

# SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO SAN FELIPE-PUNTA ESTRELLA (0222), ESTADO DE BAJA CALIFORNIA

# Contenido

1.	GENERALIDADES	2
Ant	tecedentes	2
1.1.	Localización	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero	3
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3.	FISIOGRAFÍA	6
3.1.	Provincia Fisiográfica	6
3.2.	Clima	7
3.3.	Hidrología superficial	8
3.4.	Geomorfología	9
4.	GEOLOGÍA	9
4.1.	Estratigrafía	12
4.2.	Geología estructural	15
4.3.	Geología del Subsuelo	16
5.	HIDROGEOLOGÍA	17
5.1.	Tipo de acuífero	17
5.2.	Parámetros hidráulicos	17
5.3.	Piezometría	18
5.4.	Comportamiento hidráulico	18
5.4.1	Profundidad al nivel estático	18
5.4.2	Elevación del nivel estático	19
5.4.3	Evolución del nivel estático	20
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	21
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	22
<b>7.</b>	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	22
7.1.	Entradas	23
7.1.1.	Recarga vertical (Rv)	23
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	23
7.2.	Salidas	24
7.2.1.	Bombeo (B)	25
7.2.2.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.3.	Cambio de almacenamiento ΔV(S)	25
8.	DISPONIBILIDAD	26
8.1.	Recarga total media anual (R)	27
8.2.	Descarga natural comprometida (DNC)	27
8.3.	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	27
8.4.	. Disponibilidad de aguas subterráneas (DMA)	28
9.	BIBLIOGRAFÍA	29

#### 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-2000 "Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 Felipe-Punta Estrella, definido con la clave 0222 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza geográficamente en la porción centro-oriental del estado de Baja California, entre los paralelos 30°36′59" y 31°05′30" de latitud norte y los meridianos 114°41′32" y 115°04′42" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,290 km². Limita al norte con el acuífero El Chinero; al noroeste y oeste con Valle Chico-San Pedro Mártir, y al sur con el acuífero Matomí-Puertecitos. Al noreste y este su límite natural es el Golfo de California (figura 1). Geopolíticamente, la superficie del acuífero pertenece a dos municipios: la poción norte al municipio de Mexicali y la porción central y sur al municipio de Ensenada.

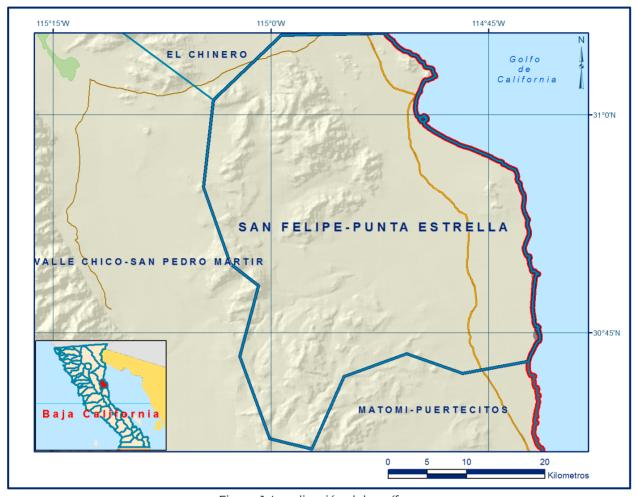


Figura 1. Localización del acuífero

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

# 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Península de Baja California y al Consejo de Cuenca Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999. 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.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

#### **ACUIFERO 0222 SAN FELIPE-PUNTA ESTRELLA**

VERTICE	LONGITUD OESTE			L	ATITUD NOF	OBSERVACIONES	
VERTICE	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	OBSERVACIONES
1	114	46	47.7	30	42	10.4	
2	114	50	39.0	30	43	33.1	
3	114	54	58.2	30	41	58.3	
4	114	57	10.4	30	36	58.5	
5	115	0	3.8	30	37	41.6	
6	115	2	8.0	30	43	21.0	
7	115	0	50.5	30	48	12.5	
8	115	2	47.3	30	49	44.7	
9	115	4	38.0	30	54	59.6	
10	115	3	57.9	31	1	1.0	
11	114	59	16.1	31	5	29.4	
12	114	52	6.6	31	5	35.3	DEL 12 AL 13 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
13	114	42	16.1	30	42	59.9	
1	114	46	47.7	30	42	10.4	

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos de Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El principal usuario es el público-urbano. En el territorio del acuífero no se localizan unidad o Distrito de Riego alguno ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico Aguas Subterráneas (COTAS). Su extremo nororiental pertenece a la Reserva de la Biosfera "Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado", declarada el 10 de junio de 1993.

#### 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:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO COMPLEMENTARIO DEL VALLE DE SAN FELIPE, MUNICIPIO DE MEXICALI, elaborado por la Coordinación Regional de Infraestructura Hidráulica del Noroeste, para la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1986. Consistió en un reconocimiento geológico y una serie de sondeos eléctricos verticales, los cuales describen características y observaciones hidrogeológicas de las unidades, que permitieron definir su funcionamiento hidráulico. La interpretación hidrogeoquímica a los resultados de los análisis de fisicoquímicos practicados a las muestras de agua subterránea,

reportó que la calidad del agua presentaba altas concentraciones de flúor y presencia de temperaturas elevadas.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE SAN FELIPE, B.C., PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CIUDAD, realizado en 1989 por Exploraciones y Estudios Geológicos, Geotécnicos y Geohidrológicos EXYCO, S.A. para la Comisión Nacional del Agua. Sus objetivos más importantes fueron determinar la recarga al acuífero, determinar la condición de explotación del acuífero, su volumen de aqua subterránea aprovechable, identificar las estructuras principales que controlan el almacenamiento y flujo del aqua, así como las zonas de recarga y descarga y definir áreas favorables para la exploración-explotación del aqua subterránea para el abastecimiento futuro de aqua potable a San Felipe. Entre sus actividades de campo más importantes destacan el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, ejecución de sondeos eléctricos verticales, realización de pruebas de bombeo y muestreo de aqua subterránea para análisis fisicoquímicos. Concluye que la extracción era de 3.0 hm³ anuales, que el agua subterránea era de mala a regular calidad debido a los altos contenidos de sólidos totales disueltos y presencia de flúor, sílice y boro y que el acuífero se encontraba en condición de subexplotación. Propone la extracción de 5.0 hm<sup>3</sup> anuales lo más distribuidos posible y la localización de 4 sitios para explotar agua de regular calidad, cuyas profundidades de perforación varían de 180 a 230 m.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ÁREA DE SAN FELIPE PUNTA ESTRELLA, elaborado en 1989 por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali. Del análisis geológico se obtuvo una secuencia estratigráfica, así como la definición del marco tectónico-estructural del área. La exploración geofísica consistió en la ejecución de diez sondeos eléctricos verticales, por medio de los cuales fue posible reportar tres unidades con diferentes características hidrogeológicas. El censo de aprovechamientos identificó la existencia de 30 pozos, de los cuales 14 estaban activos y 16 inactivos. Los pozos activos se utilizaban para abastecimiento de agua potable y para uso doméstico.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE DE SAN FELIPE, B.C., elaborado en 1989 por la empresa EXYCO, S.A., para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo fue evaluar el acuífero y determinar la disponibilidad y calidad del agua subterránea, como fuente de abastecimiento de agua a la población de San Felipe. Concluye que para ese año se extraía un volumen de 3.0 hm³ anuales de agua de la familia sódico–clorurada, y que la recarga media anual era de 11.0

hm³/año. La calidad química del agua extraída, caracterizada por su salinidad y la presencia de altas concentraciones mexicanas e internacionales.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ÁREA DEL PROYECTO MARINAZUL, EN EL MUNICIPIO DE ENSENADA, B.C. MEDICIÓN DE PERFILES DE SALINIDAD Y MODELO MATEMÁTICO DEL ACUÍFERO EN EL ÁREA DEL PROYECTO MARINAZUL. Realizados en 2013-2015 por Lesser y Asociados para Inveravante Crecentia, S.A. de C.V. Sus objetivos fueron seleccionar sitios adecuados para la perforación de pozos para la extracción de un caudal de 509 lps de agua salobre necesarios para el proyecto de desarrollo turístico ubicado en la porción sur del acuífero San Felipe-Punta Estrella, perforar pozos exploratorios y demostrar que dicha extracción no afecta a terceros. En los pozos exploratorios perforados se realizaron perfiles de salinidad, muestreo de agua, pruebas de aforo y bombeo; con la información hidrogeológica generada y recopilada de la zona aledaña al sitio del proyecto, de las obras mismas de éste y de los pozos perforados, se construyó un modelo matemático para simular la extracción del caudal en diferentes escenarios.

PIEZOMETRÍA E HIDROMETRÍA DE LAS EXTRACCIONES DEL ACUÍFERO SAN FELIPE-PUNTA ESTRELLA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Península de Baja California, 2019. Información piezométrica histórica actualizada al 2013 y estimación de los volúmenes de extracción.

La información piezométrica de este trabajo y su actualización al año 2013, fueron la base para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, que sirvieron para actualizar el balance de aguas subterráneas.

#### 3. FISIOGRAFÍA

# 3.1. Provincia Fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de las Provincias Fisiográficas Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Baja California, Subprovincia Sierra de Juárez. De acuerdo a la clasificación de las Provincias Fisiográficas de INEGI (1997), la zona de estudio se ubica dentro de la Provincia Península de Baja California y en la Subprovincia Sierras de Baja California Norte.

De acuerdo con la clasificación de las Provincias Fisiográficas Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Baja California, Subprovincia Sierra

de Juárez. Esta sierra se considera la continuación meridional de Complejo Cristalino de la Sierra Nevada que afloran en California (USA) y se caracteriza por ser una gran masa de rocas graníticas limitada al este por un corte repentino que probablemente constituye un escarpe de falla hacia el Saltón (E. López Ramos, 1979). En términos generales, la Sierra de Juárez puede describirse como una gran faja elevada, inclinada hacia el oeste, dividida en una serie de cadenas montañosas paralelas que incluyen a las sierras San Jacinto y Santa Rosa en California, USA, y las sierras de Juárez y San Pedro Mártir en Baja California

La Provincia Península de Baja California abarca una pequeña extensión en territorio estadounidense, más de 80% del estado de Baja California y la totalidad del estado de Baja California Sur. El eje geológico estructural que da la forma alargada y angosta es su Cordillera Peninsular que tiene la misma orientación que la provincia, el núcleo granítico masivo batolítico que la constituye aflora en el norte y queda sepultado hacia el sur. La Cordillera Peninsular remata en su extremo meridional en el bloque del Cabo, donde vuelven a quedar expuestas las rocas graníticas. Sus cumbres más elevadas se encuentran en las sierras del norte del estado de Baja California, donde alcanzan desde 2,000 hasta alrededor de 3,000 msnm, como la sierra San Pedro Mártir cuya máxima elevación es de 3,100 m. La mitad sur de la cordillera corresponde a la Sierra de la Giganta, que tiene sus cumbres más altas en el norte, pero la mayor parte de ellas no llegan a los 1,000 msnm, altitud que es superada en la región del Cabo.

La Subprovincia Sierras de Baja California Norte ocupa las porciones norte, oeste, centro y este; posee una orientación general noroeste-sureste y limita al norte con los Estados Unidos de América, al este con la provincia Llanura Sonorense y el Golfo de California, al poniente con el Océano Pacífico y al sur con la discontinuidad Desierto de San Sebastián Vizcaíno y la subprovincia Sierra de La Giganta. Es parte de la Cordillera Peninsular bajacaliforniana y está constituida en su mayoría por las rocas de un gran cuerpo ígneo intrusivo batolítico. De norte a sur, a partir de la frontera con los Estados Unidos de América, sus primeras unidades orográficas son las sierras Juárez y San Pedro Mártir, separadas entre sí por una barranca angosta que marca la línea de falla Agua Blanca, la cual tiene un rumbo oeste-noroeste-este-sureste e inicia unos kilómetros al sur de Ensenada.

#### 3.2. 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 por E. García (1964) para las condiciones de México, se establece que en la superficie cubierta por el acuífero predominan los climas secos y áridos (BW), con variantes de acuerdo con la elevación topográfica.

En la mayor parte de la zona costera se registra clima BW(h') (x') muy árido, cálida. En la mayor parte de la superficie del acuífero el clima es BWh(x') Muy árido, semicálido. En ambos la temperatura media anual es mayor de 22°C, temperatura del mes más frio mayor de 18°C. Lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor de 18% del total anual. En las regiones topográficamente más altas de los extremos noroccidental y suroriental, el clima es BSok(x') árido, templado; con temperatura entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frio entre -3 y 18 °C, temperatura del mes más cálido menor de 22°C. Lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas, se utilizó la información de la estación Observatorio Meteorológico de San Felipe, para el periodo 1992-2017. Con base en esta información se determinó que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación son 23.8 °C y 97.9 mm, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio anual es de 4496.6 mm.

La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía; 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 desaparición de los escurrimientos superficiales y disminución del almacenamiento.

# 3.3. Hidrología superficial

El área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en su totalidad dentro de la Región Hidrológica (RH) 04 "Baja California Noreste" (Laguna Salada), Subregión Hidrológica "Río Tijuana", cuenca "Arroyo Agua Dulce-Santa Clara", subcuencas hidrológicas San Felipe, Arroyo Huatamote, Rancho Escolane-Rancho Las Villegas y la poción norte de El Camelo-Zamora.

La cuenca (A) Arroyo Agua Dulce-Santa Clara se localiza en la porción este-central de la entidad, abarcando 11.08% de su superficie, representa la parte sur de la RH4. La conforman las subcuencas: (A), Arroyo Agua Dulce; (B), Arroyo San Fermín; (C), Arroyo. Huatamote; (D), San Felipe y (E), Santa Clara. La precipitación media es de 118.4 mm anuales. El arroyo El Paraíso representa uno de los escurrimientos más relevantes de la cuenca, nace entre los límites de las sierras Juárez y San Pedro Mártir; en su trayectoria recorre 40 km hasta la

depresión Laguna Salada. En Valle Chico existe una serie de arroyos como el Parral, La Gringa y Berrendo, que se unen y confluyen hacia la región central de San Felipe, en donde dan lugar al arroyo Huatamote, por lo que de forma superficial se establece una comunicación entre el Valle Chico y el Valle de San Felipe. En el área del acuífero, los arroyos La Amarillas, Huatamote, Don Poncho, Parra y Percebú, son de tipo intermitente y escurren en dirección suroeste-noreste.

# 3.4. Geomorfología

El acuífero se encuentra enmarcado, dentro de un conjunto de Sierras y Valles producto de procesos tectónicos, sus formas son principalmente rectangulares en las que su eje mayor está orientado de norte a sur, identificándose así tres unidades geomorfológicas: sierras con elevaciones mayores a 250 msnm, lomeríos de moderada a escasa elevación, 10 a 200 msnm, y planicie costera, con una pendiente menor al 1% dirigida hacia el litoral.

La Sierra de Santa Isabel, está localizada en la porción sur-central de la subprovincia; está constituida principalmente por tobas de composición ácida y derrames aislados de composición basáltica. Alcanza elevaciones de 1240 msnm, con una orientación aproximada norte-sur, con una longitud de 50 km y una amplitud de 37.5 km. La Sierra de San Felipe está orientada en sentido norte-sur, alcanza elevaciones de 1200 msnm, con una longitud de 67.5 km aproximadamente y una amplitud de 20 km. Está ubicada en la porción sur-central de la subprovincia fisiográfica y de acuerdo al análisis geológico estructural, se considera que ha sido afectada por fallas transcurrentes de evolución compleja.

Otro elemento fisiográfico importante es el Valle Chico, que presenta una forma alargada y pendientes muy suaves. Presenta 62.5 km de longitud y 12.5 km de amplitud; con una elevación promedio de 500 msnm. Está compuesto principalmente por depósitos de tipo aluvial con una orientación al noreste en su eje mayor. El valle de San Felipe, también elemento fisiográfico de la subprovincia es semejante al del Valle Chico, pero presenta mayor inclinación hacia la costa; con una longitud aproximada de 30 km y una amplitud de 12.5 km en promedio. Los materiales más recientes que se distribuyen en este valle, son de tipo aluvial casi en su totalidad y depósitos eólicos en la zona costera. Las elevaciones que presenta en la porción central son de 80 a 900 msnm, orientado paralelamente al Valle Chico.

#### 4. GEOLOGÍA

Las rocas de la región presentan una gran complejidad debido a la presencia de dos terrenos tectonoestratigráficos diferentes. El Terreno Cortés se localiza en la porción oriental y se caracteriza por contener las rocas más antiguas representadas por una secuencia metamórfica del Cámbrico Inferior que constituye el basamento cristalino y que consiste de esquistos, cuarcita, gneises, filitas y mármoles, que presentan grados de metamorfismo que varían de facies de esquistos verdes a facies de anfibolita, asociada a plegamientos. Está distribuida en las inmediaciones del puerto de San Felipe. Al noreste, en la localidad Las Pintas, aflora una secuencia de metasedimentaria constituida por esquistos, filitas, pizarras, areniscas, calizas, limolitas y mármoles, asignada al Carbonífero por la presencia de corales y bivalvos (McEldowney, 1970; Leier, Engelhardt, 1993), (figura 2).

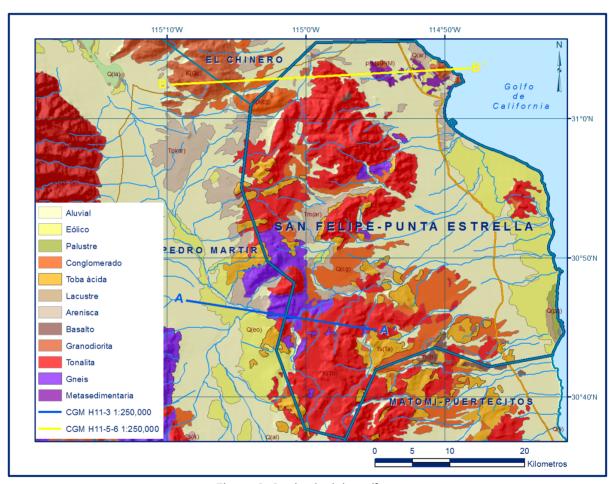


Figura 2. Geología del acuífero

El terreno Alisitos se localiza en la porción occidental de la región y está representado por secuencias de arco del Triásico al Cretácico, constituidas por series vulcanosedimentarias que presentan metamorfismo regional de facies de esquistos verdes. La primera secuencia de edad Triásico-Jurásico Inferior consiste de gneises y esquistos y la segunda que es la más joven, denominada Grupo Alisitos de edad Aptiano-Albiano, se presenta como colgantes sobre el batolito y aflora en la región suroccidental, está representada por cuatro unidades litológicas constituidas por rocas metasedimentarias, metavolcánicas andesitas y brechas

andesíticas y calizas. Las rocas metasedimentarias afloran en la porción suroeste de la Sierra San Pedro Mártir, constituidas por esquistos, filitas, pizarras y hornfels, con metamorfismo regional de facies de esquistos verdes. Las rocas metavolcánicas sobreyacen discordantemente a la unidad anterior, su composición es andesítica y afloran en la porción sur del cerro La Costilla y al norte de rancho El Potrero. Su contacto superior es concordante con las andesitas y brecha andesíticas que afloran en la porción suroeste, al sur del Rancho El Potrero y al suroeste del Rancho Buenavista, Cubriendo concordantemente a esta unidad y en ocasiones intercalada con ella en forma lenticular, afloran calizas en la porción sureste del Rancho El Potrero y al oeste de la mina Santa Cruz; contienen fósiles de rudistas, crinoides, corales y restos de braquiópodos.

Durante el Cretácico Superior-Terciario Inferior, las rocas fueron afectadas por una serie de intrusiones de composición granítica, granodiorítica, tonalítica y diorítica en menor proporción, con rangos de edades que varían de 140 a 66.4 Ma y que en conjunto constituyen el Batolito Peninsular de Baja California, ligado a la evolución del arco volcánico del Jurásico Superior-Cretácico. Estas rocas presentan un gran cubrimiento en la región, constituyendo principalmente las sierras San Pedro Mártir, San Felipe, Juárez y Warner. Durante el Paleoceno se desarrolló un evento volcánico que generó andesitas que sobreyacen discordantemente a las rocas metamórficas de edad paleozoica, afloran en la Sierra Las Pintas. Durante el Mioceno se depositaron rocas volcánicas y sedimentarias que sobreyacen discordantemente a las unidades preterciarias. Las rocas volcánicas pertenecen a dos probables periodos de vulcanismo; el primero produjo andesitas y dacitas andesíticas cuya edad varía de 7.6 a 9.5 ± 1.0 Ma (Gastil, 1975); que se encuentran afectadas por pequeños cuerpos intrusivos hipabisales de tipo porfídico y de composición andesítica y riodacítica. Rocas sedimentarias del Mioceno afloran en forma aislada y consisten de areniscas y conglomerados polimícticos.

El Segundo periodo de vulcanismo generó derrames de tobas riolíticas y riolíticas, riolitas y tobas riolíticas, tobas riolíticas y andesitas que afloran en la misma proporción que las rocas volcánicas anteriores. Las rocas volcánicas descritas pertenecen a la secuencia volcánica Sierra Las Pintas con espesor de más de 1,500 m. sobreyacen a rocas metamórficas paleozoicas y graníticas cretácicas (Leic-Hangel-Hardt, 1993); además, presentan discordancias internas y bloques basculados que sugieren que el centro volcánico fue deformado tectónicamente. Sobreyaciendo concordantemente a esta secuencia y discordantemente a las unidades paleozoicas y mesozoicas, se encuentra la unidad de basalto de edad Mioceno tardío. Las areniscas del Plioceno sobreyacen en discordancia angular a las areniscas del Mioceno, los afloramientos más grandes se localizan en la costa

oeste del Mar de Cortés en la porción nororiental de la región. Los movimientos epirogénicos que afectaron a la península de Baja California durante el Plioceno-Pleistoceno, originaron una serie de conglomerados, areniscas, terrazas y gravas que se presentan a lo largo de toda la costa del Golfo de California. Por último, se presentan depósitos del Holoceno constituidos por sedimentos eólicos, aluviales, lacustres, palustres y litorales (Carta Geológico-Minera H11-3 "San Felipe", escala 1: 250,000 SGM, 1999).

# 4.1. Estratigrafía

En el área del acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metasedimentarias cuyo registro estratigráfico varía del Paleozoico al Reciente. En general las rocas se dividen en tres grandes grupos: rocas prebatolíticas, batolíticas y postbatolíticas; todas ellas sometidas a grandes esfuerzos tectónicos, que influyeron de manera importante en las características físicas, estructurales y en los espesores que presentan.

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**

# Complejo Metamórfico

Constituye el basamento cristalino y parte del cinturón oriental metamórfico de la región definido por Gastil (1975); consiste de esquistos, cuarcitas, gneises, filitas, pizarras y mármoles, que presentan grados de metamorfismo que varían de facies de esquistos verdes a facies de anfibolita. Aflora en la Sierra de San Pedro Mártir y localmente en las inmediaciones de San Felipe. Al noreste de la zona, en la localidad Las Pintas, la unidad presenta además areniscas, calizas y limolitas; que por su contenido fósil permitió asignarle una edad correspondiente al Carbonífero. Morfológicamente forma lomeríos de suave pendiente, en ocasiones interrumpidos por pequeños escarpes.

#### TRIÁSICO-JURÁSICO

#### Formación San Hipólito

Unidad identificada por Lozano (1970) en el área de San José–La Encantada, está constituida por rocas carbonatadas, clásticas y volcánicas que fueron sometidas a un proceso de dinamometamorfismo y metamorfismo de contacto, dando como resultado filitas, esquistos, skarns y hornfels. Esta unidad sedimentaria está ligada a una secuencia de arco insular, Lozano estima un espesor de 200 m. La morfología característica de esta unidad es la topografía abrupta, a diferencia de la unidad paleozoica, junto con la cual forma el

cinturón metamórfico prebatolítico, que tiene sus principales afloramientos en las sierras de Juárez y San Pedro Mártir.

# **CRETÁCICO**

# **Grupo Alisitos**

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 lago 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 estenoreste de El Rosario, Baja California que se considera la sección más completa (López, 1980).

Está constituida por una serie de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias; las primeras de composición dacítica-andesítica y las últimas producidas por la denudación de las dos primeras. Se encuentran afectadas por dinamometamorfismo, cuya intensidad disminuye de oriente a poniente. Su edad se sitúa en el Cretácico Medio (Albiano-Cenomaniano) y se le estima un espesor máximo de 5,000 m (López R., 1970), coronando en forma discordante a las rocas del Triásico-Jurásico. Sus principales afloramientos se localizan en la porción central de la península y al occidente de la sierra cristalina o batolito cretácico. Las rocas están deformadas y afectadas por fallas y fracturas y como por cuerpos intrusivos del Cretácico Superior; en conjunto constituyen la llamada "secuencia prebatolítica".

#### Batolito Cretácico de Baja California

Grupo de cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas de composición granítico-tonalítica-granodiorítica, que localmente están constituidos por plutones de diorita y gabro que intrusionan a las formaciones San Hipólito y Alisitos, produciendo en ellas halos de metamorfismo. Esta unidad conforma al cinturón batolítico que ha dividido a las rocas del Cretácico y Jurásico como rocas post y pre batolíticas respectivamente. Afloran a lo largo de toda la península, pero sus mayores exposiciones se presentan en la porción norte y centro, formando junto con las rocas antiguas las sierras de San Pedro Mártir y San Felipe.

# 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. Sus principales afloramientos se localizan sobre la costa del Pacífico.

#### **TERCIARIO**

A esta edad corresponde los gruesos paquetes de sedimentos continentales que afloran sobre todo en el borde occidental, época en la que también se desarrolló una importante actividad volcánica, principalmente en el Mioceno, cubriendo en forma heterogénea a las rocas preterciarias.

# Formación Sepultura

Santillán y Barrera (1930) la describen como un conjunto de areniscas y conglomerados de origen marino en su base y de tipo continental en su cima. Su contacto inferior con la Formación Rosario es concordante y transicional, en ocasiones sin ser posible distingue el límite entre ambas unidades. El espesor estimado es de 400 m y su edad que va del Eoceno Inferior al Paleoceno. Morfológicamente forma lomeríos suaves de poca altura. Se encuentra distribuida en la porción noroccidental y occidental de la península.

# Formación La Misión

Definida por López R. (1980) como una unidad constituida por areniscas de grano medio, cementadas con calcita, las areniscas son de origen eólico y fluvial, en algunos sitios presentan una estratificación cruzada. Sobreyace en forma concordante a la Formación Sepultura, así como en discordancia angular a las rocas paleozoicas y mesozoicas del oriente de la península; se le estima un espesor de 150 m y una edad Mioceno Medio; la morfología que presenta se encuentra sometida por los cuerpos volcánicos que la sobreyacen. Se considera que estos sedimentos son el resultado de las primeras transgresiones marinas producidas por la apertura del Golfo de California.

# **Unidad Volcánica**

Representada por grandes afloramientos rocas piroclásticas de composición ácida, derrames andesíticos y dacíticos, casi todos cubiertos por basaltos plio-cuaternarios. Por su posición dentro de la columna estratigráfica se le ha asignado una edad Mioceno-Plioceno. Su expresión morfológica es de mesetas cortadas que oscilan hacia el oriente, en algunas partes estas mesetas alcanzan grandes alturas, presentando acantilados o lomeríos, pero siempre con límites escarpados. Sus afloramientos más importantes se localizan en la porción sur de la sierra de Juárez, en el litoral del Golfo de California, a la altura del paralelo 30 y en la zona central de la península.

#### **Basaltos**

Sobreyacen concordantemente a la unidad de rocas volcánicas y discordantemente a las unidades paleozoicas y mesozoicas. Está constituido por fenocristales de olivino, presenta textura afanítica con algunas vesículas. Aflora de manera local en la sierra de Santa Rosa.

#### Formación Imperial

Definida por Beal (1948), está 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. Aflora principalmente en la región del valle de San Felipe y al norte de Punta Canoas.

#### **CUATERNARIO**

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 y palustres, depósitos de talud y sedimentos fluviales y de llanuras de inundación sobre el cauce de los arroyos. Incluye también conglomerados polimícticos de rocas ígneas y metamórficas, embebidos en una matriz areno-arcillosa. Sus espesores son muy variados y se les encuentra rellenando valles y zonas bajas en toda la península, aunque sus mayores extensiones se localizan en el noreste de la misma. Conforman el acuífero aluvial que actualmente se encuentra en explotación.

#### 4.2. Geología estructural

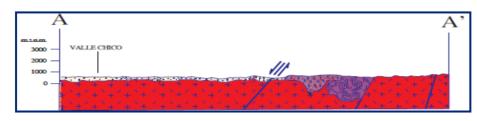
Los principales eventos tectónicos que afectaron la región están representados principalmente por dos eventos orogénicos que tienen su inicio cuando en el Paleozoico la margen del cratón de Norteamérica se situaba en la actual Península de Baja California. El primer evento ocurrió durante el Jurásico Superior-Cretácico con la subducción de la placa

Farallón bajo la Norteamericana, depositándose las rocas del grupo Alisitos e un ambiente de arco insular. Durante el Cretácico Superior el evento más importante fue el emplazamiento del batolito peninsular legado a la evolución del Arco Volcánico Alisitos del Jurásico Inferior-Cretácico Superior. El segundo evento se refiere al conjunto de procesos asociados con la apertura del Golfo de California. Durante el Mioceno Medio y el Plioceno ocurrió un cambio en la configuración del límite entre las placas Pacífico y Norteamericana, involucrando diferentes procesos tectonomagmáticos en una amplia zona de la margen continental de Norteamérica, ocasionados por el cese de la subducción de la placa Farallón-Guadalupe (Atwater, 1989; Stock y Hodges, 1989), originando desplazamientos transformantes-dextrales y fallamiento normal, produciendo la apertura del Golfo de California. Los rasgos estructurales mejor definidos en la zona corresponden a fallas laterales dextrales y normales (Agua Blanca y San Pedro Mártir) y estructuras circulares originadas por los intrusivos (Carta Geológico-Minera H11-3 "San Felipe", escala 1: 250,000 SGM, 1999).

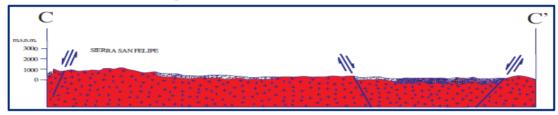
La región en la que se enmarca el área del acuífero fue afectada por procesos geológicos complejos íntimamente ligados a la apertura del Golfo de California a partir del Paleógeno. Las principales estructuras que afectan a las unidades litológicas expuestas son: fracturamiento, fallamiento y plegamiento en rocas sedimentarias. Las fallas son principalmente de tipo normal y otras de desplazamiento horizontal, cuya representación fisiográfica son los cañones, como el del arroyo Las Amarillas. Con base en la relación que muestran las rocas afectadas, se considera que las estructuras con esta orientación son de edad pre-miocénica, con sentido de movimiento horizontal izquierdo para el primer sistema de esfuerzos y de tipo vertical (normal), principalmente para el sistema post-miocénico, que el más común en la región.

# 4.3. 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 representados por mismas hidrogeológico están las rocas volcánicas 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 100 a 1500 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros.



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



Fuente: Carta Geológico-Minera, San Felipe. H-11-3. Escala: 1:250 000 Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

### 5. HIDROGEOLOGÍA

# 5.1. 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, depósitos eólicos y lacusres; y en su porción inferior por rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fallamiento, fracturamiento y alteración.

# 5.2. Parámetros hidráulicos

Para la determinación de los valores de los parámetros hidráulicos de las unidades que conforman el acuífero, se analizó la información de pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, que fueron realizadas en estudios previos (1986, 1989 y 2013-2015). De su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que la conductividad hidráulica de los materiales que conforman el acuífero varía de **0.05 a 6.7 m/d (5.8 x10<sup>-7</sup> a 7.8 x10<sup>-5</sup>m/s)** y que los valores de transmisividad varían entre **1.1 x 10<sup>-4</sup> y 15.5 x 10<sup>-3</sup>m<sup>2</sup>/s**. Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento. De acuerdo a los sedimentos clásticos que constituyen el acuífero, el valor del rendimiento específico varía de 0.01 a 0.12. Para fines del cálculo del cambio de almacenamiento, se adoptó un valor

promedio de 0.08.

# 5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información para diferentes años, hasta el 2019, recabada por el Organismo de Cuenca Península de Baja California. Para fines del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2013-2019.

# 5.4. Comportamiento hidráulico

#### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el año 2019 varía desde algunos metros a 100 m, incrementándose desde la zona próxima a la costa hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, conforme se asciende topográficamente. Los valores más someros, menores de 5m, se registran en toda la zona costera, desde San Felipe en el norte hasta Playa Hermosa en el extremo sur; en tanto que los más profundos, de 80 a 100 m, se presentan en la región occidental del acuífero (figura 4).

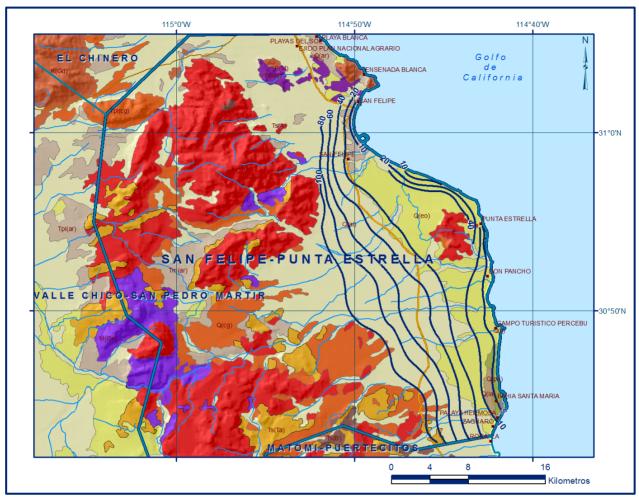


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 2 a 18 msnm, que se incrementan de la planicie costera y del cauce de los arroyos, en dirección hacia las estribaciones de las sierras que representan el límite occidental del acuífero. Los valores más altos, 15 a 18 msnm, se registran en el extremo occidental, desde donde descienden gradualmente hacia el sur por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la planicie costera, en dirección este y noreste. Los valores más someros, de 2 a 8 msnm, se presentan en toda la región costera, desde San Felipe hasta La Roca, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo oeste-este y suroeste-noreste, paralela a la dirección del escurrimiento de los arroyos (figura 5).

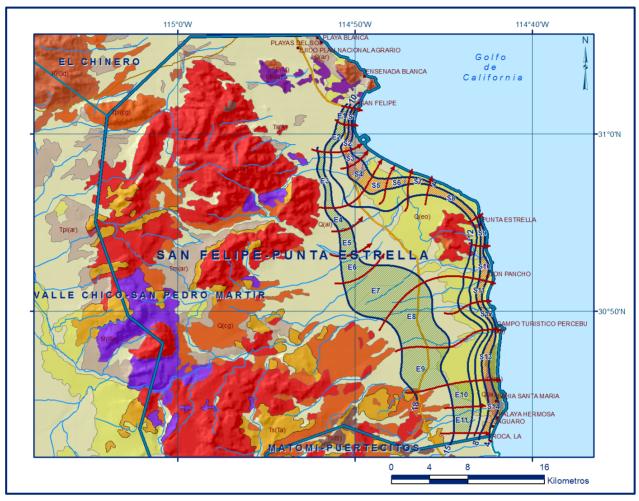


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

#### 5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2013-2019 registró valores de abatimiento en la zona de explotación, que varían de 0.25 a 1.0 m, es decir 0.04 a 0.16 m anuales, y se registraron en la porción central de la planicie costera, desde San Felipe en el norte hasta Percebú en el sur. En la mayor parte de la superficie de explotación los niveles del agua subterránea no mostraron variaciones significativas en su posición (figura 6).

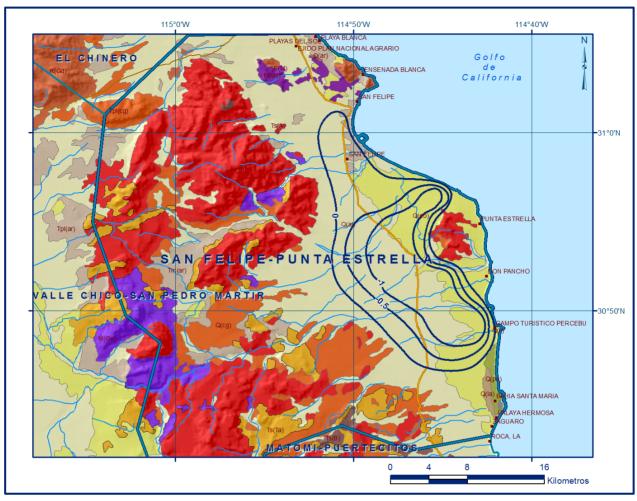


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2013-2019)

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

Como parte de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA 2018) en el año 2018, se tomaron 6 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), iones mayoritarios, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), alcalinidad, dureza total, nitratos, nitritos, amonio, fosfatos, coliformes fecales y totales, carbono orgánico total, sílice, fluoruro, bario, cadmio, arsénico, cromo, mercurio, plomo, fierro, manganeso, níquel, cianuro, cobre, selenio y zinc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

La concentración de SDT presenta varía de 562 a 1160 mg/l; dos muestras de agua subterránea, en pozos más cercanos a la zona costera sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido en la "Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-

2021 Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Las concentraciones los demás parámetros determinados no superan los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la norma referida. Las concentraciones máximas encontradas en las muestras de agua subterránea son para hierro de 0.04 mg/l, para manganeso de 0.05 mg/l, para el fluoruro 1.07 mg/l, de arsénico es de 0.003 mg/l, de nitratos 7.46 mg/l, por lo que el agua subterránea cumple con la calidad para uso y consumo humano.

Los valores de conductividad eléctrica presentan valores extremos de 1,160 a 1,714  $\mu$ S/cm, el pH varía de 7.4 a 8.4, y la temperatura registrada en el agua subterránea varía de 16.6 a 30.9 °C.

De acuerdo a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se clasificaron las muestras en el diagrama de Piper y se identificó como familias de agua dominantes la bicarbonatada cálcica y en algunas muestras cerca de la costa la sódica-clorurada.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayoría de las muestras de agua subterránea se clasifican como aptas para el riego agrícola.

#### 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **7.2 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022. De los cuales 6.8 hm³ (94.4 %) se destinan al uso público urbano y 0.4 hm³ (5.6 %) para servicios.

#### 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2013 a 2019, en una superficie de **342 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos:

# Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

#### 7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia y por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y por flujo subterráneo horizontal (Eh).

De manera incidental, la infiltración del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que el volumen utilizado para uso público-urbano es pequeño, se considera para fines del balance de agua subterránea que no existe recarga incidental.

#### 7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔVS), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, este valor es la incógnita a despejar en la ecuación de balance.

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

Donde:

**Rv:** Recarga vertical

**Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal

B: Bombeo

**Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal

**ΔV(S):**Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

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

# 7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área 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 2019, 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:

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

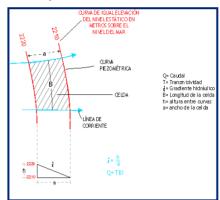
Donde:

 $\mathbf{Q} = \text{Caudal (m}^3/\text{s})$ 

T = Transmisividad (m<sup>2</sup>/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 una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a 6.4 hm³/año.

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)	
E1	1800	500	5	0.01000	0.0015	0.0270	0.9	
E2	3350	800	5	0.00625	0.0015	0.0314	1.0	
E3	6000	600	3	0.00500	0.001	0.0300	0.9	
E4	2700	1200	3	0.00250	0.001	0.0068	0.2	
E5	2700	1300	3	0.00231	0.001	0.0062	0.2	
E6	2550	2100	3	0.00143	0.003	0.0109	0.3	
E7	4350	6200	3	0.00048	0.005	0.0105	0.3	
E8	5700	3660	3	0.00082	0.005	0.0234	0.7	
E9	4550	3570	3	0.00084	0.005	0.0191	0.6	
E10	2650	1990	3	0.00151	0.006	0.0240	0.8	
E11	2700	1590	3	0.00189	0.003	0.0153	0.5	
_	TOTAL 6.4							

#### 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo (B) y salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)hacia el mar.

#### 7.2.1. Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **7.2 hm³/año**.

# 7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático del 2019, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo. El volumen total de salidas por flujo subterráneo horizontal es de **5.0 hm³ anuales**.

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m³/s)	VOLUMEN (hm³/año)
S1	1800	300	4	0.0133	0.0003	0.0072	0.2
S2	2830	450	4	0.0089	0.0003	0.0075	0.2
S3	1500	850	4	0.0047	0.0008	0.0056	0.2
S4	2380	1820	4	0.0022	0.0008	0.0042	0.1
S5	1780	1720	4	0.0023	0.0010	0.0041	0.1
S6	1980	970	4	0.0041	0.0015	0.0122	0.4
S7	1920	550	4	0.0073	0.0015	0.0209	0.7
S8	5320	690	2	0.0029	0.0010	0.0154	0.5
S9	3120	360	4	0.0111	0.0010	0.0347	1.1
S10	3600	700	4	0.0057	0.0005	0.0103	0.3
S11	2300	570	4	0.0070	0.0010	0.0161	0.5
S12	3260	510	4	0.0078	0.0005	0.0128	0.4
S13	5370	670	4	0.0060	0.0002	0.0064	0.2
S14	5720	950	4	0.0042	0.0001	0.0024	0.1
	TOTAL 5.0						

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2019)

#### 7.3. 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 2013-2019 (figura 6). Con base en ella y considerando un rendimiento específico de 0.08, se determinó la variación del almacenamiento, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

**ΔV(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);

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de – 10.6.0 hm³, es decir, un promedio anual de **– 1.8** hm³ anuales

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km²)	Sy	ΔV(S) (hm³/año)
-1	-1.0	73.2	0.08	-5.9
-0.5 a -1	-0.75	48.9	0.08	-2.9
0 a -0.5	-0.25	92.0	0.08	-1.8
	TOTAL	214.1	TOTAL	-10.6
		Promedic	-1.8	

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento (2013-2019)

#### 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:

Rv = B + Sh 
$$\pm \Delta V(S)$$
 - Eh  
Rv = 7.2 + 5.0 - 1.8 - 6.4  
Rv = 4.0 hm<sup>3</sup>

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

#### 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:

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 casosu valor es **10.4 hm³/año**, de recarga natural.

#### 8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se estimó 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; sostener el gasto ecológico y/o prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso de este acuífero su valor es de **5.0 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas por flujo subterráneo hacia el mar.

# 8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con

base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **7'250,877 m³** anuales, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

# 8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (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 aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

DMA= R - DNC - VEAS MA = 10.4 - 5.0 - 7.250877 DAS = -1.850877

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones. Por el contrario, el déficit es de **1'850,877 m³**.

# 9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 1989. Estudio de evaluación de disponibilidad y calidad del agua subterránea en el Valle de San Felipe, B.C., para abastecimiento de agua a la ciudad. Elaborado por Exploraciones y Estudios Geológicos, Geotécnicos y Geohidrológicos, EXYCO, S.A.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2008. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San Felipe-Punta Estrella (0222), estado de Baja California.