



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SANTIAGO (0320), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA SUR**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. FISIOGRAFIA.....	5
2.1 Provincia fisiográfica	5
2.2 Clima	5
2.3 Hidrografía.....	6
3. GEOLOGIA.....	6
3.1 Estratigrafía	8
3.2 Geología del subsuelo.....	9
4. HIDROGEOLOGIA.....	12
4.1 Tipo de acuífero	12
4.2 Parámetros hidráulicos.....	15
4.3 Piezometría	16
4.3.1 Evolución del nivel estático	16
4.3.2 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	17
5. CENSO DE APROVECHAMIENTOS.....	17
6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	18
6.1 Entradas.....	18
6.1.1 Recarga natural (Rn)	18
6.1.2 Recarga inducida (Ri)	18
6.1.3 Flujo horizontal (Eh)	19
6.2 Salidas	19
6.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	19
6.2.2 Bombeo (B).....	20
6.2.3 Flujo subterráneo (Sh).....	20
6.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	21
7. DISPONIBILIDAD	21
7.1 Recarga total media anual (R)	22
7.2 Descarga natural comprometida (DNC)	22
7.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	22
7.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	23

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 de Santiago, definido con la clave 0320 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la región sur de la Península de Baja California. Sus límites son: al norte con el Golfo de California, al sur con la cuenca de San José del Cabo, al oeste con la Sierra de la Laguna y al este con la cuenca de San José del Cabo y Golfo de California. Geopolíticamente, comprende la superficie del municipio de los Cabos. Sus principales poblaciones son: Santiago, Las Cuevas, La Rivera, Buena Vista, Los Barriles, El Zacatal, San Jorge, Agua Verde, Agua Caliente y El Refugio.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0320 SANTIAGO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	109	31	57.9	23	32	5.2	
2	109	33	35.6	23	27	17.3	
3	109	32	3.6	23	25	41.0	
4	109	32	55.9	23	20	31.0	
5	109	40	41.6	23	22	21.7	
6	109	45	25.4	23	24	29.2	
7	109	50	0.7	23	23	39.7	
8	109	59	24.3	23	28	2.1	
9	109	56	9.1	23	30	55.0	
10	109	59	7.3	23	32	8.4	
11	110	0	21.5	23	32	15.6	
12	109	57	19.2	23	36	4.0	
13	109	53	3.2	23	36	39.3	
14	109	51	6.3	23	35	2.4	
15	109	50	10.9	23	36	16.5	
16	109	46	35.8	23	37	35.6	
17	109	41	41.7	23	40	56.2	DEL 17 AL 18 POR LA LINEA DE BAJ AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
18	109	30	37.3	23	34	6.9	
1	109	31	57.9	23	32	5.2	

1.2 Situación administrativa del acuífero

Por el régimen de extracción prevaleciente, se considera que el acuífero Santiago presenta disponibilidad del recurso agua, de manera que por la demanda existente en la zona de Los Cabos y su subexplotación se retoma como alternativa para abastecer en lo futuro la demanda del crecimiento turístico.

El 6 de julio de 1954, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, el Decreto Presidencial que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo, en la región meridional del territorio de Baja California Sur; dicho decreto abarca todo el ahora, estado de B.C.S. No existe, sin embargo, se pretende que el comité técnico de aguas subterráneas de San José Del Cabo los instrumente. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. No existe, aunque desde el inicio de la entrada en vigor la Ley de Aguas Nacionales en el año de 1992 y con la regularización de aprovechamientos a través del Registro Público de Derechos de Agua, en el año de 1994, el ejercicio de la autoridad se ha enfocado principalmente a los acuíferos sobre - explotados, pero se contempla que su concertación sea por medio del Comité Técnico de Aguas Subterráneas de San José del Cabo, B.C.S.

2. FISIOGRAFIA

2.1 Provincia fisiográfica

Las regiones de Santiago y San José del Cabo forman una planicie alargada en dirección norte-sur, delimitada al norte por el Golfo de California, al sur por el Océano Pacífico, al oeste por las Sierras de la Laguna, San Lorenzo y San Lázaro, que juntos forman la Sierra de la Victoria.

Está comprendida en la Provincia Fisiográfica "Baja California" Subprovincia "horst Sur". Las regiones de Santiago y San José del Cabo Forman una planicie alargada en dirección Norte Sur por el Océano Pacífico, al oeste por las Sierras de la Laguna, San Lorenzo Y San lázaro, que juntas forman La Sierra de la Victoria cuyas cimas sobrepasan los 1600 m.

Y al este por los cerros del Mangie, Venado y Coche, que forman La Sierra de la Trinidad, con alturas de más de 600m. La mitad septentrional está disectada por el arroyo Santiago y la meridional por el arroyo San José.

2.2 Clima

El clima de la región es Desértico, sin embargo se encuentra afectado en gran parte por las corrientes marinas que originan vientos frescos que soplan del noroeste constantemente durante casi todo el año. De acuerdo a la clasificación de Koeppen, se clasifica como Bwhs (e) en donde:

Bw = Clima seco, muy seco o desértico.

h = Semicálido con invierno fresco

S = El régimen de lluvias registradas es de 348.5 mm al año

(e) = Extremoso

Presenta una variación en el valle de 20 a 24° C, siendo la temperatura media de 22° C.

El análisis de la lluvia anual se efectuó para el período 1939 -1980, empleando las estaciones climatológicas denominadas: Santiago, San Bartolo, Sierra de la Laguna, Boca Del Salado, y La Rivera, obteniéndose que la precipitación media para dicho período fue de 348.5 mm. La precipitación mínima se registró en la estación climatológica Boca Del Salado con 234 mm y la máxima en la estación Sierra de la Laguna con 576.2 mm.

La evapotranspiración potencial media es de 2,000 mm, presentando su valor mínimo durante el mes de diciembre y su máximo valor entre los meses de mayo a agosto.

2.3 Hidrografía

El arroyo de Santiago se trata de una corriente secundaria, después del arroyo San José del Cabo, desde su nacimiento en las cercanías de la Sierra de la Laguna hasta su desembocadura en Punta Soledad, drena un área a de 535 km² recibe por la margen izquierda el arroyo de las Cuevas y San Gregorio, por la margen derecha los arroyos Agua Caliente y Los Pocitos; todos nacen en la Sierra de la Laguna y escurren al oriente excepto Los Pocitos que drena desde el lomerío del oriente del valle.

La cuenca de Santiago queda comprendida dentro de la Región Hidrológica 6, Baja California sur-este (La Paz.)

La cuenca la conforma toda el área drenada por el arroyo Santiago, que limita con los parteaguas de la Sierra la Laguna, la cuenca de San José, la cuenca de San Bartolo y el Golfo de California.

El arroyo Santiago, recibe en su recorrido los afluentes de Las Cuevas y San Gregorio, por la margen izquierda, Agua Caliente y los Pocitos por la margen derecha.

3. GEOLOGIA

Tomando en cuenta la descripción anterior y que las dos zonas pertenecen a la misma provincia fisiográfica, además de que los contactos geológicos que se observan tanto en la cuenca de San José del Cabo como en el Valle de Santiago son los mismos, los cuales están constituidos por rocas pertenecientes al Mioceno y Plioceno, es de considerarse que la descripción geológica de ambos tenga alguna similitud (figura 2).

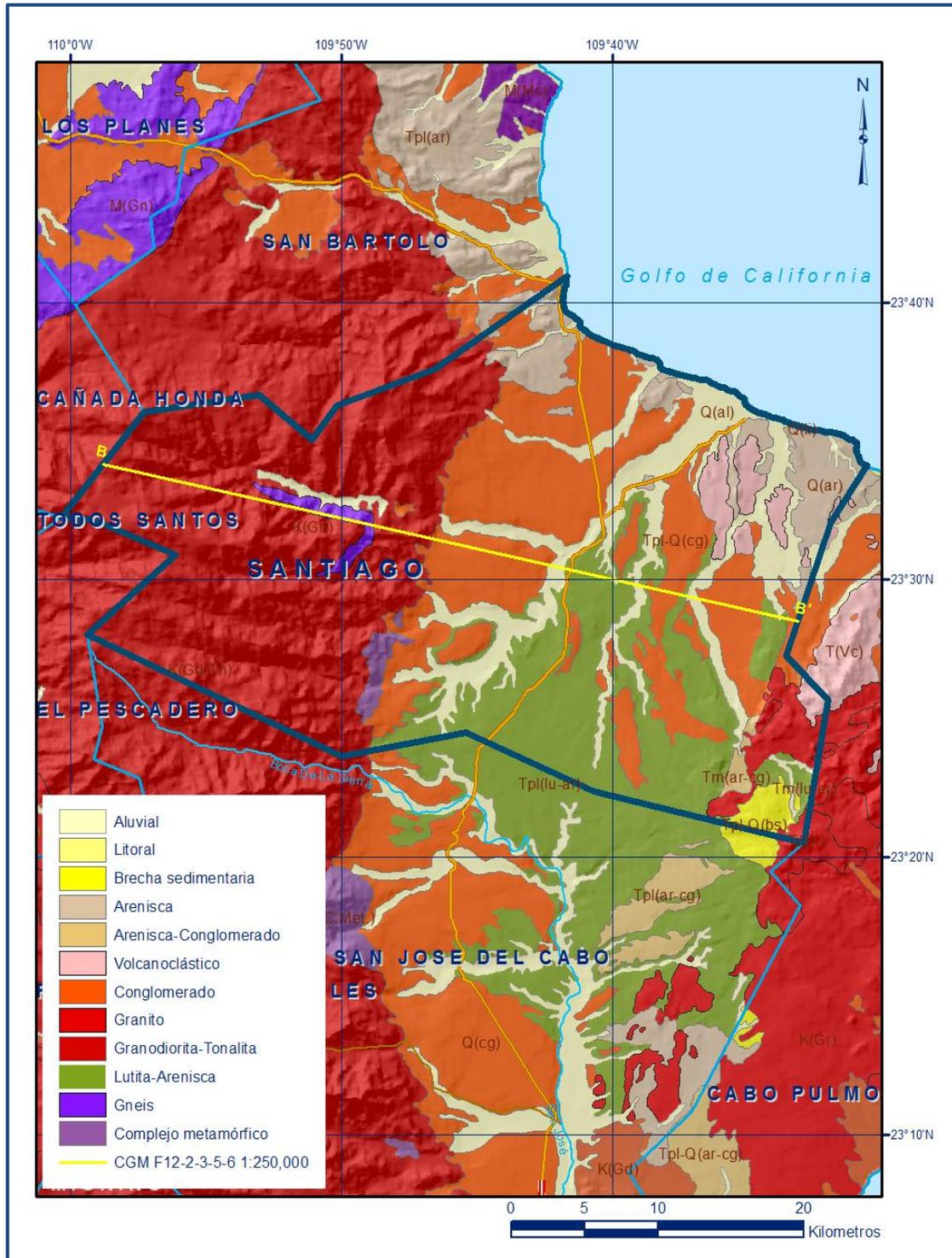


Figura 2. Geología general del acuífero

3.1 Estratigrafía

Las rocas más antiguas afloran en los pilares tectónicos que forman las Sierras de la Victoria al oeste y la Sierra de la Trinidad al este consisten de rocas metamórficas como orto y paragneises asociados con intrusivos graníticos que en conjunto representan el basamento cristalino de la península.

Una mediana actividad volcánica ocurre en el Mioceno tardío y se representa por las extravasaciones del extremo nororiental. A finales del Mioceno tardío, Plioceno temprano se inicia un depósito continuo de sedimentos marinos de baja profundidad que finaliza con el levantamiento general de la región en las postrimerías del Pleistoceno.

Es importante indicar que el Dr. R.F. Dill informa de un espesor mayor de 1,000 m de sedimentos en la plataforma continental del golfo, precisamente al frente de Buenavista.

Complejo Ígneo Metamórfico

Mina (1957) usa este nombre para designar a las rocas metamórficas, intrusivos graníticos y extrusivas asociadas que forman el espinazo de la Península de Baja California. Gabb (1869) durante su expedición en esta parte de la Península, indica que la mayoría de los picos de las sierras están formados de granitos y sienitas.

Formación Comondú

Con este nombre Heim (1922, p. 542) designa una gruesa secuencia de rocas efusivas que afloran en el profundo cañón cerca del poblado de Comondú. Esta unidad consiste en corrientes, diques y diquestratos de basalto a riolita con sus correspondientes rocas intermedias. También incluye las areniscas tobáceas que forman la base de esta unidad.

Formación Trinidad

Secuencia de 200 m de lutitas y limolitas de color gris verdoso, en bancos gruesos y areniscas de cuarzo calcáreas, con intercalaciones de diatomita, que afloran en ambos márgenes del arroyo de la Trinidad. Es característico observar vetillas de yeso posiblemente secundario.

La parte inferior de la unidad se observa un conglomerado de matatena con fragmentos de roca granítica, volcánica y roca verde, su matriz es arenisca de cuarzo cementado por carbonato de calcio. El carácter de estos conglomerados es lenticular.

Formación Salada

Heim (1922, p.55) designa con este nombre a los clásticos marinos de edad pliocénica que afloran en el arroyo la salada, el cual desemboca en la bahía de Almejas, frente a la Isla Margarita.

Mina (1957, p. 207) describe a la formación salada “formando el límite oriental del batolito en el extremo sur de la Península, donde cubre una área de forma más o menos triangular entre Punta Arena, San José del Cabo y Norte de Miraflores”, el espesor excede los 700 m y en algunas áreas está formada por capas calichosas y coquinaceas colocadas a unos 40 o 60 msnm.

Depósitos Fluviales

Arenas sueltas bien graduadas. Afloran indistintamente en toda el área, principalmente al norte del poblado de Santiago.

Gravas bien graduadas. Se presentan al norte y sur de Santiago, así como a 2 km del poblado de Agua Caliente.

Limos y arenas. Se encuentran aflorando en la parte norte y sur de Santiago, cerca de los poblados de Agua Caliente, La Misión, Las Cuevas, El Leonero y La Rivera.

3.2 Geología del subsuelo

La resistividad de un material depende principalmente de los siguientes factores: la porosidad, que disminuye en forma inversa el aumento de las resistividades, en función de su contenido de sales disueltas, es decir mientras más sales contengan una formación, menor será su resistividad y el contenido de materiales arcillosos, que generalmente baja el valor de la resistividad de la formación.

En el caso de rocas compactas no fracturadas, éstas presentan por lo general resistividades muy elevadas.

Con objeto de tener una visión de conjunto, de los resultados de la interpretación de los sondeos eléctricos verticales, se consideró grupos de materiales con cierto rango de resistividades que fueran identificables con las unidades litoestratigráficas anteriormente discutidas o al menos con unidades con variaciones de permeabilidad, lo cual refleja sus posibilidades geohidrológicas.

En el área de estudio con las características geológicas observadas y con la información de los sondeos se seleccionaron varios grupos, cuyas características eléctricas de la parte superior a la inferior son las siguientes:

A1: Limos areno-arcillosos.

B1: Rellenos recientes constituidos por arenas y gravas permeables, con un rango de resistividades de 200 a 400 ohms-m.

C1: Formación de gran permeabilidad compuesta por arenas gruesas, gravas y cantos rodados, con un rango de resistividades de 40 a 100 ohms-m.

D1: Zona de permeabilidad media constituida por arenas con poca arcilla, con un rango de resistividades de 25 a 30 ohms-m.

E1: Formación arcillo-arenosa de permeabilidad reducida con un rango de resistividades de 10 a 20 ohms-m.

F1: Arenas y arcillas saturadas con agua salobre con un rango de resistividades de 3 a 7 ohms-m.

A2: Acarreos recientes constituidos por arenas, gravas y cantos rodados de formaciones permeables, con un rango de resistividades de 100 a 600 ohms-m.

B2: Arenas gruesas y gravas de gran permeabilidad, con un rango de resistividades de 30 a 100 ohms-m.

C2: Formación areno arcillosa de permeabilidad reducida, con un rango de resistividades de 15 a 25 ohms-m.

D2: Horizonte donde predominan las arenas, formación permeable, con una resistividad de 30 ohms-m.

E2: Basamento granítico, con un rango de resistividades de 120 a 160 ohms-m.

A3: Arenas gravas y cantos rodados, con un rango de resistividades de 100 a 300 ohms-m.

B3: Formación compuesta de arenas y gravas de buena permeabilidad, con un rango de resistividades de 40 a 80 ohms-m.

C3: Horizonte areno-arcilloso, permeabilidad reducida, con un rango de resistividades de 20 a 25 ohms-m.

A4: Arenas gravas y cantos rodados formación permeable, con un rango de resistividades de 1,000 a 2,000 ohms-m.

B4: Arenas gruesas y gravas formación permeable, con un rango de resistividades de 60 a 100 ohms-m.

A5: Acarreos recientes constituidos por arenas, gravas y cantos rodados formación permeable, con un rango de resistividades de 200 a 300 ohms-m.

B5: Arenas gruesas y gravas permeables, con un rango de resistividades de 30 a 100 ohms-m.

C5: Basamento granítico, con una resistividad 160 ohms-m.

D5: Conglomerado constituido por arenas, gravas y cantos rodados en cementante arcilloso formación de permeabilidad reducida, con un rango de resistividades de 80 a 200 ohms-m.

4. HIDROGEOLOGIA

4.1 Tipo de acuífero

Los valores de coeficiente de almacenamiento obtenido de 0.13 y 0.14, los cortes geológicos y la investigación geofísica infieren que el acuífero es de **tipo libre**, aunque este puede estar afectados por la presencia de lentes arcillosos, el rendimiento específico es del orden de los 0.12 a 0.2 y por su vecindad al golfo de California presenta además características de un acuífero libre y costero.

Complejo Ígneo Metamórfico y Rocas Volcánicas

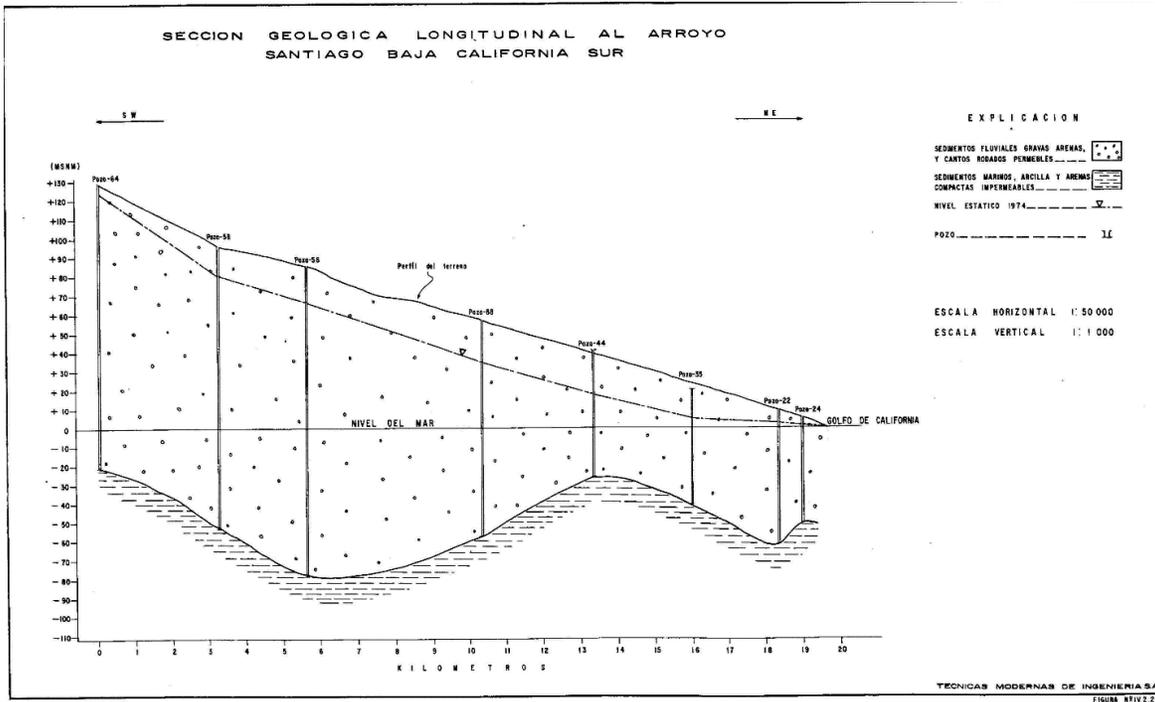
Esta unidad aflora en la porción occidental de la cuenca, ocupando aproximadamente el 50% del área, formada por granitos, dioritas, gneis y migmatitas, constituye una unidad impermeable, participando en el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca, solamente con las aportaciones de los escurrimientos superficiales originados por las lluvias sobre su superficie, los cuales escurren rápidamente a causa de su accidentado relieve, hacia los cauces de los Arroyos de Las Cuevas y San Gregorio que recolectan la mayor parte y la menor hacia la terraza arenosa.

Sobre estas rocas, como producto de intemperismo, se forma una delgada cubierta de suelos rojos arcillosos, mezclados con materia orgánica en descomposición, cuya capacidad de retención es despreciable.

Las rocas volcánicas formadas por basaltos, andesitas y aglomerados volcánicos afloran en el extremo Sureste de la cuenca, ocupando una extensión menor a los 20 km². De la misma manera que en las rocas ígneas y metamórficas, sobre estas rocas volcánicas se forma una cubierta de suelos de intemperismo que retienen muy escasa cantidad de agua.

Sedimentos Marinos Arcillosos

Bajo este nombre, se agruparon a los sedimentos arenosos, arcillosos y horizontes de yeso de la Formación Salada, así como a las areniscas y conglomerados de la Formación San Raymundo. La distribución horizontal de afloramientos de estas rocas ocupa aproximadamente el 20% del área, teniendo su mayor expresión en la margen derecha del Arroyo Santiago, donde afloran cuerpos de areniscas, lutitas y limolitas de naturaleza impermeable.



La interpretación de los cortes geológicos de los pozos perforados sobre el cauce del arroyo permitió elaborar la sección geológica longitudinal de la sección no. 1, donde se muestra la traza del perfil sepultado de los materiales arcillosos que representan el basamento impermeable del acuífero fluvial. Concomitante a lo anterior, la elaboración de secciones transversales de apoyo y reconocimientos de campo, evidenciaron que la distribución en el subsuelo de los materiales finos impermeables se continúa hacia ambas márgenes del arroyo constituyendo en los límites del cauce las fronteras laterales impermeables.

La amplia terraza erosional de la margen izquierda y la menos amplia de la margen derecha, están formadas por los materiales de esta unidad en una intercalación de capas de arcilla con arena, arcilla compacta y arenas finas a gruesas, con mayor repetición de capas de arcilla compacta, las que aumentan todavía más hacia la base de la unidad.

La intercalación de estas capas de arcilla con arena y arcilla compacta, disminuyen notablemente la permeabilidad de esta unidad, como lo demuestran las muy bajas capacidades específicas y transmisividades de los pozos perforados en ella. Cubriendo a esta unidad, existe sobre las terrazas erosionables una delgada capa de arena cuyo espesor no excede los 10 metros.

Esta capa arenosa tiene alta capacidad de retención del agua de lluvia, sin embargo, una parte del agua retenida se drena hacia las áreas permeables del arroyo y la otra se pierde por evaporación.

Depósitos Fluviales

La distribución horizontal de los sedimentos fluviales permeables se encuentra restringida a los cauces de los arroyos Santiago y Las Cuevas. De estos, el Arroyo Santiago por su desarrollo geológico es el que contiene el acuífero fluvial objeto del presente estudio. Los sedimentos fluviales permeables se componen de arenas sueltas y gravas bien graduadas cuyo espesor varía de 65 a 160 metros.

Pudiendo observarse que los mayores espesores de estos materiales corresponden a los atravesados por los pozos 64, 58 y 56; de los cuales, los pozos 64 y 56 se ubican frente a la desembocadura de los arroyos de San Gregorio y Las Cuevas, respectivamente, los cuales al hacer su unión con el arroyo Santiago labraron más profundo sobre los materiales arcillosos impermeables.

Hacia aguas abajo, el espesor de los materiales fluviales disminuye a 66 metros; sin embargo, esta disminución de espesor queda compensada con la anchura del cauce que en esta zona alcanza hasta los 3 kilómetros.

Aguas arriba del pozo 64, el Arroyo Santiago presenta un estrechamiento de su cauce corriendo encajonado entre materiales arcillosos, ya en las proximidades del contacto entre estos últimos y las rocas intrusivas a la altura del poblado de Agua Caliente.

En esta zona existen 4 pozos y 6 norias con bajas producciones, debido probablemente a la predominancia de materiales finos sobre los fluviales de mayor granulometría y a la menor profundidad a la que se encuentra el basamento regional granítico.

Por esta razón, a la altura del poblado de Agua Caliente, el flujo subálveo del arroyo aflora en forma de manantial debido a la disminución del espesor de materiales fluviales y por tanto a la presencia de poca profundidad de rocas arcillosas que funcionan como levantadores del flujo.

Ante estas condiciones hidrogeológicas descritas anteriormente, el análisis cuantitativo del Arroyo de Santiago se llevó a cabo en el tramo comprendido desde la confluencia con el Arroyo de Las Cuevas hasta su desembocadura, cubriendo una superficie de 31 km².

Bajo esta superficie acuífera se encuentra un espesor promedio de sedimentos saturados de 45 metros, que tienen un rendimiento específico del 14%, donde se almacena un volumen de agua subterránea de 283 millones de m³; de los cuales los 169 que se encuentran sobre el nivel medio del mar, se drenan subterráneamente hacia el Golfo de California en una razón de 450 litros por segundo. Este drenado natural del almacenamiento subterráneo se manifiesta por el abatimiento progresivo de los niveles estáticos desde 1971 a la fecha, que en promedio descienden 0.475 metros por año.

4.2 Parámetros hidráulicos

Las pruebas constataron de una etapa de abatimiento y/o de una de recuperación, la duración de cada etapa varió entre 3.5 y 72 horas, en función de la disponibilidad del pozo y del comportamiento de su nivel de agua.

Algunas muestras dos o más tramos rectos con pendientes crecientes, probablemente asociados con fronteras laterales dentro del área afectada por el bombeo, en otras se aprecia un rápido descenso del nivel dinámico durante los primeros minutos, seguidos de una estabilización que puede ser aparente y efectos del drenaje diferido, en otras más, el nivel dinámico baja escalonadamente sugiriendo que se trata de un sistema libre estratificado en el que la superficie freática se mueve en materiales de diferente coeficiente de almacenamiento.

Algunos datos generales de las pruebas de bombeo, así como los resultados de su interpretación se consignan en tablas, saltan a la vista la gran capacidad transmisora del acuífero representada por coeficientes de transmisividad mayores de 4×10^{-2} y por caudales específicos mayores de 6 lps, en la mayoría de los casos. En algunas áreas se encuentran transmisividades mayores de 0.1 m²/s y caudales específicos de 70 a más de 200 lps/m, valores extraordinarios para un acuífero granular y seguramente asociados con gravas y boleas de gran permeabilidad.

4.3 Piezometría

La posición de los niveles estáticos está controlada principalmente por la topografía y en menor grado por el bombeo de los pozos: el agua prácticamente aflora en el litoral y en la laguna de Santiago, aumentando su profundidad hacia los cauces y hacia los bordes hasta alcanzar valores máximos de 20 m.

De 1970 a 1980 los niveles no muestran variaciones significativas, la carga hidráulica decrece desde 150 msnm en la parte alta del arroyo agua caliente hasta valores nulos en las inmediaciones del litoral, siendo de 105 msnm en el poblado de Santiago.

El gradiente hidráulico varía a lo largo del valle entre 2 y 10 por millar y el flujo subterráneo converge localmente hacia la laguna de Santiago que constituye un nivel base de descarga del acuífero, en las proximidades del litoral los efectos del bombeo son ligeramente perceptibles siendo sus valores de equipotencial entre 10 y 20 msnm.

4.3.1 Evolución del nivel estático

Los hidrógrafos revelan que el comportamiento de los niveles estáticos varían notablemente en el área.

En los pozos ubicados en la parte baja del valle, los niveles de agua oscilan ligeramente, manteniendo la misma elevación media en todo el intervalo de registro; por el contrario, en los pozos localizados en las partes altas de los valles, los niveles oscilan notablemente, presentando una clara tendencia descendente de 1970 a 1975 y fluctuaciones importantes con tendencia ascendente de 1975 a 1980. Comportamiento diferente se observa en los pozos no. 34, 35, 44, 79 y 80 donde se registra descenso gradual de los niveles con tendencia a la estabilización.

Tal comportamiento de niveles muestra claramente que la recarga de los acuíferos varía sustancialmente a lo largo del tiempo: años de pobre alimentación (1970 a 1974) alternan con otra de recarga relativamente abundantes (1976 a 1980) y que la recarga es originada principalmente en la parte alta de los valles, con el consiguiente ascenso de los niveles del agua. Por otra parte, la distribución de los abatimientos revela que durante los años secos el acuífero se descarga por evapotranspiración y por drenado natural hacia el mar, y que el bombeo o descarga artificial sólo tiene cierta influencia entre los poblados de santa cruz y la rivera.

4.3.2 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Las concentraciones de sólidos totales disueltos en la parte media de la cuenca varía de 367 a 503 ppm y en su zona costera (Buenavista y la Rivera) con 1052.5 a 976.5 ppm. Conforme al predominio de aniones y cationes se definen dos tipos de agua, una de tipo mixto y otra del tipo sódica.

En el triángulo de los aniones el agua es de tipo bicarbonatada mixta y es debido al arrastre de las sales por el viento y la influencia cercana de la costa.

La mayoría de los pozos que se encuentran en la costa no tienen calidad de agua permisible para fines potable por estar afectados por el agua de mar y en general la mayor parte de los pozos su contenido en sales es tolerante a los fines de riego.

5. CENSO DE APROVECHAMIENTOS

Hasta 1969 la extracción era poco significativa, ya que solo existían captaciones de bajos volúmenes, durante los primeros años de 1970 se desarrollaron pequeñas unidades de riego por bombeo.

En 1974 se tenían 89 aprovechamientos subterráneos, 51 pozos y 38 norias de estos solo 51 se encontraban activos, 21 con fines agrícolas, 24 para uso doméstico y abrevadero, 1 para uso industrial y 5 para uso público - urbano, siendo sus volúmenes extraídos entre 4 a 5 millones de m³.

En 1980 se tenían 116 aprovechamientos subterráneos, 71 pozos y 45 norias de estos solo 93 se encontraban activos, 51 con fines agrícolas, 34 para uso doméstico y abrevadero y 8 para uso público-urbano, durante el intervalo de 1979 a 1980 la extracción fue de 8.3 millones de m³ de los cuales 1.4 hm³ se captaron aguas arriba del poblado de Santiago, 1.7 hm³ entre las confluencias del arroyo Santiago con los de San Jorge y San Dionisio, y 5.2 hm³ entre el poblado de las Cuevas y el litoral.

Con el programa de titulación de 1994 a 1999 se regularizaron 168 aprovechamientos subterráneos, de los cuales 47 con fines agrícolas, 96 para uso doméstico abrevadero, 19 para uso de servicio y 6 para uso público urbano, siendo sus volúmenes concesionados por 13.23 hm³ de los cuales 7.4 hm³ para uso agrícola, 0.23 hm³ pecuario-doméstico, 4.7 hm³ servicios y 0.9 hm³ para el uso público-urbano.

6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

6.1 Entradas

La infiltración de los escurrimientos superficiales constituye la principal fuente de recarga horizontal del acuífero, siendo del orden de 16.103 hm³/año; por el contrario, la infiltración directa de la precipitación pluvial y/o recarga vertical es del orden de los 8.397 hm³/año, menor que la recarga horizontal. Lo anterior es considerando que a principio de los "70" el cambio de almacenamiento no era significativo por su casi nula extracción.

Siendo su salida horizontal de 9.5 hm³/año y la evapotranspiración de 16 hm³/año, resulta una recarga natural del orden de los 24.5 hm³/año. Considerándose que para el periodo 1970-1975 la recarga fue en promedio de 19 hm³/año y para el periodo 1975-1980 de 30 hm³/año.

6.1.1 Recarga natural (Rn)

Las áreas principales de recarga se localizan en la parte del valle de Santiago y en los valles de los arroyos San Jorge y San Dionisio donde predominan los depósitos fluviales de grano grueso, en un valor de 24.5 hm³/año.

La recarga horizontal, ocurrida por sus arroyos es calculado como el producto del volumen precipitado de 313.908 hm³/año por su coeficiente de escurrimiento del orden de 0.0513 resultando 16.103 hm³/año.

6.1.2 Recarga inducida (Ri)

Se recibe también aportación de las terrazas limítrofes, ya que la abundante vegetación intercepta gran parte de la escasa precipitación y los materiales son de baja capacidad de infiltración, no obstante, en toda su considerable extensión superficial debe de generarse un apreciable volumen de infiltración que circula hacia las partes bajas, alimentando al subsuelo.

6.1.3 Flujo horizontal (Eh)

En los años de escurrimiento extraordinarios, generalmente asociados con lluvias ciclónicas, el agua llega superficialmente al mar generando a su paso recarga prácticamente en toda la longitud de los cauces en un valor promedio anual de 16.103 hm³/año.

6.2 Salidas

6.2.1 Evapotranspiración (ETR)

La cuantificación de la descarga por evapotranspiración es muy incierta, dada la complejidad del fenómeno y la multitud de factores que en él intervienen, no controlables en la práctica: el tipo y densidad de vegetación, la profundidad y evolución del nivel freático, la permeabilidad vertical y el contenido de humedad de los materiales en la zona de aireación, en el caso particular del valle de Santiago, se tienen descargas por evaporación directa de aguas subterráneas y por evapotranspiración.

Cuando la superficie freática oscila en materiales de grano grueso a profundidades menores de un metro, el agua asciende por capilaridad hacia la superficie del terreno y se evapora. Puesto que tal condición se presenta en una área de 0.5 km², que comprende la laguna de Santiago y sus inmediaciones, y la evaporación potencial en esa área es de unos 2,000 mm/año, la descarga por evaporación directa del agua subterránea resulta del orden de 1 hm³/año.

Mucho más incierta es la cantidad de agua evapotranspirada por la vegetación natural, aunque cualitativamente puede afirmarse que en el caso de que se trata debe ser considerable.

En efecto, se sabe que las plantas freatofitas desarrollan sistemas radiculares que alcanzan profundidades hasta de 30 m y que una sola de ellas puede descargar a la atmósfera varias decenas de litros diarios, por ejemplo los mezquites evapotranspiran alrededor de 1 hm³/año por km² cuando los niveles de agua se encuentran a profundidades de unos 10 m.

Estudios realizados en la zona desértica del oeste de EE.UU., revelaron que la lámina media de evapotranspiración es de unos 0.3 m/año.

Es lógico suponer que en el valle de Santiago, donde la vegetación es más densa y frondosa, la lámina de evapotranspiración debe de ser bastante superior a la cifra mencionada, pero aun aplicando el mismo valor a una superficie de 50 km², el volumen de agua evapotranspirada resulta de 16 hm³/año.

Para el intervalo 1970-1975, el volumen de agua descargado por evapotranspiración se supuso constante a lo largo de los 5 años por considerar una lámina muy pequeña, esto es en 80 hm³.

Para el intervalo 1975-1980 la evapotranspiración se supuso constante durante todo este intervalo igual a la del anterior, es decir de 80 hm³.

Naturales

La descarga natural está constituida por la evapotranspiración y por el flujo subterráneo que escapa al Golfo de California.

La evapotranspiración se considera constante, siendo del orden de los 16 hm³/año y el flujo subterráneo que escapa al mar es cada vez menor, siendo en el periodo 1970-1975 de 9.5 hm³/año y 1975-1980 de 3 hm³/año.

6.2.2 Bombeo (B)

Para el intervalo 1970-1975, la cantidad de agua extraída por las captaciones aumentó linealmente desde un valor prácticamente nulo en 1970, hasta unos 5 hm³/año en 1975; por tanto la extracción total correspondiente al lapso en cuestión fue del orden de 13 hm³.

Para el intervalo 1975-1980, se supuso que la extracción de las captaciones aumentó linealmente, desde unos 5 hm³ en 1975, hasta 8 hm³ en 1979, la cantidad de agua extraída del subsuelo en el intervalo de tiempo considerado fue de 13 hm³.

6.2.3 Flujo subterráneo (Sh)

Para el intervalo 1970-1975 el flujo subterráneo se considera de la siguiente manera: Se deduce que el caudal del flujo subterráneo decreció gradualmente de 0.3 m³/s en 1970 a 0.1 m³/s en 1975, el promedio de ambos aplicado al intervalo de 5 años resulta en una descarga subterránea al mar de 9.5 hm³.

Para el intervalo 1975-1980 el flujo subterráneo se considera de la siguiente manera: El caudal de flujo subterráneo hacia el mar fue de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1975 y no varió apreciablemente en todo el intervalo, resultando de 3 hm^3 .

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

La cuantificación del agua subterránea se efectuó por medio del análisis de la información del periodo 1970-1975 y 1975-1980, haciendo uso de la ecuación general del balance volumétrico basado en el principio de conservación de la materia y en el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero.

Resultando para el periodo seco de **1970-1975**:

$$\text{Cambio de almacenamiento} = 19 - (9.5 + 16 + 2.6)$$

$$\text{Cambio de almacenamiento} = -9.1$$

En este periodo el acuífero no recibió aportación importante dentro del área de balance.

Resultando para el periodo lluvioso de **1975-1980**:

$$\text{Cambio de almacenamiento} = 30 - (3 + 16 + 6.6)$$

$$\text{Cambio de almacenamiento} = +4.4$$

En este periodo se considera que la evolución de los niveles de agua equivale a una recuperación. El volumen actualmente concesionado es el siguiente:

AGRICOLAS	PEC-DOM	SERVICIOS	PUB-URBANO	TOTAL hm ³ /AÑO
7,519,400	242,851	4,690,396	905,00	13,357,647

7. 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:

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

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

7.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **24.5 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

7.2 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, su valor es de **4.6 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas.

7.3 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 **19,601,614 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**.

7.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 24.5 - 4.6 - 19.601614 \\ \text{DMA} &= 0.298386 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **298,386 m³ anuales**.