



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SANTA ÁGUEDA (0336), ESTADO DE
BAJA CALIFORNIA SUR**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1 GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica	6
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	10
4.2 Geología estructural	12
4.3 Geología del subsuelo.....	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de acuífero.....	14
5.2 Parámetros hidráulicos	15
5.3 Piezometría.....	15
5.4 Comportamiento hidráulico.....	15
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	15
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3 Evolución del nivel estático	17
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	18
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	19
7.1 Entradas.....	20
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	20
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	21
7.2 Salidas	22
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	22
7.2.2 Evapotranspiración (ETR).....	22
7.2.3 Bombeo (B)	24
7.2.4 Descarga de manantiales (Dm).....	25
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	25
8. DISPONIBILIDAD	26
8.1 Recarga total media anual (R).....	26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	26
8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS)	27
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	27
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-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 Santa Águeda, definido con la clave 0336 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción noreste del estado de Baja California Sur, entre los paralelos 27° 04' y 27° 20' de latitud norte y los meridianos 112° 11' y 112° 34' de longitud oeste; abarcando una superficie de 487 km² (figura 1).

Limita al norte con el acuífero Santa Rosalía, al este con el Golfo de California, al sur con los acuíferos San Marcos- Palo Verde y San Lucas; y al oeste con el acuífero San Ignacio. Geopolíticamente se encuentra ubicado en su totalidad en el municipio Mulegé.

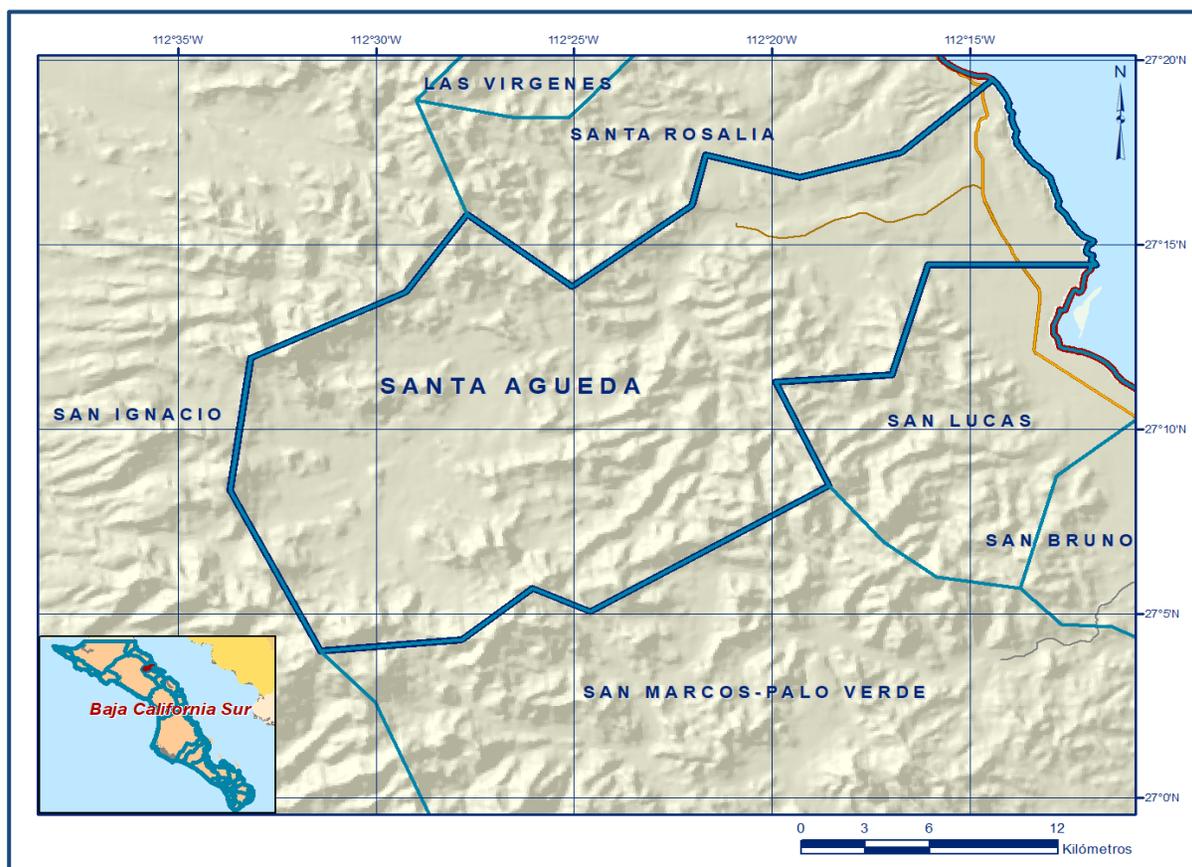


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0336 SANTA AGUEDA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	112	16	3.7	27	14	28.0	
2	112	16	58.4	27	11	28.2	
3	112	19	55.0	27	11	17.1	
4	112	18	33.5	27	8	28.9	
5	112	24	35.3	27	5	3.5	
6	112	26	3.7	27	5	41.3	
7	112	27	50.2	27	4	17.4	
8	112	31	24.5	27	3	58.9	
9	112	33	41.7	27	8	20.0	
10	112	33	10.5	27	11	56.1	
11	112	29	14.9	27	13	43.5	
12	112	27	42.4	27	15	49.8	
13	112	25	3.4	27	13	52.7	
14	112	22	2.1	27	16	3.9	
15	112	21	41.3	27	17	26.9	
16	112	19	17.9	27	16	50.2	
17	112	16	44.5	27	17	30.3	
18	112	14	25.4	27	19	28.6	DEL 18 AL 19 POR LA LINEA DE BAJAMARA LO LARGO DE LA COSTA
19	112	11	49.9	27	14	27.7	
1	112	16	3.7	27	14	28.0	

1.2 Situación administrativa del acuífero

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

Este decreto es de tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El uso principal del agua subterránea es el público urbano. En el acuífero no existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). Una pequeña porción al noreste del acuífero pertenece a la Reserva de la Biósfera El Vizcaíno, con fecha de decreto 30 de noviembre de 1988.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero Santa Águeda se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación y otros en acuíferos vecinos para determinar su recarga media anual, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

INFORME FINAL DEL ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE SAN BRUNO-MULEGE-SANTA ROSALIA EN EL TERRITORIO DE BAJA CALIFORNIA SUR., TOMO I Y TOMO II. Elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S. A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas en 1974. El objetivo de este estudio fue evaluar la disponibilidad del agua subterránea, conocer la condición de explotación del acuífero y recomendar políticas óptimas de explotación para evitar la intrusión marina. La zona de estudio se dividió en cinco subcuencas: San Marcos-Palo Verde, San Bruno, San Lucas, Mulegé y Santa Águeda, sin embargo, no se identificó como unidad hidrológica.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS CABO PULMO, CABO SAN LUCAS, MEZQUITAL SECO, LA PURÍSIMA, SANTA ÁGUEDA Y SANTA ROSALÍA, B.C.S. Elaborado por la empresa Sanx, Ingeniería Integral, S.A. de C.V. en 2010. El objetivo de este tipo de estudios es establecer una red de pozos de monitoreo para la medición sistemática de los niveles del agua subterránea. Incluye actividades de censo de aprovechamientos, piezometría y nivelación de brocales.

ESTUDIO PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS LA PURÍSIMA, MEZQUITAL SECO, CABO SAN LUCAS, CABO PULMO, SAN BARTOLO, SANTA ÁGUEDA Y SANTA ROSALÍA, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA SUR. Elaborado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en 2010. Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para contar con información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Estos dos últimos estudios fueron básicos para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de INEGI (1997), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica Baja California, dentro de la Subprovincia Sierra La Giganta. La Provincia Península de Baja California, ubicada en el noroeste de la República Mexicana, se extiende a lo largo de 1,333 km, con rumbo noroeste-sureste. Las mayores elevaciones, de 2,000 a 3,000 msnm, se encuentran en las sierras de la porción norte.

La Subprovincia Sierra La Giganta es una cordillera montañosa orientada en dirección preferencial noroeste-sureste, que forma parte de la cordillera peninsular cuya topografía se caracteriza por presentar elevaciones máximas del orden de 800-1,680. Está formada por rocas volcánicas de la Formación Comondú, dispuestas en forma de mesetas inclinadas hacia el Océano Pacífico y altas crestas hacia el Golfo de California.

La Sierra La Giganta define el parteaguas en esta porción de la península de acuerdo con sus dimensiones y posición geográfica. Los escurrimientos forman una serie de cañones profundos los cuales drenan con una dirección preferencial hacia el occidente.

3.2 Clima

Con base en los datos históricos de precipitación, temperatura y evaporación potencial de las estaciones climatológicas que se ubican en esta porción de la península de Baja California, y con apoyo en la carta de climas, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García para nuestro país, se determina que en la región prevalece un grupo de clima muy árido (BW).

De acuerdo a la elevación topográfica de la zona, se presentan variantes en franjas paralelas orientadas en sentido norte sur: En las partes topográficamente más bajas cercanas a la línea de costa es clima de tipo BW(h') (x') muy árido cálido con temperatura media anual mayor a 22° C, temperatura del mes más frío mayor de 18° C y presenta lluvias repartidas todo el año con un porcentaje de lluvia invernal mayor del 18% del total anual.

Por último, en la sierra predomina el clima BWh(x') muy árido semi-cálido con temperatura media anual entre 12 y 22° C, temperatura del mes más frío menor de 18°C con lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de dos estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Santa Águeda y San Ignacio, cuyo registro comprende los periodos 1976-2007 y 1939-2004, respectivamente.

De acuerdo con estos datos se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de 121.4 y 24.07°C, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de 2,378 mm al año.

La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía, que eventualmente son interrumpidos por la incidencia de tormentas tropicales y huracanes. Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es muy bajo, las lluvias de temporada y la presencia ocasional de fenómenos ciclónicos, tienen un efecto importante sobre la recarga al acuífero.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No. 5, Baja California Centro-Este (Santa Rosalía) y forma parte de la cuenca Santa Águeda, una pequeña porción se ubica en la cuenca Santa Rosalía. A nivel local se ubica en la cuenca Arroyo Paterna-Arroyo Mulegé.

La cuenca hidrológica Santa Rosalía, tiene una superficie de aportación de 152.7 km² y se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica Las Vírgenes, al este por el Mar de Cortés, al sur por la cuenca hidrológica Santa Águeda y al oeste por las cuencas hidrológicas San Ignacio y Las Vírgenes.

La cuenca hidrológica Santa Águeda, tiene una superficie de aportación de 438.6 km² y se encuentra delimitada al norte por las cuencas hidrológicas San Ignacio y Santa Rosalía, al este por la cuenca hidrológica San Lucas, al sur por las cuencas hidrológicas San Ignacio, San Marcos-Palo Verde y San Lucas, y al oeste por la cuenca hidrológica San Ignacio.

Debido al clima desértico, los principales escurrimientos de la región son de régimen intermitente, entre los cuales se encuentran los arroyos Santa Águeda y El Pedregoso, que descienden desde la Sierra La Giganta hacia los llanos en sentido suroeste-noreste y sólo conducen agua durante las esporádicas lluvias torrenciales como las causadas por huracanes. No existen escurrimientos permanentes en la cuenca y los que se forman son de carácter torrencial y efímero. La red de drenaje presenta un patrón dendrítico.

En la zona no existen estaciones hidrométricas ni tampoco infraestructura hidráulica para el almacenamiento y control de las corrientes superficiales.

3.4 Geomorfología

Los rasgos morfológicos en el área denotan un estado de madurez temprana, en el que destacan las sierras constituidas por rocas volcánicas erosionadas de la Formación Comondú, con desnivel de más de 1,400 m y fuertes pendientes que terminan en acantilados sobre el Golfo de California. La red de drenaje característico de tipo dendrítico presenta cauces generalmente profundos en la zona serrana, más amplios y planos en la zona de valle y planicie costera, tendiendo a formar meandros.

De acuerdo a los rasgos geomorfológicos de la región, el relieve se caracteriza en tres zonas: la primera está constituida por sierras conformadas por rocas ígneas extrusivas que forman parte de la subprovincia fisiográfica Sierra La Giganta; la segunda zona está formada por materiales sedimentarios que forman el Valle Aluvial y Abanicos Aluviales en la que se encuentran incluidos los márgenes de los arroyos Santa Águeda e Infierno. La tercera unidad es la Planicie Costera.

La Sierra La Giganta se ubica en la porción occidental del acuífero y en la región está formada principalmente por los cordones fisiográficos: Las Calabazas, El Sauzal y La Sabana, además de la Mesa El Babisuri, todas de origen ígneo extrusivo que datan del Cenozoico. Presenta relieve abrupto al oriente, con acantilados sobre el Golfo; en tanto que hacia el occidente desciende gradualmente. La presencia de rocas batolíticas en la región del Cabo, apoyan la idea de que las rocas de la sierra de La Giganta, predominantemente volcánicas, descansan sobre un sepultado bloque de batolito. Rocas de tipo basáltico dominan en el norte, donde la morfología general es de meseta con cañadas; las del tipo piroclástico prevalecen en el sur, asociadas con paisaje de llanura con meseta.

La zona de transición se ubica en la porción central del acuífero y en ella se aloja el valle aluvial y abanicos aluviales, está conformada por conglomerados y se caracteriza por pasar de pendientes fuertes a medias. Hacia el sur disminuyen gradualmente su elevación llegando a ser simples lomeríos.

Los abanicos aluviales se localizan principalmente en las desembocaduras, sobre los cauces y márgenes de los principales arroyos. La planicie costera es muy estrecha y está formada principalmente por sedimentos del tipo limolita-arenisca

Los rasgos geomorfológicos en la zona centro del acuífero, presentan condiciones poco favorables para el desarrollo de un acuífero debido a los derrames basálticos que predominan en la zona.

4. GEOLOGÍA

Las unidades que afloran dentro del acuífero se relacionan con la apertura del Proto Golfo de California que formó una serie de cuencas divergentes las cuales almacenan principalmente sedimentos siliciclásticos durante las primeras invasiones marinas de edad Cenozoica, dentro del periodo Neógeno.

El Mioceno se caracteriza por una serie de fallamientos y una intensa actividad volcánica en zonas fracturadas a lo largo el borde de la costa oriental, formando la sierra La Giganta, conformada por sedimentos volcánicos y vulcanoclásticos cuyo espesor alcanza los 1,500 m, subyaciendo a esta se localiza el batolito peninsular de rocas graníticas. En la figura 2 se muestra la distribución de las distintas litologías.

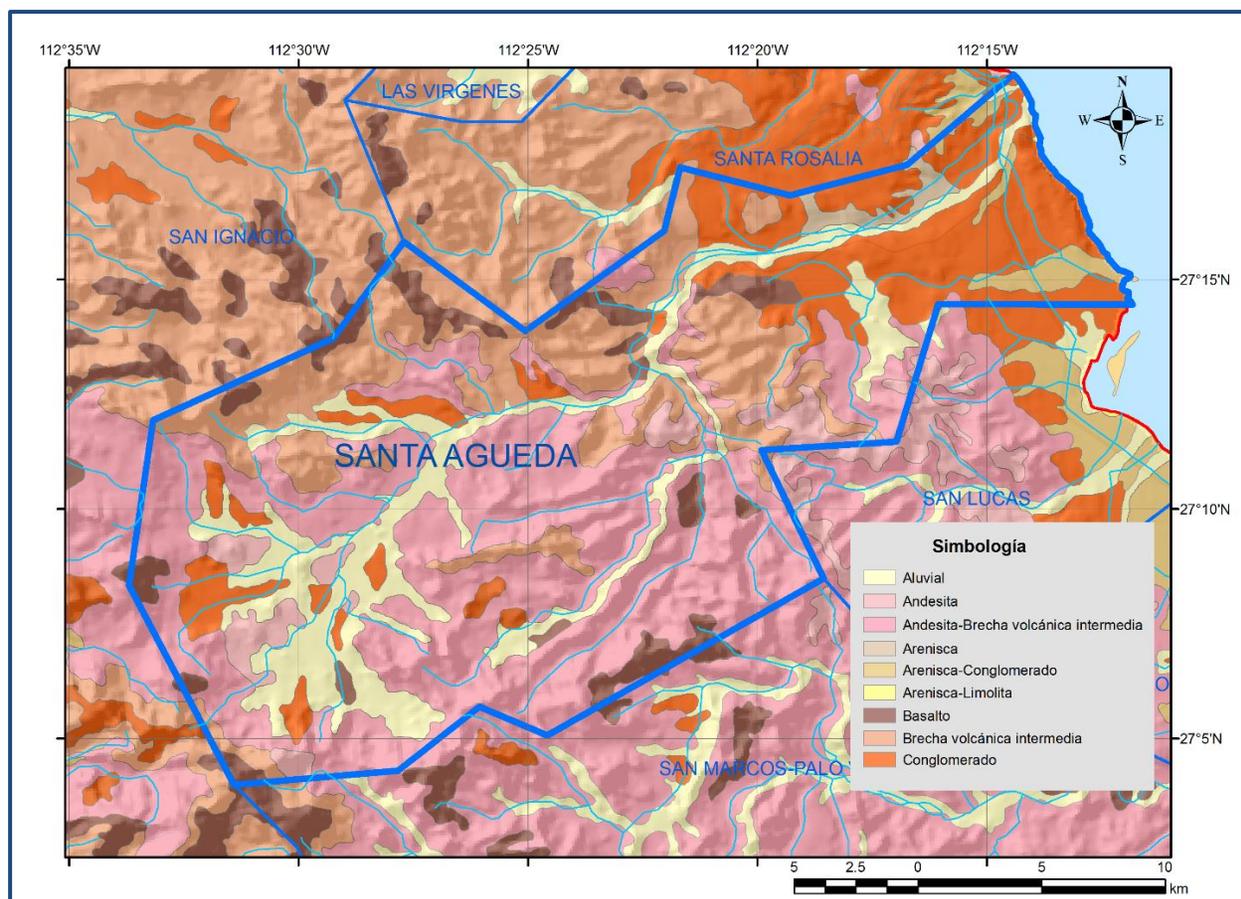


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Las rocas más antiguas de la región son las rocas batolíticas de edad Paleógeno-Neógeno, pero éstas no afloran.

Estas rocas están cubiertas por un espesor considerable de rocas volcánicas andesíticas y basálticas, así como sedimentos terrestres del Mioceno, conocido como Formación de Comondú.

Sobre estas descansan, en forma discordante, rocas sedimentarias marinas del Plioceno correspondientes a las Formaciones Boleo, Gloria e Infierno. Este paquete de rocas se encuentra cubierto por la delgada capa de Formación de Santa Rosalía, así como las rocas basálticas y piroclásticas de la Formación Tres Vírgenes. Gravas y arenas semiconsolidadas del Reciente y Cuaternario se depositaron en las planicies, cubriendo las rocas antes mencionadas.

La geología general del acuífero está compuesta por rocas volcánicas y sedimentarias, cuyo registro estratigráfico abarca del Mioceno al Reciente. Se describen a continuación las distintas unidades, de la más antigua a la más reciente.

MIOCENO

Formación Comondú

Se caracteriza por rocas ígneas extrusivas integradas por derrames consecutivos de tobas y conglomerados tobáceos de composición latítica a andesítica, pertenecientes a un solo ciclo eruptivo, son las más abundantes en el acuífero y las más antiguas, presentan una textura de aspecto manchado con tonalidades variables. Puede notarse pseudoestratificación debido principalmente a la alternancia de coladas de andesita y basalto con capas de aglomerados.

Formación Boleo

La formación está compuesta por gravas y material arenoso reciente y es únicamente en los cauces de los arroyos donde es posible observarlas. Consistente de una alternancia de tobas y conglomerados cuyo espesor es variable. Además de existir un sistema de diaclasas poco desarrolladas con tonos claros. Puede observarse rasgos de estratificación siendo sus planos casi horizontales. Intercalados con los conglomerados pueden identificarse capas delgadas de tonos muy claros (casi blancos) representando tobas arenosas.

Formación Gloria. De edad Plioceno Medio, consiste de una secuencia de areniscas marinas y conglomerados marinos y terrestres, descansa en forma discordante sobre la Formación Boleo. Su espesor es de 60 m variando de 25 a 185 m.

Formación Infierno. Esta formación de edad Plioceno Superior, consiste en una secuencia de areniscas marinas fosilíferas que descansan con ligera inconformidad sobre la Formación Gloria, sobre la cual se encuentra un conglomerado compuesto por fragmentos de rocas volcánicas Comondú en una matriz arenosa. Su espesor promedio es de 55 m correspondiente 30 m a las areniscas y 25 m al conglomerado.

PLEISTOCENO

Formación Santa Rosalía. Esta formación de edad Pleistoceno, está constituida por areniscas y conglomerados fosilíferos que descansan en inconformidad sobre la Formación Infierno. Esta formación es abundante en fósiles y su espesor varía entre 5 a 15 m.

PLEISTOCENO RECIENTE

Rocas volcánicas de Tres Vírgenes. De edad del Pleistoceno al Reciente, consisten principalmente de derrames de lava y capas piroclásticas que cubren extensas áreas sobre las mesetas al NW de Santa Rosalía, descansa en inconformidad sobre la Formación Santa Rosalía y su espesor fluctúa entre 30 a 50 m. El norte del área estudiada está cubierto por una serie de rocas volcánicas que se presentan formando como cineríticos con coladas superpuestas de basalto de olivino. Pueden observarse también paquetes de tobas intercaladas con corrientes lávicas de composición latítica, tobas soldadas y brechas volcánicas. Todas ellas han sido incluidas dentro de la Formación Tres Vírgenes

RECIENTE

Gravas y Aluviones. Estos depósitos consisten en gravas sueltas intercaladas con capas de conglomerados parcialmente cementadas, depositadas en un ambiente marino, su espesor máximo es de 20 m.

4.2 Geología estructural

Federico Mina ha dividido a la Península en cuatro unidades tectónicas: a) El Macizo marginal Oriental b) El Macizo del Cabo c) Los sinclinales Californianos y Soledad d) Finalmente postula una plataforma marginal Occidental ahora sumergida, de la que podrían ser testigos las islas de Cedros y Santa Margarita.

La estructura geológica de la Península es un gran bloque orogénico alargado, cuya orientación es de NW a SE, paralela en general al Golfo de California.

Sobre este bloque, como se ha visto es de naturaleza granítica, descansan formaciones sedimentarias Mesozoicas y Terciarias, que forman en la porción occidental del estado Sur, sierras poco elevadas paralelas a la costa, altiplanicies o llanuras ligeramente inclinadas hacia el W.

Las formaciones del Cretácico Medio y Superior, presentan en su estratificación una discordancia angular, en tanto que el Eoceno descansa concordantemente sobre el Cretácico superior. Se aprecia en toda la Península un sistema de fallas, cuyo rumbo es de NS a NNW-SSE y que se encuentran cruzado por otro sistema transversal de rumbo E-W a WNW-ESE.

Estos sistemas al atravesar las formaciones de las costas o de las mesetas, han provocado hundimientos y desniveles del terreno dando lugar a cañones y valles.

La presencia de horsts y grabens, representa el acomodo de las formaciones debido a una tafrogenia (Cascadiana) en el periodo Paleógeno-Neógeno. En la zona se pueden distinguir los efectos de dos épocas principales de deformación. Los resultados de la primera época fueron movimientos de basculamiento de menor intensidad y fallamiento normal. Gran parte de esta última época de formación se verificó hacia fines del Plioceno o durante el Pleistoceno, antes de que se extravasaran las rocas volcánicas de la Formación Tres Vírgenes. Estas últimas rocas, sin embargo, se hallan atravesadas por algunas fallas. La existencia de discordancia encima de las capas del Plioceno Inferior, del Plioceno Medio y en particular del Plioceno Superior, demuestra que se verificaron cuando menos tres periodos de combadura y tal vez de basculamiento.

Cerca del Arroyo El Infierno las rocas volcánicas muestran un basculamiento hacia el Oriente de un ángulo variable de 20° a 45°, dislocadas por una serie de fallas normales, las cuales tienen desplazamientos de 50 a 100 m, la mayoría de ellas con rumbo hacia el Noroeste y buzan 40° a 50° al Sureste. Al poniente del arroyo El Infierno y más al Poniente, las rocas de Comondú muestran echados más suaves, las secciones transversales de la Península.

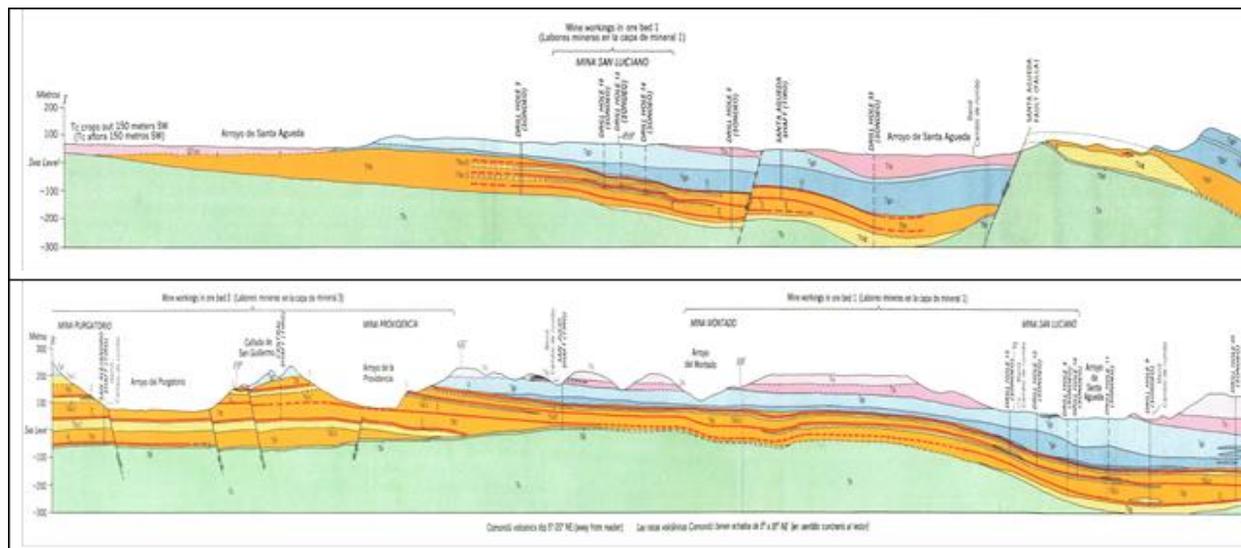
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con las evidencias de campo, la información de la geología del de la carta geológico-minera Santa Rosalía, clave G12-1, Baja California Sur, escala 1:250,000 del SGM, es posible definir que el acuífero se aloja en los sedimentos aluviales y fluviales provenientes de la erosión de las partes altas de la Sierra La Giganta que han sido transportados por los escurrimientos superficiales y depositados en forma de valle aluvial, en los cauces de los arroyos y en la planicie costera.

Su espesor se desconoce, pero se infiere que puede variar desde algunos metros hasta algunas decenas de metros.

El acuífero se encuentra bordeado por las rocas volcánicas impermeables de la Formación Comondú, que generalmente funcionan como barreras laterales e inferiores, al oriente la frontera es de carga constante representada por el Golfo de California.

En la figura 3 se presentan dos secciones geológicas esquemáticas que muestran la disposición de las unidades geológicas del subsuelo en esta porción de la península de Baja California Sur.



Fuente: SUR Minera Metalúrgica del Boleo, S.A. de C.V., 2007

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre heterogéneo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos depositados tanto en los subálveos de los arroyos como en la planicie costera. La granulometría de estos materiales varía de gravas a arcillas, conformando un acuífero de reducidas dimensiones y poca capacidad de almacenamiento.

La porción inferior del acuífero está alojada en rocas volcánicas y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El marco geológico general está conformado por rocas ígneas extrusivas, piroclásticas y sedimentarias de la Formación Comondú, de permeabilidad en general baja, y un paquete de rocas sedimentarias terciarias que funcionan como zonas de recarga al acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

En 2010 se ejecutaron 4 pruebas de bombeo de corta duración en etapa de abatimiento y recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de 0.021 a $17.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, con un valor promedio de $5.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de 0.01 a $8.68 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ con un valor promedio de $02.91 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no se pudieron obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe sólo información para 2010. No fue posible correlacionar las mediciones piezométricas de los pocos aprovechamientos censados en estudios previos.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático, mostrada en la figura 4, presenta valores que varían desde algunos metros, a lo largo del arroyo y en la planicie costera, hasta los 45 m, aumentando gradualmente de la zona costera hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, conforme se asciende topográficamente.

Los valores más someros se ubican en la parte baja del arroyo Santa Águeda y en los alrededores del estero San Luciano; en tanto que los más profundos se registran en la mina abandonada Williams y su profundidad se debe a la elevación topográfica a la que se encuentra.

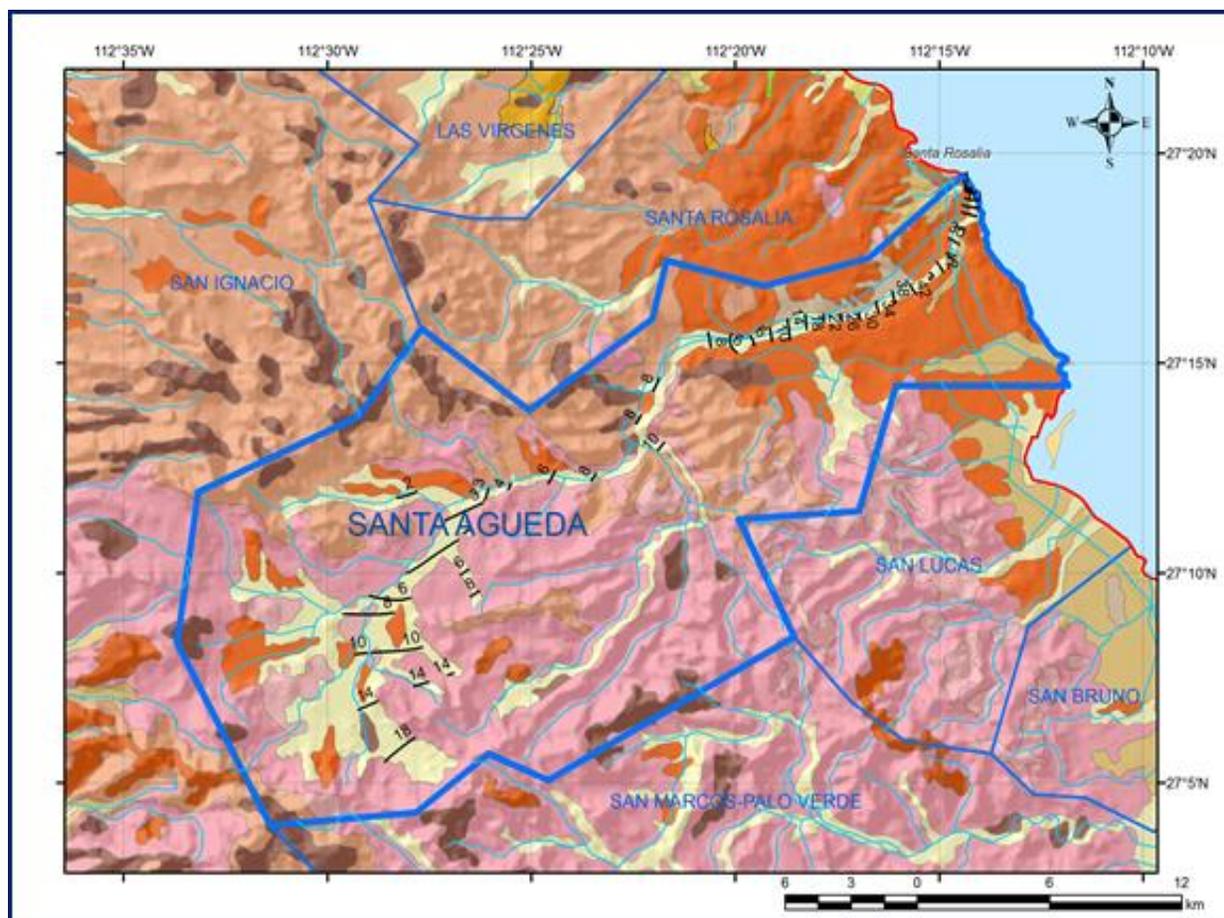


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático (figura 5), se observa que los valores varían entre -0.5 a 540 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

Los valores más bajos se localizan en la porción costera, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia la porción poniente, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo del poniente al oriente.

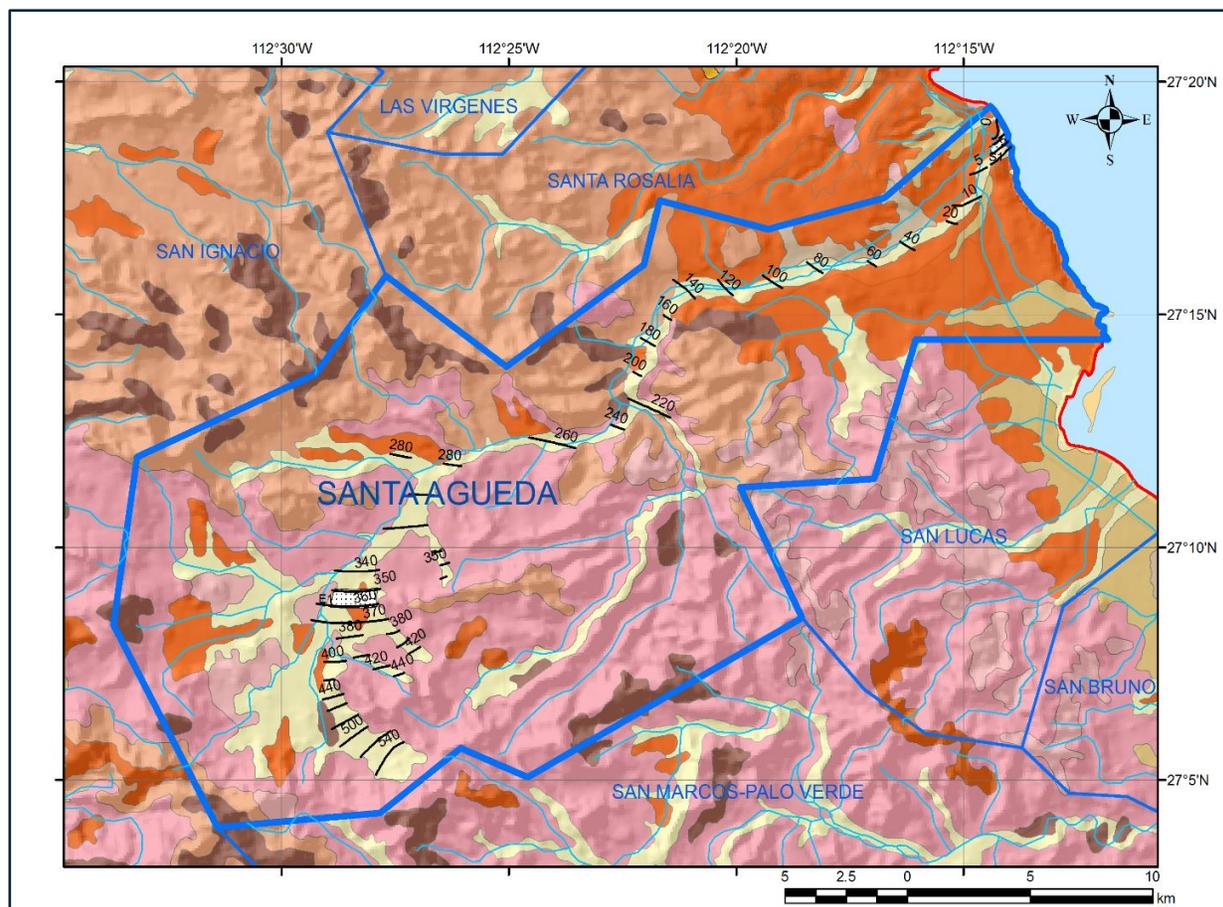


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Las mediciones realizadas en el año 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2010, se tomaron 7 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (2 pozos, 4 norias y un manantial), para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, etc, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores extremos que varían de 480 a 2,930 ppm, que sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido 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.

Los valores superiores a las 1,000 ppm se registran en algunos aprovechamientos ubicados en la zona costera. Las menores concentraciones se registran en los aprovechamientos localizados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en el extremo occidental del acuífero.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como C3 S2, aguas altamente salinas, con contenido moderado de sodio, que no pueden utilizarse en suelos con drenaje deficiente.

Su utilización se restringe a la selección de plantas tolerantes a las sales y posibilidad de la salinidad del suelo, aún con drenaje adecuado. Otra clase como C4, aguas muy salinas, con alto contenido de sodio (S3), que no es apropiada en condiciones ordinarias para el riego, puede utilizarse con un buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamiento realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 15 aprovechamientos, de los cuales 3 son pozos, 11 norias y un manantial; de ellos 11 están activos (2 pozos, 8 norias y un manantial) y 4 inactivos (1 pozo y 3 norias).

El volumen de extracción es de 0.2 hm³ anuales, de los cuales 0.15 hm³ (75%) se destinan para uso público urbano, 0.02 hm³ (10%) para la actividad pecuaria y los 0.03 hm³ restantes (15%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico, agrícola y servicios.

Adicionalmente, del manantial censado, conocido como Santa Águeda, se descarga un caudal de 171 lps, que equivalen a 5.4 hm³, sin que se reporte un uso específico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010, en un área de 5.3 km² del acuífero que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R_t) ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos a lo largo de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes y el riego agrícola es incipiente, se considera que no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

E_h : Entrada por flujo subterráneo horizontal

R_v : Recarga vertical

B : Bombeo

Sh : Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR : Evapotranspiración

D_m : Descarga de manantiales

ΔV : Cambio de almacenamiento

S : Coeficiente de almacenamiento

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, 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:

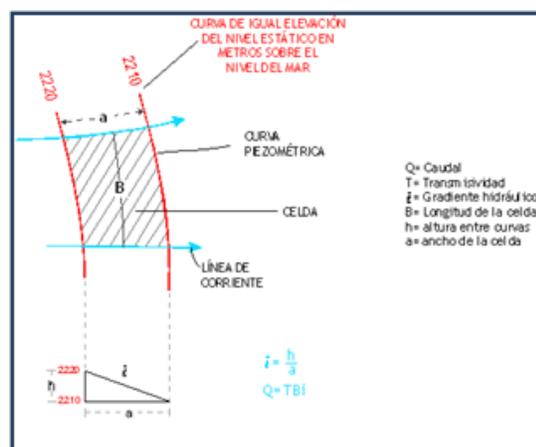
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico

T: Transmisividad en el canal de flujo



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **0.5 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

Celda	T (m ² /s)	B (m)	i (mm)	Q ₁ (m ³ /s)	Vol. Anual (hm ³)
E1	0.0007	1625.0	0.0135	0.015	0.5

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron de los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas tanto en este acuífero como en otros vecinos, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.2 Salidas

Las descargas en el acuífero ocurren principalmente por evapotranspiración (ETR), bombeo (B), salidas por flujo subterráneo (Sh) hacia el mar y al estero San Lucas y mediante la descarga de manantiales (Dm).

7.2.1 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 NE del año 2010, mostrada en la figura 5. Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación, hacia el mar. El valor estimado para este año de análisis se muestra en la tabla 3.

El valor de las salidas subterráneas es igual a **0.5 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal

Celda	T (m ² /s)	B (m)	i (mm)	Q ₁ (m ³ /s)	Vol. Anual (hm ³)
S1	0.0029	723.5	0.0072	0.015	0.5

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

En la zona de estudio la transpiración de la flora no es significativa debido a la escasa vegetación. Aunque el valor de la evapotranspiración se estima que es pequeño en este acuífero, dada la escasez natural del agua, se consideró importante estimar su valor para incluirlo en la recarga total que recibe el acuífero.

Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$ETR (mm) = \frac{P (mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$		$L = 300 + 25T + 0.05T^3$	
T (°C) =	24.07		
P(mm)=	121.418	P ² =	14742.33072
L=	1599.0157	L ² =	2556851.07
ETR (mm) =	127.6		

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L. Entonces debido a que la precipitación resultó menor que la relación 0.31L= 495.69, el valor de la evapotranspiración real debe despreciarse, ya que su valor resulta mayor valor de la precipitación.

El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la escasa presencia de cobertura vegetal. Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos <100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith (1973). Figura 6.

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE menor a 3 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas (2,378 mm CONAGUA, Dirección Local en Baja California Sur).

El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático.

De la figura 5 se deduce que para una profundidad al NE de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%.

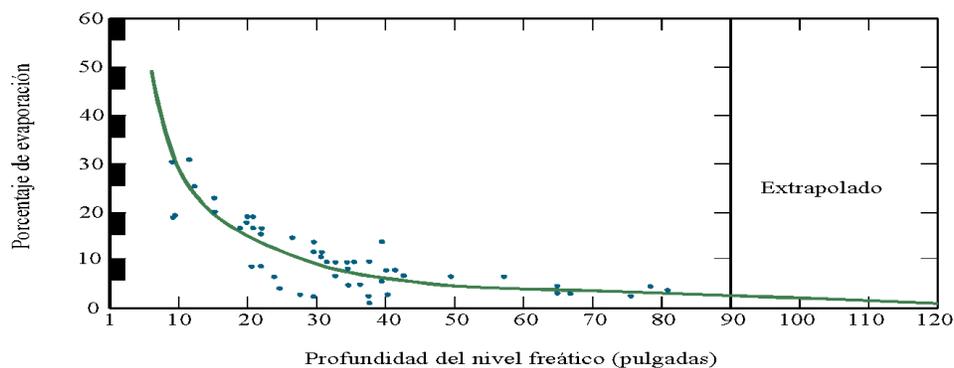


Figura 6. Evaporación del agua subterránea expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático según White.

En la tabla 4, se muestran los porcentajes respecto al volumen evapotranspiración, para las profundidades de 100, 200 y 300 cm. De acuerdo a lo anterior, se estima que el valor de la evapotranspiración promedio anual para el 2010 es de **0.02 hm³**.

Tabla 4. Volumen evapotranspiración respecto al porcentaje estimado

Profundidad media al nivel estático (cm)	% de Evaporación (Estimado gráfica de White)	Evaporación (mm/año)	Área (km ²)	Volumen Evapotranspirado (hm ³ /año)
100	6.25	2378	0.07	0.01
200	3.75	2378	0.05	0.00
300	0.92	2378	0.03	0.01
Total				0.02

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **0.2 hm³ anuales**.

7.2.4 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con los aforos, el volumen promedio de descarga del manantial Santa Águeda asciende a **5.4 hm³ anuales**.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo.

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

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 0.5 + 0.2 + 0.02 + 5.4 - 0.5 - 0.0$$
$$R_v = 5.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h$$
$$R = 5.6 + 0.5$$
$$R = 6.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **6.1 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Santa Águeda se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de 5.9 hm³ anuales, de los cuales 0.5 hm³ corresponden a la salida por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interface marina, 0.02 hm³ a la evaporación que debe comprometerse para preservar el ecosistema costero y 5.4 hm³ de las salidas a través de manantiales. Por lo tanto, **DNC = 5.9 hm³ anuales**

8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS)

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

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **388,406 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 6.1 - 5.9 - 0.388406 \\ \text{DAS} &= -0.188406 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **188,406 m³ anuales**.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de su disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero en la que actualmente existe información hidrogeológica para su evaluación.

No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere al registro periódico piezométrico y ejecución de pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2010. Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico de los acuíferos Cabo Pulmo, Cabo San Lucas, Mezquital Seco, La Purísima, Santa Águeda y Santa Rosalía, B.C.S. Elaborado por la empresa Sanx, Ingeniería Integral, S. A. de C. V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1974. Dirección de Geohidrología y Zonas Áridas. Estudio Hidrogeológico de San Bruno-Mulegé-Santa Rosalía en el territorio de Baja California Sur. Elaborado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S. A.