



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO AGUA AMARGA (0241), ESTADO DE
BAJA CALIFORNIA**

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	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica	5
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	6
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	9
4.2 Geología estructural	10
4.3 Geología del subsuelo.....	10
5. HIDROGEOLOGÍA.....	11
5.1 Tipo de acuífero.....	11
5.2 Parámetros hidráulicos	12
5.3 Piezometría.....	12
5.4 Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	13
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	13
5.4.3 Evolución del nivel estático	14
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	15
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	15
7.1 Entradas.....	16
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	16
7.1.2 Recarga inducida (Ri)	16
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	17
7.2 Salidas	18
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	18
7.2.2 Bombeo (B)	20
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	20
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	20
8. DISPONIBILIDAD	21
8.1 Recarga total media anual (R).....	22
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	22
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	22
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	22
9. BIBLIOGRAFÍA	24

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 Agua Amarga, definido con la clave 0241 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción sureste del estado de Baja California, entre los paralelos 28° 48' y 29° 35' de latitud Norte y los meridianos 113° 31' y 114° 06' de longitud oeste del meridiano de Greenwich. Se localiza dentro del municipio de Ensenada y comprende una superficie aproximada de 2,251 km².

Colinda al norte y este con el Golfo de California, al oeste con los acuíferos Calamajué y La Bachata-Santa Rosalita y al sur con los acuíferos Nuevo Rosarito y Bahía de los Ángeles, todos ellos dentro del estado de Baja California (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0241 AGUA AMARGA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	114	0	47.1	29	34	416	DEL 1AL 2 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
2	113	32	48.1	28	55	514	
3	113	35	10.0	28	55	20.1	
4	113	37	0.3	28	52	2.3	
5	113	36	13.5	28	47	58.5	
6	113	42	34.0	28	50	2.7	
7	113	45	23.8	28	52	58.8	
8	113	51	27.5	29	2	58.0	
9	113	57	6.0	29	6	39.7	
10	113	57	8.3	29	12	40.7	
11	114	3	4.4	29	15	414	
12	114	6	47.0	29	23	43.6	
13	114	4	52.0	29	30	43.0	
1	114	0	47.1	29	34	416	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Agua Amarga pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. Su territorio completo se encuentra sujeto al Decreto de Veda tipo III, “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 el 15 de mayo de 1965. De acuerdo con él, sólo se permiten 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 4. El uso principal del agua subterránea es público-urbano, que explota el 96% del agua extraída. El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999.

No existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero se localiza dentro de la Zona de Protección Forestal y Refugio de la Fauna Silvestre “Valle de los Cirios”, con fecha de Decreto 2 de junio de 1980.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero y la región aledaña se han realizado algunos estudios geohidrológicos. A continuación se mencionan los resultados y conclusiones más relevantes.

Secretaría de Recursos Hidráulicos- Dirección de Geohidrología y de Zonas Áridas (1974). APRECIACIÓN PRELIMINAR DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DEL VALLE DE BAHÍA DE LOS ÁNGELES EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA.

Elaborado por Técnicas Modernas de Ingeniería S. A. El objetivo del estudio fue determinar las características hidrogeológicas del valle para dictaminar sobre posibles sitios para exploración y explotación del agua subterránea, así como proponer recomendaciones para la explotación futura del acuífero. Se realizó censo de aprovechamientos y un reconocimiento geológico.

En el reconocimiento geológico se proponen 6 sitios para explorar, los sitios 1 y 2 se localizaron en los cauces superficiales recientes, los sitios 3, 4 y 5 en la porción Oriente de los abanicos aluviales formados por las descargas de los ríos, y el sitio 6 en la ladera Occidental del Valle.

Comisión Nacional del Agua. Organismo de Cuenca Península de Baja California (2008). ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN 20 ACUÍFEROS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA.

El objetivo principal de este estudio fue plantear el balance preliminar de aguas subterráneas para determinar la disponibilidad, mediante la realización actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y nivelación de brocales. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

Fisiográficamente el área corresponde a la provincia de las Sierras de Baja California, Subprovincia Sierra Volcánica (según Miguel Álvarez Jr.), localmente se caracteriza por exhibir un relieve abrupto conformado por Sierras que corren en sentido Norte - Sur y noroeste-sureste con elevaciones que llegan a 1600 msnm y sobresalen hasta 1000 m de las superficies de los valles. Las Sierras que corren paralelamente a la costa del Golfo de California, se meten hacia el mar sin formar ninguna llanura costera.

Dentro de las principales elevaciones se encuentran las Sierras de las Ánimas, Las Flores, La Libertad, Solorio, el Toro y Cinta de La Cantera.

Las depresiones se encuentran ocupadas por los Valles Agua Amarga Montevideo, Rinconada de Solorio y Las Flores (Bahía de los Ángeles).

La Sierra Las Ánimas, al Oriente del área, está constituida por rocas basálticas muy fracturadas y afalladas, coronadas por rocas post-batolíticas representadas tanto por tobas y brechas riolíticas como por rocas basálticas.

La Sierra La Libertad cuenta con elevaciones prominentes, se ubica en la parte central del área y está constituida en su mayor parte por rocas ígneas intrusivas, tipo granito, granodiorita y tonalita, rocas ortometamórficas, algunos afloramientos aislados de rocas volcánicas y sedimentarias en un margen occidental.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de climas elaborada por W. Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, en forma genérica, regionalmente predomina el tipo muy seco (BS), o desértico con oscilaciones térmicas sensibles que alcanzan régimen extremoso, con algunas zonas calurosas durante el día y noche que van de frías a muy frías.

Las lluvias son muy escasas en la mayor parte de la región, sin embargo se presentan principalmente de octubre a marzo, con una precipitación media anual de 67mm en un periodo de 30 años, con lluvias extraordinarias de 235 mm para 1983 y con una precipitación mínima registrada de 9 mm en 1986.

La temperatura media anual es de 27.6° C, donde el mes de julio es el más caluroso en promedio con una temperatura de 30° C y el más frío es enero (13° C). En cuanto a la evaporación el valor medio anual es de 2020 mm. La información se obtuvo de la estación climatológica 002 Bahía de los Ángeles ubicada al Este del acuífero con coordenadas, latitud 28° 56' 40" y longitud 113° 33' 24" a línea de costa, con un periodo de registro de 53 años de 1953 a 2006.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 5 "Baja California Centro Oeste" esta región es una larga faja de la vertiente del Golfo de California. El desarrollo del litoral que le corresponde es de 465 km, con una anchura máxima de 50 km.

El acuífero está integrado por las cuencas hidrográficas denominadas Bahía de los Ángeles y Agua Amarga. La red hidrográfica que recarga el acuífero, es aportada por una serie de arroyos que tiene origen en el flanco Este de la Sierra La Libertad, identificada con el nombre La Terminal, San Juan, Cañada La Borreguera, Cañada El Tigre, Cañada La Víbora y El Pulpo; Los primeros cuatro arroyos integran el Arroyo la Gobernadora, que escurre longitudinalmente en el flanco Este del valle, en la porción Oeste de la Sierra La Libertad, escurre el arroyo El Cañoncito- Angostura, drena por la zona conocida como Rinconada Solorio, integran una cuenca con una superficie de aproximadamente 100 km², que finalmente descargan al Norte del Poblado Bahía de los Ángeles en el Golfo de California. Esta pequeña cuenca aun cuando corresponde a Bahía de los Ángeles su funcionamiento es independiente.

En la porción sureste del Valle se integra el Arroyo La Tinaja al de La Gobernadora, que se originan en la Sierra Las Ánimas; de la Sierra Las Flores escurren al oeste pequeños arroyos agregándose al Arroyo La Gobernadora.

3.4 Geomorfología

El acuífero se encuentra limitado al Poniente por la Sierra La libertad y al Oriente por la Sierra Las Ánimas y Las Flores, con un desarrollo desde línea de costa hacia el sur por una longitud mayor de a los 26 km y una amplitud de 5 km, la superficie está cubierta predominantemente por depósitos aluviales, eólicos, lacustres y fluviales.

La Sierra El Solorio la constituyen rocas ígneas intrusivas como tonalita y granodiorita, rocas post-batolítica identificadas como metasedimentarias, plutónicas y metamórficas mezcladas y gneis, se encuentran también rocas volcánicas no diferenciadas, basaltos y andesitas basálticas.

En la sierra El Toro predominan rocas metasedimentarias, rocas volcánicas no diferenciadas, basaltos y andesitas basálticas, así mismo se encuentran rocas ígneas intrusivas tipo tonalita. La sierra Cinta de La Cantera está integrada predominantemente por rocas metasedimentarias, por gneis y metamórficas mezcladas, se encuentran rocas volcánicas no diferenciadas y basalto, andesitas basálticas y depósitos fluviales.

4. GEOLOGÍA

Las unidades expuestas en el área varían de edad Mesozoico Inferior al Reciente, la base de la secuencia mesozoica está representada por rocas metasedimentarias e ígneas intrusivas batolíticas cuya edad probable es el Triásico en la cual se encuentran paquetes interdigitados de esquistos, filitas y pizarras predominando los gneis en algunas exposiciones. Las rocas de edad Cretácica están representadas por rocas ígneas intrusivas y metamórficas, estas con metamorfismo incipiente. Dentro de las rocas intrusivas predominan las tonalitas y granodioritas de color gris claro con tonos blanquecinos, muestran textura holocristalina de grano grueso, los granitos de color gris claro con tonalidades rojizos se presentan muy fracturados. Las rocas intrusivas básicas son las más antiguas, las de composición ácida corresponden a los más recientes, las cuales se encuentran encajonados en la unidad básica y subyacen a las diferentes unidades del Cenozoico (figura 2).

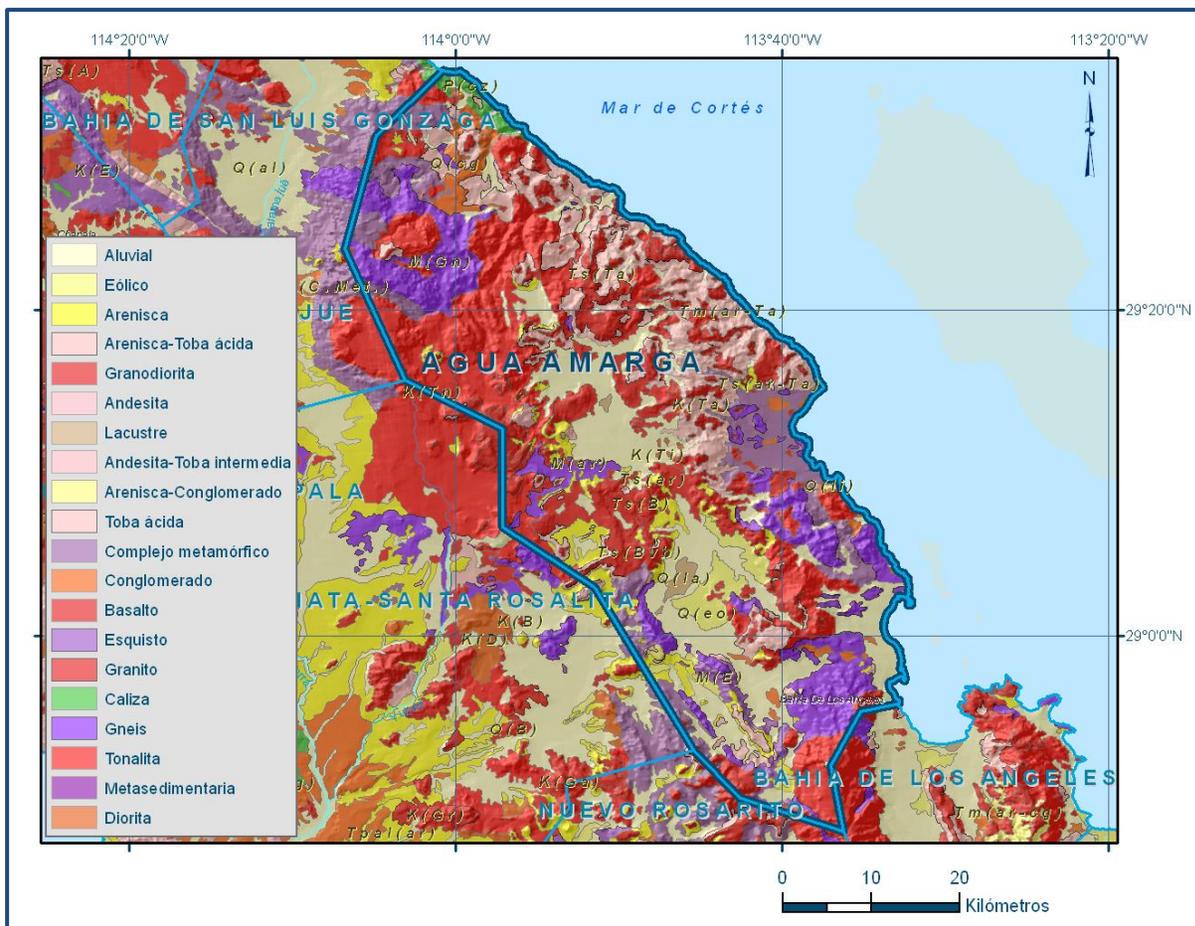


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Formación Tepetate (Tiar-Im): Litológicamente, la unidad consiste en una intercalación de areniscas amarillentas a café rojizas, con areniscas conglomeráticas, lodolitas y fangolitas con lentes concrecionales.

La arenisca se presenta en estratos por lo general delgados a medianos de no más de 40 cm, con una ligera inclinación hacia el mar, de grano fino con buena clasificación y algunas capas tienen residuos de halita (cloruro de sodio). Presenta un sistema de fracturas de espaciamiento moderado, con relleno de yeso, así como estratos fosilíferos con abundantes turrítelas y foraminíferos.

Formación Alisitos (Krm): Está constituida por una serie de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias; las primeras de composición andesítica mientras que las rocas sedimentarias están constituidas por la denudación de las rocas volcánicas y volcanoclásticas, están afectadas por un proceso de dinamometamorfismo el cual va disminuyendo de Oriente a Poniente. Se encuentra coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico en forma discordante.

Plioceno: Está representado por rocas de origen marino y continentales, está constituida por areniscas de grano fino, aparentemente sin cementante arcilloso y conglomerados formados por fragmentos de roca volcánica e ígneas intrusivas; presentando una matriz calcárea.

Dentro del área las rocas sedimentarias presentan una distribución restringida. Las unidades más importantes expuestas dentro del acuífero corresponden a los depósitos sedimentarios no consolidados del Cuaternario y Reciente, representados por material aluvial, piedemonte, fluvial, eólico, lacustre, arcilla y conglomerados. A estas unidades se les encuentra formando planicies aluviales así como rellenos de los valles fluviales, el área con mayor espesor respecto a esta unidad está ubicada dentro del valle de Bahía de los Ángeles.

Unidad Aluvial: Esta unidad está constituida por arenas limpias de diferente granulometría, por gravas y gravillas bien graduadas derivadas de rocas ígneas intrusivas, metamórficas, volcánicas y sedimentarias preexistentes. Esta unidad presenta mayor importancia por su capacidad para almacenar agua.

Unidad Eólica: Integrada por arena de grano fino a medio, se encuentran bien redondeadas y clasificadas.

Derivada de rocas ígneas y metamórficas, presenta además, minerales y fragmentos de moluscos, expuestos en las zonas costeras y en algunos valles presentando escasos metros de espesor, se encuentran formando dunas arregladas paralelamente a la línea de costa.

Unidad Lacustre: compuesta por estratos delgados y laminares de arenas finas intercaladas con horizontes de arcillas se localizan en la línea de costa del Valle Agua Amarga por su origen almacenan agua con altas concentraciones de sólidos totales disueltos.

4.2 Geología estructural

Las estructuras geológicas presentes en el área del acuífero se atribuyen a procesos ligados a actividades tectónicas y volcánicas.

La zona de los grandes canales se caracteriza por una alta actividad tectónica, encontrando las siguientes estructuras: Zona de Falla Ballenas, Zona de Falla Partida y Zona de Falla San Lorenzo.

Estas estructuras están compuestas por una serie de fallas normales, además de encontrarse una falla activa a lo largo de estas.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo a la geología del área, se definen tres unidades hidrogeológicas, tomando en cuenta las características de permeabilidad y composición de cada una de ellas.

Unidad permeable: Esta unidad la constituyen depósitos sedimentarios aluviales, integrados por arenas de diferente granulometría, gravas, gravillas, que se caracterizan por tener una elevada permeabilidad.

Se consideran las acumulaciones de piedemonte y fluviales que integran materiales gruesos, como arenas gruesas y arcillas; además se tienen depósitos eólicos y areniscas limpias por su exposición reducida no tiene gran importancia hidrogeológica.

Unidad Semipermeable. La unidad volcánica está representada por tobas y basaltos por su intenso fracturamiento adquieren una permeabilidad secundaria, pero por su alta posición estratigráfica, funcionan como transmisoras de agua a formaciones subyacentes, en esta unidad se agrupan los conglomerados que presentan una composición de rocas ígneas intrusivas-metamórficas y volcánicas, cubriendo espacios aislados por lo que se reduce su grado de interés.

A esta unidad la constituyen también los depósitos lacustres formados por estratos delgados de arena fina, intercalada con horizontes arcillosos y una exposición reducida, perdiendo de este modo su interés geohidrológico.

Unidad Impermeable: Dentro de esta unidad se encuentran las rocas metasedimentarias, intrusivas-metamórficas e intrusivas. Las rocas metasedimentarias pre-batolíticas de acuerdo con sus características litológicas y estructurales, se le considera como basamento impermeable y en esta misma se agrupan rocas intrusivas metamórficas.

Considerando su origen y litología y relación con las rocas intrusivas, su funcionamiento es de una roca impermeable, así mismo las rocas intrusivas con algunas alteraciones por meteorización y fracturamiento las cuales pueden almacenar pequeñas cantidades de agua.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero Agua Amarga es de tipo libre (área de explotación), figura 4, se compone principalmente de sedimentos no consolidados a lo largo del cauce y en la zona de la planicie costera de granulometría fina a gruesa (arcillas a arenas).

El valle de origen tectónico se encuentra bordeado en su flanco Occidental por rocas ígneas intrusivas, y metamórficas impermeables y en su flanco Oriental por rocas extrusivas volcánicas de iguales condiciones de permeabilidad.

Durante el Pleistoceno los movimientos epirogénicos que sufrió la Península de Baja California, ocasionaron en el área, la invasión del mar sobre la entonces cuenca en formación, como consecuencia al retirarse el mar originó la formación de salinas, rellenadas posteriormente por depósitos aluviales.

Actualmente lo anterior se encuentra representado por terrazas topográficas con elevaciones de 80 msnm. Debido a las condiciones de formación de la cuenca, los pozos y norias perforadas en el valle captan agua con alto contenido en sales.

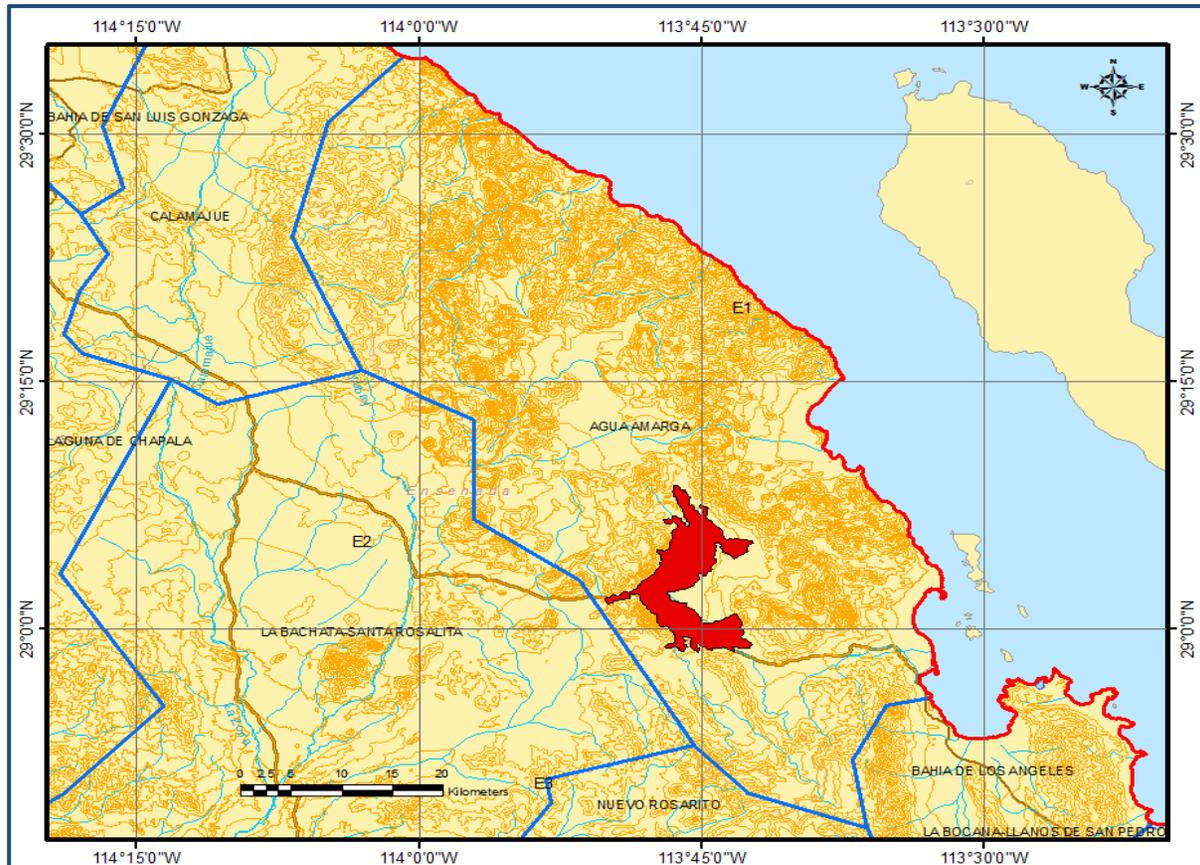


Figura 4. Área de explotación

5.2 Parámetros hidráulicos

Los datos obtenidos dentro del área del acuífero, nos permite definir las características hidráulicas del acuífero, las cuales señalan que es un acuífero de tipo libre con valores variables, de acuerdo con la granulometría de la zona de captación.

5.3 Piezometría

Los estudios con información respecto a la piezometría corresponden únicamente al año 2008. La nomenclatura para los aprovechamientos es establecida por la CONAGUA.

Se tiene registrados la existencia de 11 aprovechamientos, la información de la piezometría corresponde a la zona cercana al poblado el Porvenir en la Costa y el poblado Agua de Higuera dentro de los límites del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo a la configuración realizada en 2008, se observa que la profundidad varía entre 20 m hacia el centro de la zona de extracción y 42 m, localizándose las mayores profundidades en la porción sur del área de explotación, observándose así una variación gradual del nivel piezométrico hacia el sureste (figura 5).

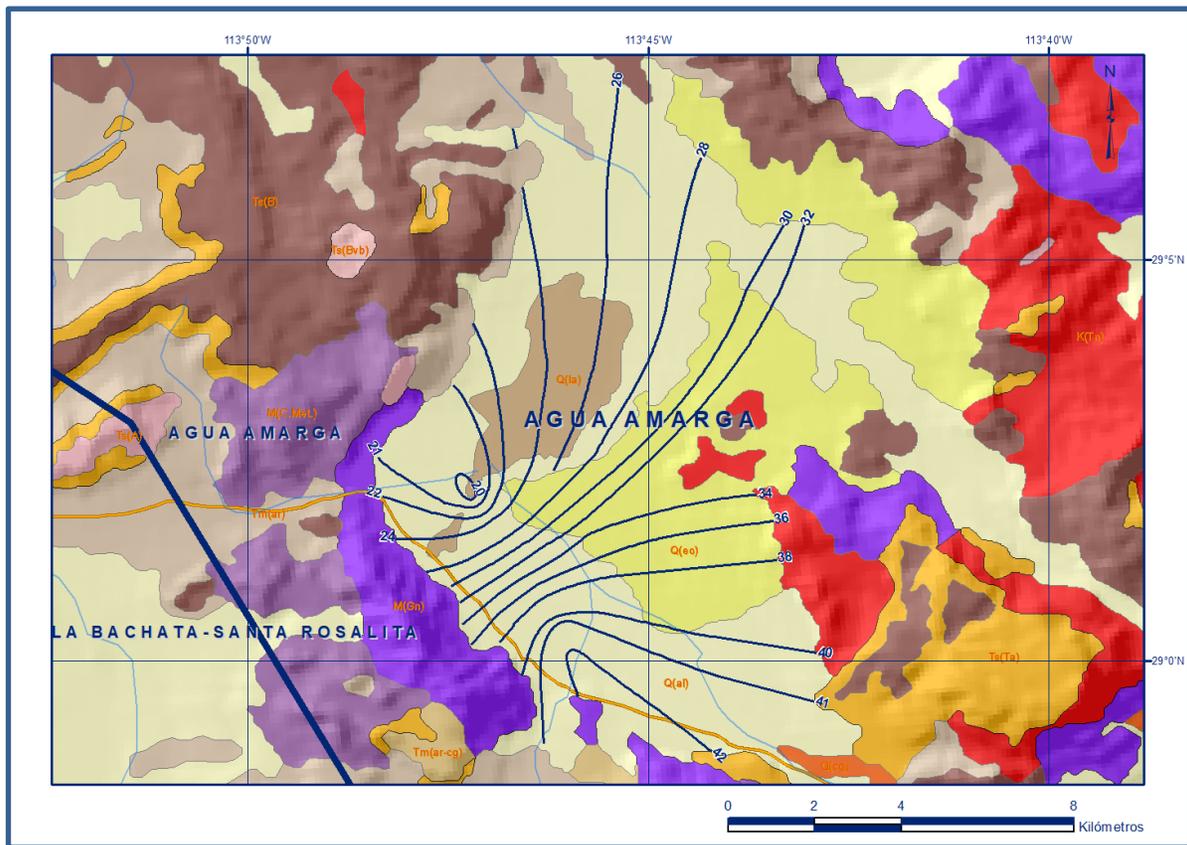


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2008)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Es el principal indicador del flujo subterráneo, ya que las cargas están referidas a la elevación media del nivel del mar.

De esta forma las zonas de saturación de mayor elevación generan movimiento de aguas subterráneas en dirección de las localidades donde la elevación de los niveles de saturación es menor, todo esto si no existen fronteras que impidan el flujo. Para el área de explotación, las elevaciones reflejan que el flujo del agua en el subsuelo tiene semejanza con un hipotético flujo en condiciones naturales con dirección Este-Oeste. Y los valores van de los 275 a los 190 msnm (figura 6).

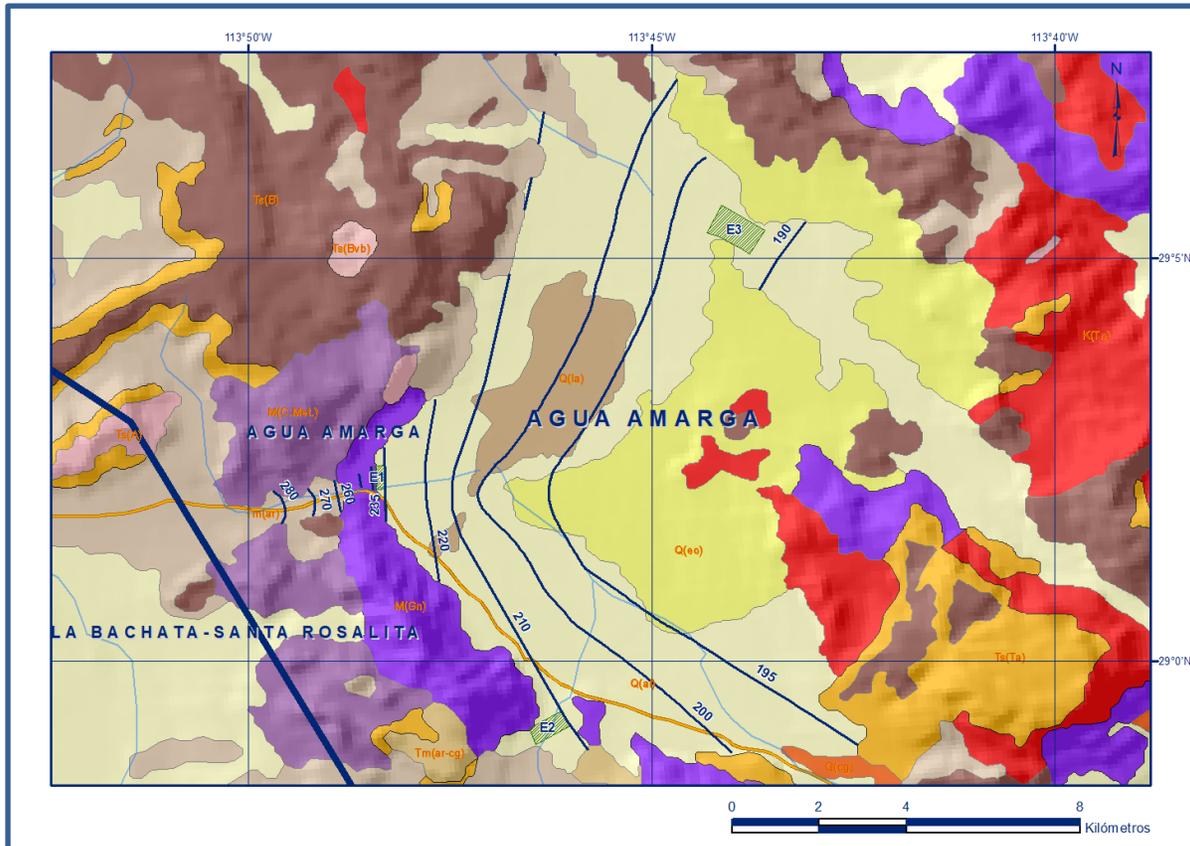


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita elaborar una configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Adicionalmente, la incipiente extracción que se realiza no ha causado aún la alteración de las condiciones del estado inicial del régimen de flujo subterráneo.

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.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

No se cuenta con información hidrogeoquímica reciente; sin embargo, el estudio realizado en 1974 reportó que la calidad química del agua varía de regular a buena. Los resultados de los análisis químicos de los aprovechamientos a cielo abierto demuestran que el agua subterránea contiene concentraciones sólidos totales disueltos mayores a los 1000 ppm que establece la norma oficial mexicana para el agua destinada al abastecimiento de agua potable (1236 y 1184 ppm). Localmente, los valores altos de concentración de sulfatos y de dureza del agua pueden estar asociados a la presencia de calizas que se explotan para la fabricación de cal.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En el acuífero no se cuenta con un censo de aprovechamientos recientes, sin embargo las condiciones de mala calidad del agua en la región restringe la explotación del recurso y limita el desarrollo de los diferentes sectores en la región. No obstante, un estimado del volumen de extracción, da como resultado 0.5 hm³/año.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. El balance se definió en una superficie de 148.5 km².

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

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

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

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

7.1 Entradas

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 (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

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

Donde:

Rv: Infiltración por lluvia

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR: Evapotranspiración

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Recarga inducida (Ri)

La recarga inducida se constituye principalmente por retorno de riego, infiltración de obras hidroagrícolas así como la infiltración de las redes de agua potable.

En el área de balance, el volumen de agua subterránea explotado para uso agrícola no es representativo por lo que se considera despreciable el retorno de riego, así como también la infiltración de infraestructura hidroagrícola.

Para el caso de infiltración de las redes de agua potable, también se consideran despreciables por el volumen destinado para este uso.

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, 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. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 6). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

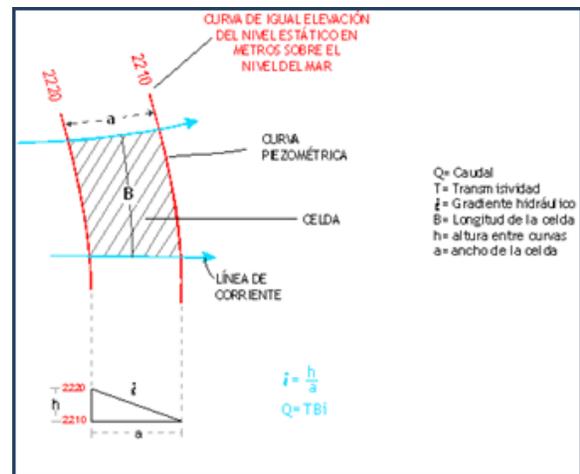
Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.



Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad $T = K \cdot a$, la ecuación queda reducida a:

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

Donde:

T = Transmisividad en m^2 / s

B = Longitud de la celda en m

i = Gradiente Hidráulico, en m

Tabla 2. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo

Celda	T ($10^{-3} m^2/s$)	B ($10^3 m$)	i	Q (m^3 / s)	Vol. anual (hm^3)
ENTRADAS LATERALES					
E ₁	0.926	0.600	0.01852	0.0103	0.324
E ₂	2.083	0.375	0.00645	0.0050	0.159
E ₃	1.852	0.710	0.00206	0.0027	0.085

El cálculo de volumen total por flujo subterráneo horizontal (Eh) para el año 2008 es de \approx **0.6 hm^3** .

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh) y la evapotranspiración (ETR). No existen manantiales ni descarga de flujo base a lo largo del arroyo.

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

El método de Evapotranspiración empleado para el balance se tomó considerando que los volúmenes de precipitación bajos que se presentan en el área de balance, descartando así tanto el método de Turc como el de Smith, ya que en ambos métodos para considerar confiable el volumen de evapotranspiración, deben presentarse precipitaciones mayores a 320 y 300 mm respectivamente.

De forma adicional para observar el 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 7.

En la tabla 3 se muestran los porcentajes respecto al volumen evaporado para las profundidades de 100, 200 y 300 cm, para el año 2008.

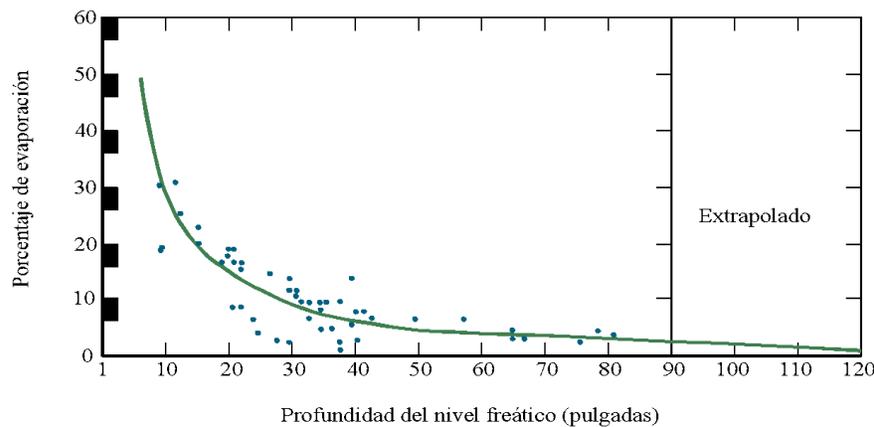


Figura 7. Evaporación del agua subterránea expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático (según White)

El porcentaje evaporado se estimó de la representación gráfica realizada por White, respecto a la evaporación de los suelos que varían desde arcillas a limos. Para obtener el volumen total de evapotranspiración, se multiplica el porcentaje estimado por la lámina evaporada en este caso es de 2,020 mm para 2008 este valor se tomó de un promedio estimado de acuerdo a los años en que existe información (CONAGUA Gerencia Regional de Baja California).

Con estos valores se obtuvo una lámina evaporada para el año de análisis de acuerdo a la profundidad media al nivel estático (100, 200 y 300 cm), multiplicando finalmente por el área susceptible a la evaporación se obtuvo un volumen anual de evapotranspiración; para el año 2008 de **0.4 hm³**.

Tabla 3. Volumen de evapotranspiración respecto al % estimado a la gráfica de White de acuerdo al área

PROF. MEDIA AL NIVEL ESTÁTICO (cm)	% DE EVAPORACIÓN (ESTIMADO GRÁFICA DE WHITE)	LÁMINA EVAPORADA EN EL ACUÍFERO (mm/año)	LÁMINA EVAPORADA EN EL ACUÍFERO DEACUERDO A LA PROFUNDIDAD (mm/día)	ÁREA (Km ²)	VOLUMEN EVAPOTRANSPIRADO (hm ³ /AÑO)	TOTAL VOLUMEN EVAPOTRANSPIRADO (hm ³ /AÑO)
2008						
100	6.25	2,020	0.35	2.8	0.35	
200	3.75	2,020	0.21	0.5	0.04	
300	0.92	2,020	0.05	0.5	0.01	
						0.40

7.2.2 Bombeo (B)

Este componente se determinó estimando el volumen de extracción con un valor de bombeo de **0.5 hm³/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

La configuración de las curvas de igual elevación para el año 2008 no muestra la presencia de salidas por flujo subterráneo, por lo que se considera que no existen salidas subterráneas del acuífero. **Sh = 0**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV(S))

No se dispone de información piezométrica regional para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes están dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Adicionalmente, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de abatimiento.

Por lo anterior, se considera que la posición al nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento se considera nulo; es decir, **ΔV(S) = 0**.

Solución a 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:

$$R_v = (\Delta V's) + (B + Sh + ET) - E_h$$

$$R_v = 0.0 + (0.5 + 0.0 + 0.4) - 0.6$$

$$R_v = 0.9 - 0.6$$

$$R = 0.3 \text{ hm}^3/\text{anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical y las entradas horizontales subterráneas.

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 0.3 + 0.6$$

$$R_v = 0.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **0.9 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, se considera que no existen salidas naturales comprometidas. **DNCOM= 0.0.**

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 **10,626 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 0.9 - 0.0 - 0.010626 \\ \text{DMA} &= 0.889374 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **889,374 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. 2007. Estudio Técnico para determinar la disponibilidad media anual de las aguas subterráneas de los acuíferos El Rosario, Villa de Jesús María, Bahía de Los Ángeles, La Rumorosa-Tecate y San Rafael-La Palma, estado de Baja California”, para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Península de Baja California.