NW-SE, que le confieren permeabilidad secundaria a la unidad.

4. GEOLOGÍA

La geología de esta región está ligada a la apertura de la Península de Baja California y por ello a la de la costa Oeste de Norteamérica. La región comprendida entre la Bahía de Los Ángeles y la Bahía San Rafael está formada predominantemente por rocas volcánicas del Mioceno.

La cuenca presenta un basamento de rocas ígneas constituidas por derrames andesíticos de edad 18.8 ± 0.1 Ma, ocasionalmente intercalados con depósitos fluviales, lahares y derrames de basalto emplazados cerca de la línea de costa y que localmente atraparón sedimentos fosilíferos. Los derrames están cubiertos por tobas de 14.0 ± 0.1 Ma y derrames basálticos de 12.1 ± 0.1 Ma; ocasionalmente contienen sedimentos fosilíferos carbonatados. Se considera que esta secuencia está relacionada con la que aflora en la Bahía de Las Ánimas (Escalona-Alcázar, 1999).

Las rocas volcánicas sobreyacen probablemente con discordancia erosional y litológica a las rocas del Terciario Inferior siendo éstas las más antiguas. La relación de tobas ácidas con andesitas, es al parecer de intrusión en algunas localidades y en otras de discordancia con la unidad de rocas básicas, las rocas

volcánicas más antiguas guardan una relación discordante erosional, al igual que entre los derrames básicos.

Esta unidad se originó durante el periodo en el que se desarrolló la mayor actividad volcánica, esta actividad dio lugar a eventos explosivos, y derrames de lava, el inicio de esta actividad (Mioceno) es de carácter ácido, mientras que la etapa final de carácter básico de edad Plio-Cuaternario (figura 2).

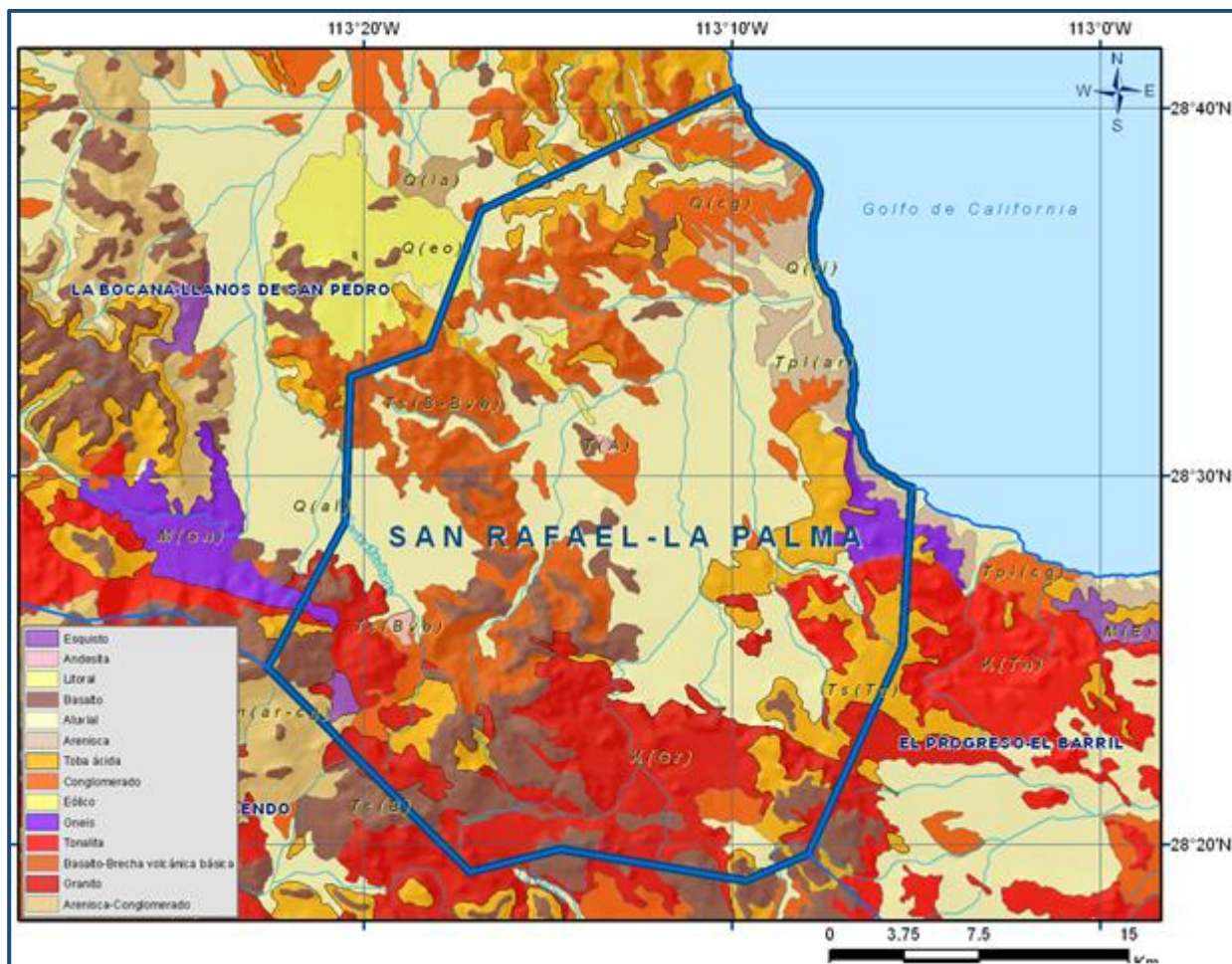


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área.

Formación Bedford Canyon (KsGd - Tn)

La integran un conjunto de bloques caóticos empastados en una masa arcillosa (eolistostroma), de calizas del Jurásico Medio al Tardío. La fauna que presenta es del Jurásico e incluye varias especies de amonoides que tienen afinidad hacia el sur. Con base en la similitud litológica al complejo Franciscano,

los protolitos de la Formación Bedford Canyon y por analogía de la Formación Valle Frechman así como la del esquisto Julián, han sido interpretados como trincheras o depósitos trinchera-talud. Los ambientes de cuenca, forearc y backarc (Retro-arco y Ante-arco) respectivamente, también son posibles (Todd, 1988). La parte oriental está interpretada por granitoides fuertemente deformados de edad Jurásico Medio. Su historia geológica se deduce del esquisto Julián así como su localidad tipo.

Formación Zamora y el Volcán (PopE-F-Mar)

Las unidades litológicas que afloran pertenecen a dos terrenos estratotectónicos, El Terreno Cortés y el Terreno Alisitos. El Terreno Cortés se distribuye en la porción oriental de la Península de Baja California, donde afloran las rocas más antiguas que conforman el basamento, representadas por las formaciones Zamora y El Volcán que están constituidas por rocas metasedimentarias, compuestas por esquistos, gneis, filita, pizarra, mármol, cuarcita, caliza 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 afloran en la porción sureste de la Península de Baja California. Las rocas de estas formaciones se correlación con la secuencia paleozoica que aflora en la Sierra Las Pintas, asignada al Carbonífero por la presencia de crinoides, corales, bivalvos y braquiópodos.

Formación San Ignacio (TmB)

Esta formación presenta un cambio lateral de facies con las formaciones Comondú y San Ignacio del Mioceno Medio (J. T. Smith, 1991), constituida por areniscas e intercalaciones mínimas de limolitas y lutitas, los afloramientos se distribuyen en la Mesa El Copalar y en forma esporádica en la porción central de la península. Contemporáneo a la unidad anterior y a la parte superior de la Formación San Isidro, ocurre el depósito de la Formación Comondú de edad Mioceno (Mc Lean et al., *op. cit.*), compuesta hacia la base por areniscas volcanoclásticas y conglomerados correspondientes a la parte distal de un abanico continental y para la zona proximal la litología consiste de brechas andesíticas, tobas dacíticas, así como escasos derrames andesíticos y dacíticos. Esta secuencia es cubierta en parte por derrames de basalto fisural que constituyen la mayor parte de las mesetas.

Formación Tepetate (Tiar – Im)

Litológicamente, la unidad marina consiste en una intercalación de areniscas amarillentas a café rojizas, con areniscas conglomeráticas, lodolitas y fangolitas con lentes concrecionales. La arenisca se presenta en estratos por lo general delgados a medianos de no más de 40 cm, con una ligera inclinación hacia el mar, de grano fino con buena clasificación y ocasionales capas que contienen residuos de halita. Presenta un sistema de fracturas de espaciamiento moderado, con relleno de yeso, así como estratos muy fosilíferos con abundantes turrítelas y foraminíferos.

Formación Comondú y Toba San Felipe (TmTR-Da-A)

La conforman una serie de capas delgadas a gruesas de areniscas y conglomerados arcósicos, con marcada estratificación, conglomerados de cantos rodados de composición granítica. También contiene derrames de riolita, andesita y basalto, así como aglomerados y tobas de la misma composición.

Formación Imperial (Tr)

Compuesta por clastos y carbonatos, areniscas, conglomerados, y depósitos sedimentarios, dispuestos en estratos delgados. Se le ha asignado una edad del Plioceno y forma pequeñas lomas de pendiente suave.

Formación Salada (Tpl-ar)

Consiste de areniscas y limolitas semicompactas con intercalaciones de coquinas en estratos delgados que suprayace discordantemente en ciertas localidades a las formaciones Tepetate, San Gregorio y Comondú.

Aluvial (Qal)

Está constituido por depósitos clásticos de materiales preexistentes de origen volcánico, tobas y lavas, estos depósitos son resultado de la erosión de la roca madre de origen ígneo que constituye la Formación Comondú; presentan una edad Pleistoceno conforme a su posición stratigráfica y a la presencia de fauna marina (pleistocénica en los litorales del Golfo de California), constituye las vegas de los arroyos con una alta permeabilidad. Representa la unidad principal de recarga al acuífero.

Unidad Eólica (Qhoal)

Integrada por arena de grano fino a medio, se encuentran bien redondeadas y clasificadas. Derivada de rocas ígneas y metamórficas, presenta además, minerales y fragmentos de moluscos, expuestos en las zonas costeras y en algunos valles presentando escasos metros de espesor. Forma dunas arregladas paralelamente a la línea de costa.

Fluvial (Qfl)

Son suelos residuales, aluviones, gravas, arenas, limos, tobas y conglomerados volcánicos que sufrieron posteriormente descomposición química. Constituye los cauces y arroyos en los que se presenta una alta infiltración por sus características altamente permeables.

4.2 Geología estructural

La geología estructural de la zona está representada por una serie de fallas y fracturas. Estos rasgos estructurales están ligados a la actividad tectónica y volcánica. Dentro de las estructuras se encuentran la zona de Falla Ballenas, Partida y San Lorenzo, estructuras compuestas por una serie de fallas normales,

donde además se presenta una falla transformante activa, que corta a todas las anteriores. En este caso la falla más importante presenta una orientación NW-SE y está presente en la Formación Comondú, formando un escarpe muy característico de la expresión morfológica de la vertiente del Golfo de California. Estas fallas de acuerdo a los levantamientos que se presentan en el Golfo de California se consideran de carácter compresivo.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica disponible, se puede inferir que el acuífero principal está alojado en depósitos granulares de origen aluvial, que constituyen el relleno del valle, cuyo espesor total se desconoce. De acuerdo a la sección geológica que propone InGeo, 1979, el espesor del aluvión es de 100 m. Las fronteras y barreras al flujo están representadas por los horizontes menos permeables de las Unidades Tsa y Tsb constituidas por las andesitas y brechas volcánicas de composición intermedia que no presentan fracturamiento, así como las rocas sedimentarias de grano fino que constituyen a la misma formación.

Al igual que otras regiones de la zona, la Formación Comondú cuando presenta permeabilidad secundaria constituye una unidad acuífera de buena capacidad transmisora y de almacenamiento.

5. HIDROGEOLOGÍA

En la zona se distinguen básicamente dos tipos de unidades: las unidades permeables, que actúan como zonas de recarga y como zona de extracción y la unidad impermeable, que funcionan como fronteras y barreras al flujo subterráneo.

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero está alojado en los depósitos granulares de origen aluvial que constituyen el relleno del valle, por lo que es de **tipo libre** y presenta una granulometría muy variada, típica de los rellenos de este tipo, cuyo origen se debe a la acción de fenómenos exógenos y endógenos que facilitan el debilitamiento, fracturamiento, fragmentación, erosión y transporte de las rocas preexistentes. La permeabilidad de estos depósitos se considera buena. Aunque algunas de las unidades que conforman a las formaciones Comondú y Salada tradicionalmente han sido definidas como impermeables, es muy frecuente que presenten permeabilidad secundaria por fracturamiento, lo que les confiere características de unidades trasmisoras de agua hacia los depósitos aluviales. En estas condiciones, sus afloramientos generalmente funcionan como zonas de recarga.

5.2 Parámetros hidráulicos

Por correlación hidrogeológica, se considera que los parámetros hidráulicos son similares a las de los acuíferos vecinos, dentro del estado de Baja California, ya que presentan características geológicas e hidrogeológicas similares.

Por ello, los valores que se asocian a la transmisividad varían entre **2.65 a 79.7 $\times 10^{-3}$ m²/s**, obtenidos mediante la interpretación de pruebas de bombeo. En ninguna de ellas se contó con pozos de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

En el área que cubre el acuífero no existe información historial piezométrica. En 2007 se tiene el registro piezométrico en un solo aprovechamiento, de los dos existentes, del cual se obtuvo el nivel estático. Así mismo se encuentra una zona de inundación ubicada al final del arroyo La Palma, a partir de la medición de nivel estático, se realizó una extrapolación apoyada con la línea de costa y la elevación topográfica del terreno.

Para las configuraciones del nivel estático se cuenta con poco apoyo piezométrico debido a que existen solo dos aprovechamientos. A pesar de ello, basándose en el criterio hidrogeológico, se asume que el acuífero se encuentra en condiciones originales, por lo que las configuraciones de profundidad y elevación del NE son muy semejantes a la configuración topográfica del terreno.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2007 se estima es de 2 m. Los valores más someros se localizan hacia la zona que limita con la salida del flujo subterráneo que alimenta la laguna que se forma al final del arroyo La Palma y La Pala.

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático se infirió de acuerdo con la información disponible, así como las líneas de flujo. Tomando en cuenta este esquema se procedió a calcular los volúmenes de entrada y salida subterránea del acuífero considerando que toda el agua subterránea que entra al acuífero se descarga de forma natural por el acuífero debido a que el sistema se encuentra en una condición de equilibrio (figura 3).

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita elaborar una configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes. Adicionalmente, aunque la configuración de la elevación del nivel estático está inferida, la incipiente extracción que se realiza no ha causado la alteración de las condiciones del estado original del régimen de flujo subterráneo. El volumen de extracción es inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser **nulo**.

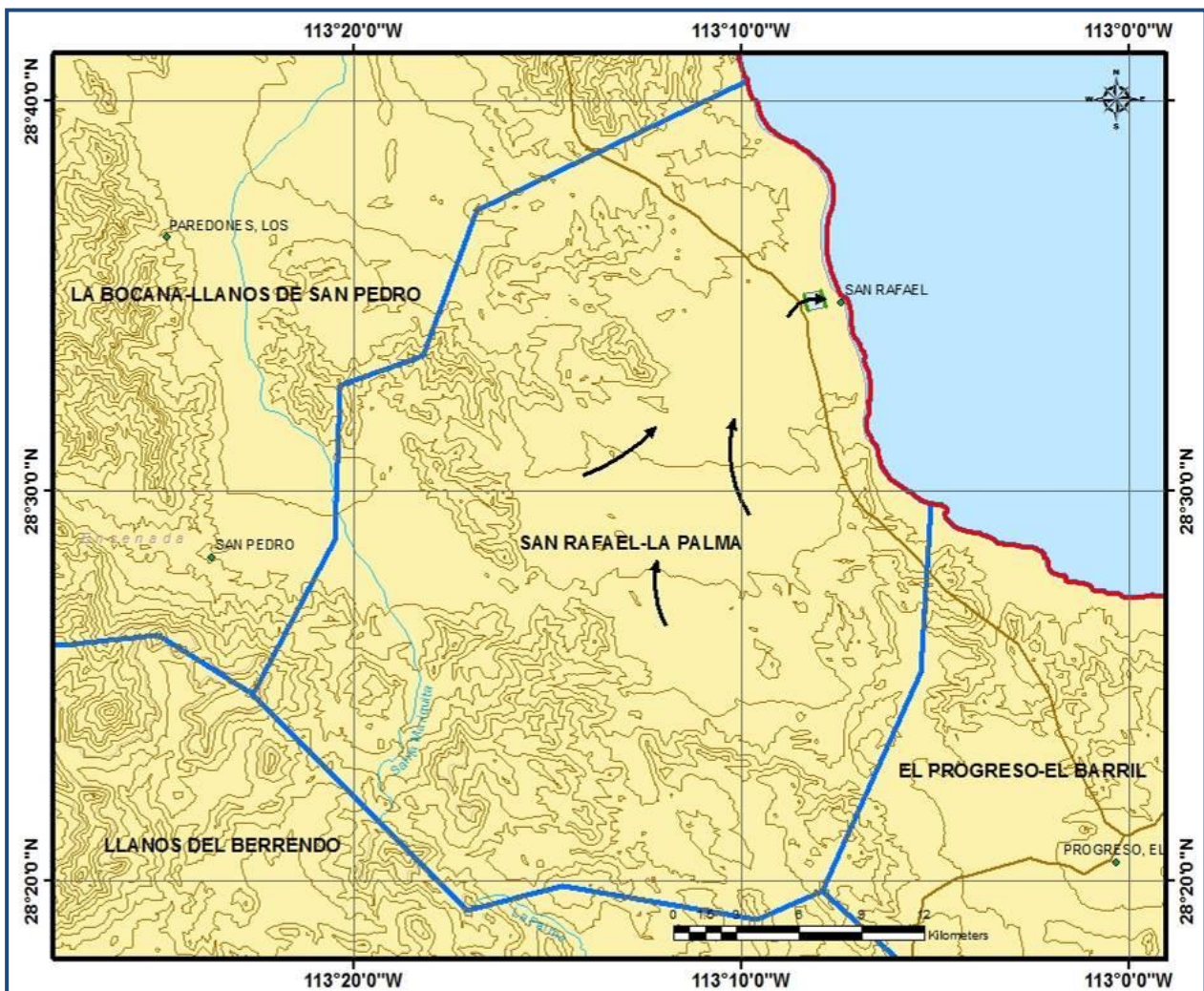


Figura 3. Elevación del nivel estático 2007

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

No se cuenta con información hidrogeoquímica reciente; sin embargo, en el 2007 se realizó una visita de reconocimiento en donde se midieron dos parámetros físico-químicos en el único aprovechamiento establecido en la zona y en el área de descarga, reportó una conductividad alta que indica que el agua es salobre, con un **pH de 7.3 unidades**.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la visita de reconocimiento al sitio se detectó un solo aprovechamiento en la zona del acuífero, este pozo es para uso pecuario y tiene un volumen concesionado de **5,621 m³ anuales**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea involucra el registro de las entradas, salidas y el cambio de almacenamiento, modificaciones que suceden en un volumen específico del acuífero en un determinado tiempo.

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 definido.

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 están representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

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

Considerando los resultados de la visita de campo, se decidió plantear el presente balance para el año 2007. Para ello, se definió un área de balance de 68 km² que corresponde a la zona de mayor potencial y donde se aloja el acuífero.

La ecuación de balance definida para éste acuífero es:

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

Donde:

Rv = Recarga vertical;

Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal;

ETR = Evapotranspiración;

Dm = Descarga por manantiales;

B = Bombeo [m^3];

Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento;

7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, por lo que no existe recarga inducida, por lo que $R_i = 0$.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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 (1) mencionada anteriormente.

De esta manera, despejando la recarga vertical (R_v) se obtiene la siguiente expresión:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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

En el acuífero San Rafael - La Palma la recarga por flujo horizontal de aguas subterráneas ocurre en la zona comprendida en El Alambrado, ubicado al Suroeste, así como en las fronteras laterales de las unidades volcánicas del terciario, tal como se aprecia en la figura 4.

El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

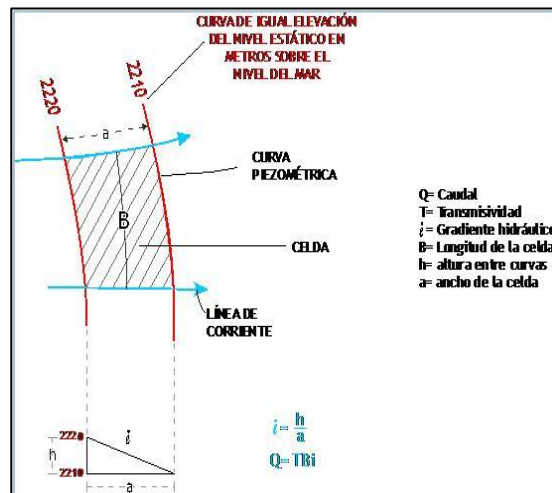
Dónde:

Q = Gasto;

T = Transmisividad;

B = Longitud de la celda;

i = Gradiente hidráulico;



El volumen estimado por entrada de flujo subterráneo horizontal (Eh) es de **0.63 hm³/año**.

Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo 2007

CANAL	LONGITUD (L) (m)	ANCHO (B) (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente (i)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E ₁	5000	500	0.2	0.0004	0.01	0.02	0.6307
Total							0.6307

7.2 Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, las salidas del acuífero ocurren por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el estero (Sh), la evapotranspiración (ETR) y el manantial (Dm) que descarga aguas abajo como flujo base hacia el estero que conecta con el agua de mar.

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de Evapotranspiración: 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). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración. En toda el área de balance los niveles estáticos se estiman se encuentren a profundidades mayores a 5 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración Real es de 80 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 22.8° C y precipitación de 76 mm.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

Donde:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3;$$

$$L = 1462.6176;$$

$$T [^{\circ}C] = 22.8;$$

$$L^2 = 2139250.24;$$

$$P [mm] = 76;$$

$$ETR [mm] = 80;$$

$$P^2 = 5776;$$

El valor bajo de precipitación (**76 mm** anuales), invalida la utilización de métodos empíricos para el cálculo del ETR (Turc, Coutage, etc.). Por tal motivo, para fines del cálculo de dicho valor que resulta de interés por la presencia del agua freática en la zona del estero y considerando su interrelación con los niveles estáticos someros menores a los 5 m de profundidad, se considera que actúa una evapotranspiración potencial promedio de 2,173 mm, que resulta de considerar los valores típicos en zonas aledañas y por lo cual se considera lo que se señala en la figura 4.

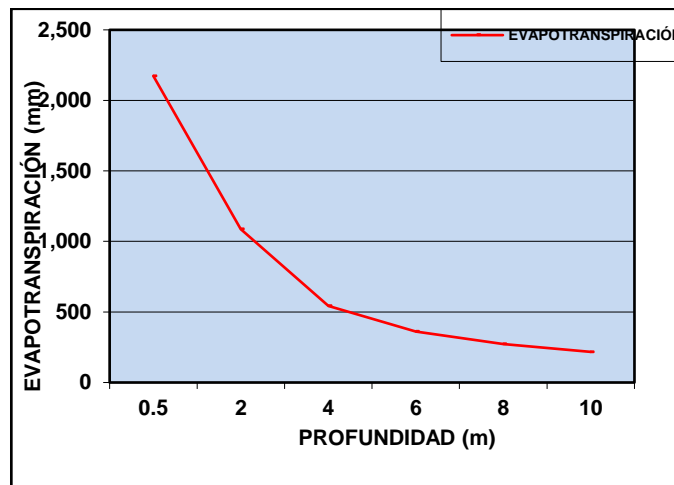


Figura 4. Comportamiento de la evapotranspiración real contra la profundidad

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido.

De la información de campo de la profundidad del NE, correspondiente a noviembre del 2007, se consideran áreas que están por arriba de la cota de 5 m, se procede a calcular el área y se toma un valor promedio (4 m por un valor promedio de la evapotranspiración de 289.73 mm. y que multiplica al área por $4 \times 10^6 \text{ m}^2$, resultando 0.87×10^6 , por ejemplo). El resultado de multiplicar el valor promedio de la evapotranspiración por el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo a la relación expuesta en la figura 3, al final se obtiene el volumen evapotranspirado de **ETR= 0.2 hm³**.

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **0.005621 hm³ anuales**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas por flujo subterráneo horizontal que ocurren como descarga hacia el mar fueron calculadas tomando en cuenta la hipótesis de que todo el flujo que sale de manera subterránea y superficial es el mismo que entra al sistema por lo que se evaluaron las entradas subterráneas tomando en cuenta las observaciones efectuadas en campo para el año 2007 (tabla 3).

Tabla 3. Salidas subterráneas por flujo horizontal

CANAL	LONGITUD (L) (m)	ANCHO (B) (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente (i)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S ₁	500	828	2	0.002415	0.01	0.012077	0.38087
						Total	0.381

El valor estimado promedio para el periodo de salidas subterráneas es de **0.38 hm³ anuales**.

7.2.4 Descarga por manantiales (Dm)

Existe un manantial que descarga aguas abajo como flujo base hacia el estero que conecta con el agua de mar. El volumen estimado de salidas por manantiales fue **de 0.4 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, es de esperar que no se registren alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de abatimiento.

Bajo estas circunstancias, 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 de aguas subterráneas, $\Delta V (S_y) = 0$

Solución de la ecuación de balance

Una vez planteada esta hipótesis y conociendo las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia y en su caso las infiltraciones a lo largo del cauce del arroyo, mediante la expresión (2):

$$R_v = \pm \Delta V(S) - E_h + ETR + D_m + S_h + B$$
$$R_v = 0.0 - 0.63 + 0.2 + 0.4 + 0.38 + 0.0056 = 0.36$$
$$R_v = 0.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera la recarga total media anual (R) es igual a la suma de las entradas:

$$R = R_v + E_h$$
$$R = 0.4 + 0.6$$
$$R = 1.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

- DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R = Recarga total media anual
- DNC = Descarga natural comprometida
- VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural, como inducida. Para este caso, su valor es de **1.0 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 están comprometidos como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; y sostener el gasto ecológico.

Para el caso del acuífero San Rafael-La Palma, este valor es de **0.4 hm³ anuales**, que corresponde a la descarga del manantial (Dm), el cual drena al estero de San Rafael ya que el acuífero lo libera debido a que no tiene capacidad para almacenarlo.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **21,237 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 **20 de febrero del 2020**.

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, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\text{DMA} = R - \text{DNC} - \text{VEAS}$$

$$\text{DMA} = 1.0 - 0.4 - 0.021237$$

$$\text{DMA} = 0.578763 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **578,763 m³** anuales para otorgar nuevas concesiones en el acuífero.

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 el 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 en pozos cercanos a los pie de monte, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1979. Servicios de Prospección y Levantamiento Geológicos y Geofísicos en la Zona Sur de Baja California Norte. Realizado por la empresa InGeo, S.C. Tomo I.