



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CAÑÓN LA CALENTURA (0215), 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	5
3.3 Hidrografía.....	6
3.4 Geomorfología.....	6
4. GEOLOGÍA.....	6
4.1 Estratigrafía	7
4.2 Geología estructural	10
4.3 Geología del subsuelo.....	10
5. HIDROGEOLOGÍA.....	11
5.1 Tipo de acuífero.....	11
5.2 Parámetros hidráulicos	11
5.3 Piezometría.....	11
5.4 Comportamiento hidráulico.....	12
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	12
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	12
5.4.3 Evolución del nivel estático	13
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	14
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	14
7.1 Entradas.....	15
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	15
7.1.2 Recarga inducida (Ri)	16
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	16
7.2 Salidas	18
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	18
7.2.2 Bombeo (B)	21
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	21
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	21
8. DISPONIBILIDAD	22
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM).....	23
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	24
8.4 Disponibilidad de aguas Subterráneas (DAS)	24

9. BIBLIOGRAFÍA25

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 Cañón de La Calentura, definido con la clave 0215 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroeste del estado de Baja California, tiene una superficie aproximada de 646 km². Colinda al norte con el acuífero San Vicente, al este con el acuífero La Trinidad, al sur con el acuífero San Rafael y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 1). Geopolíticamente se encuentra ubicado en el 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.

Tabla 1. Coordenadas de la Poligonal simplificada del acuífero Cañón de la Calentura

ACUIFERO 0215 CAÑON LA CALENTURA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	116	20	20.6	31	12	29.9	
2	116	18	11.8	31	14	49.9	
3	116	8	22.0	31	16	52.0	
4	116	5	34.5	31	18	51.8	
5	116	3	6.6	31	19	25.5	
6	116	1	50.9	31	21	26.4	
7	116	59	46.9	31	21	26.4	
8	116	53	21.6	31	24	12.9	
9	116	52	34.8	31	19	25.7	
10	116	54	39.4	31	18	37.0	
11	116	55	6.0	31	17	18	
12	116	57	56.5	31	15	45.7	
13	116	2	49.8	31	11	23.9	
14	116	8	17.9	31	11	30.9	
15	116	15	6.3	31	3	32.6	
16	116	19	56.6	30	59	53.8	DEL 16 AL 1POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	116	20	20.6	31	12	29.9	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Cañón La Calentura pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965.

Este decreto se clasifica como tipo III que 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 1.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

ESTUDIO DE PROSPECCIÓN DE APROVECHAMIENTOS EN EL CAÑÓN LA CALENTURA, CUENCA SAN VICENTE, ENSENADA, B.C. Elaborado por Lorax Constructores S.A. de C.V. en 2003. Este estudio identificó los flujos de agua y sitios propicios de aprovechamiento para agua superficial y subterránea.

ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN 20 ACUÍFEROS DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. en 2008.

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

De acuerdo a la clasificación de las Provincias Fisiográficas del INEGI (1997), el acuífero Cañón de La Calentura se encuentra políticamente ubicado dentro de la Provincia Fisiográfica Península de Baja California.

En la porción norte destaca la Sierra de San Pedro Mártir con alturas que sobrepasan los 3,000 m (La Encantada 3,100 msnm) forma parte también la subprovincia de la Sierra Cristalina (Álvarez 1964), geográficamente se encuentra limitada por el Océano Pacífico; al este por el complejo volcánico de San Pedro Mártir y al suroeste por la subprovincia de la Llanura Costera de Baja California.

Las elevaciones más importantes dentro del acuífero son la Sierra Warner principalmente los Cerros Los Cochis y Los Encinos, a una elevación de 100 a 500 y a 1000 msnm la parte más alta en el Cerro Los Encinos, la zona está representada además por una serie de cañones como el Cañón San Antonio del Mar y Cañón El Abra los cuales concurren al dren principal denominado arroyo el Salado o Cañón la Calentura, que desemboca en el Océano Pacífico. La zona de valles comprende el Valle Playas de San Antonio del Mar con elevaciones de 0 a 20 msnm.

3.2 Clima

Con base en la clasificación de Köppen modificada por E. García (1964), el acuífero presenta un clima que corresponde al tipo BSk. De acuerdo a la estación 018 La Calentura, la temperatura media anual es de 18.5°C. La temperatura media de los

meses más cálidos, de julio a agosto es 34.7°C. La temperatura media del mes más frío (enero) es 4.7°C. Las variaciones extremas de temperatura son 50°C y -9°C.

De acuerdo con los registros la precipitación ha sido muy variable de 1958 a 2007, según la estación climatológica La Calentura se presentaron lluvias extraordinarias en este periodo; el año en que se registró la mayor precipitación total anual fue 1978 con un valor de 646.8 mm y el año en que se registró la menor precipitación total anual fue 2002 con un valor de 14 mm. Estimándose como precipitación media anual 197 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero Cañón de La Calentura está integrado en la Región Hidrológica No. 1 Baja California, de la vertiente del Océano Pacífico. Los Principales Arroyos que drenan en la Cuenca, se originan en la Sierra Warner principalmente en los Cerros Los Cochis y Los Encinos, a una elevación de 1220 msnm, siguiendo un curso Noreste-Suroeste, la forma alargada que presenta esta serranía permite que el recorrido de los afluentes sea corto y con gradientes fuertes.

Los escurrimientos de mayor importancia son Arroyo Los Cochis, Cañón San Antonio del Mar y El Abra. Todos estos arroyos de carácter intermitente concurren al dren principal denominado Arroyo El Salado o Cañón de La Calentura, cruzando toda el área desembocando en el Océano Pacífico, con un recorrido desde su origen al punto de descarga de 73 km.

3.4 Geomorfología

El acuífero Cañón La Calentura, por sus rasgos estructurales adquiere diferentes geoformas; dentro del mismo acuífero está integrado un almacenamiento de agua subterránea clasificado como acuífero costero, denominado como Valle Playas San Antonio del Mar, con elevaciones del orden de 0 a 20 msnm. El tipo de drenaje que se observa a lo largo del acuífero va de subdendrítico a paralelo aguas arriba, mientras que en la zona cercana a la costa el drenaje que se observa es de tipo dendrítico muy marcado.

4. GEOLOGÍA

El acuífero se constituye principalmente por rocas sedimentarias, volcánicas, metamórficas del tipo gneis y esquistos, dentro del acuífero está presente la formación

Alisitos de origen sedimentario, sobresalen por la extensión de sus afloramientos las rocas intrusivas de composición ácida (tonalita), en menor proporción están las rocas ígneas como basalto y andesita-basáltica, riolita y dacita (figura 2).

Los depósitos aluviales y fluviales producto de la desintegración de las rocas ígneas y sedimentarias que rodean el cauce, están constituidos principalmente por gravas arenas y limos, son éstos depósitos los que tienen características de porosidad y permeabilidad suficientes para formar el acuífero.

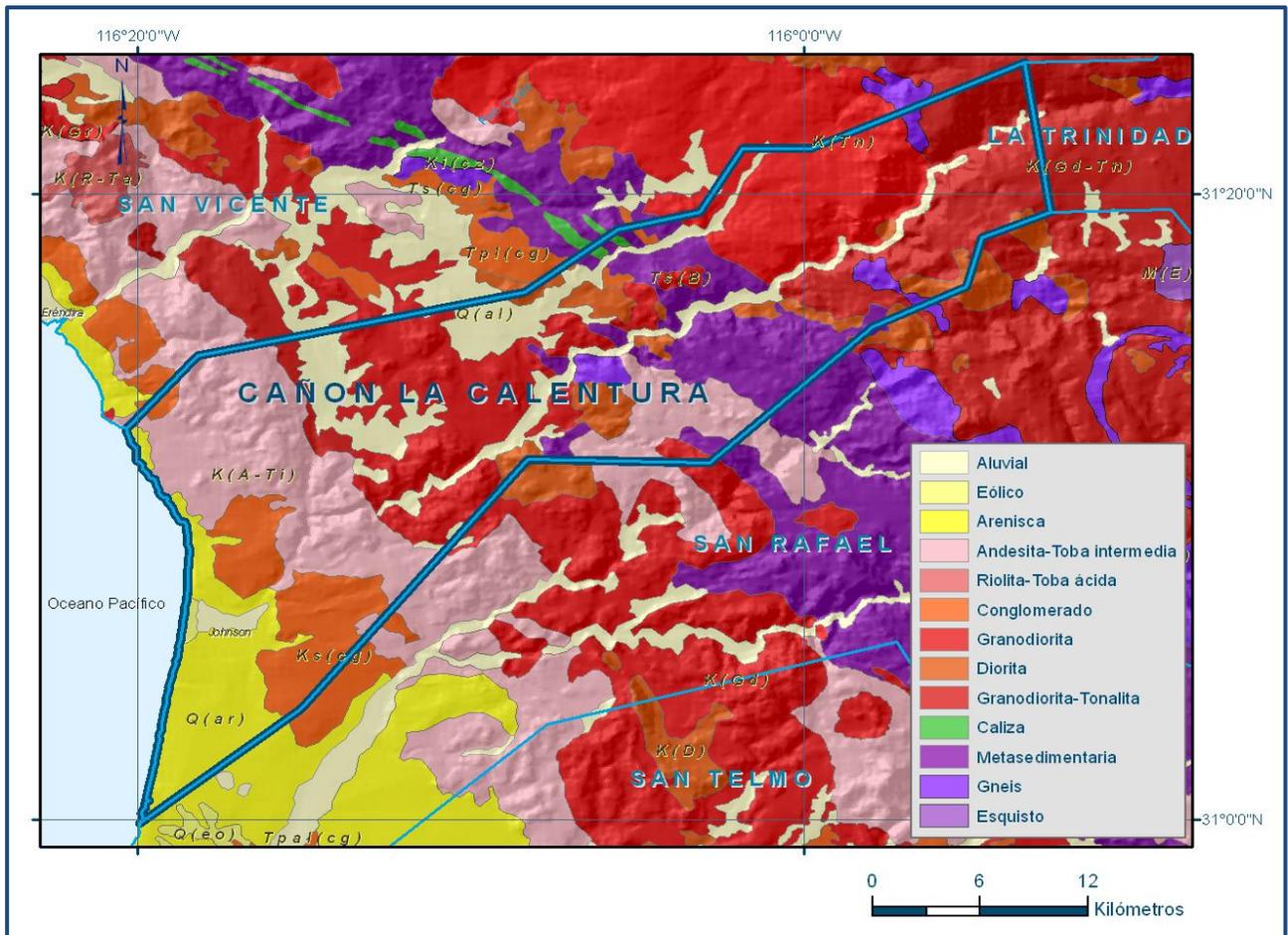


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Formación Alisitos (Kas): en esta área la secuencia consta de cuatro miembros, de abajo hacia arriba:

Tobas en capas delgadas con Sills de diorita.

Calizas y Areniscas

Rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición intermedia.

El miembro superior consiste de calizas biógenas que hacia la cima se interdigitan con rocas volcánicas intermedias. Consiste en rocas calcáreas y derrames de composición riolítica que se encuentran interestratificadas.

Las calizas se presentan en estratos masivos a delgados, predominando en estos últimos, de color gris oscuro a claro, con lentes de limolita calcárea y algo de arcillas. La caliza está silicificada y algo metamorfoseada. Su fracturamiento es intenso y en algunas áreas tiene aspecto lajoso. La unidad calcárea está interestratificada también con tobas líticas de composición ácida. En las áreas cercanas al cuerpo intrusivo presenta aureola de metamorfismo.

En los alrededores del Arroyo de Santo Domingo y hacia el norte y sur del área, se encuentra una secuencia metasedimentaria formada por pizarras, esquisto, meta arenisca, meta conglomerado, calizas y escaso mármol, afectada por diques andesíticos o fuertemente plegada. Estas unidades han sido correlacionadas con la Formación Alisitos (Gastil, 1975), pero teniendo en cuenta sus características litológicas y estructurales, podrían ser más antiguas.

Formación Rosario (Kr): formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino. Esta formación se presenta poco consolidada y con tectonismo poco marcado, se le encuentra descansando en discordancia angular a la formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico), y cuyo límite oriental es la denominada línea "Santillana Barrera", que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos. Tiene un espesor aproximado de 750 m situado en el Maestrichtiano. Sus principales afloramientos se localizan sobre la costa del Pacífico.

Formación Rosarito Beach (Mi). Está constituida por intercalaciones de basaltos, tobas y brechas, aflora en las subcuencas de Rosarito y Tijuana, además se constituye por cinco miembros de la base (más antiguos) a la cima (recientes), corresponden a depósitos sedimentarios y volcánicos.

Base: predominan sedimentos de plataforma con intercalaciones delgadas de derrames basálticos con horizontes de toba.

Cima: compuesto principalmente por derrames de lava con intercalaciones de arenisca, toba y limonita.

Hiato: persistió hasta el Plioceno, dando lugar a depósitos de cuenca aislados. Los cuales forman dos unidades pertenecientes a la Formación San Diego, constituida por dos miembros.

Miembro Inferior: formado por areniscas de finas a medias, con lentes de conglomerado, presenta una coloración amarillenta.

Miembro Superior: constituido por areniscas medias con intercalaciones de conglomerado, estos últimos de forma marcada y hacia la cima se presentan de forma más gruesa.

Formación San Diego (Plc): Suprayace a la Formación Rosarito Beach y en discordancia a la formación Lindavista, está formada por conglomerados y con intercalaciones de arenisca de matriz café a rojiza, presenta además sedimentos fluviales depositados en los lechos de los ríos, coluviales; estos asociados a pendientes fuertes y aluviones debido a movimientos de ladera.

Sierra Las Pintas (KsD): Rocas volcánicas que pertenecen a dos probables períodos de vulcanismo; el primero genero andesitas y dacitas andesíticas que aflora en la porción centro-norte, la edad varía entre 7.6 a 9.5 \pm 1.0 Ma (Gastil, 1975), estas rocas se encuentran afectadas por pequeños cuerpos intrusivos hipabisales de tipo porfídico y de composición andesítica y riódacítica. El segundo período de vulcanismo generó derrames de tobas riolíticas y riolitas y andesíticas afloran en la misma porción que las rocas volcánicas anteriores.

Las rocas volcánicas descritas, pertenecen a la secuencia volcánica Sierra Las Pintas con espesor de más de 1500 m, sobreyacen a rocas metamórficas paleozoica y granítica cretácicas (Leie-Hangel-Hardt, 1993).

Además, presentan discordancias internas y bloques basculados que sugieren que este 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.

Aluvión (Qal): depósitos cuaternarios fluviales y aluviales que afloran y conforman el relleno a lo largo de los cauces. Desde el punto de vista geohidrológico, estos depósitos son de gran importancia, ya que son capaces de proporcionar volúmenes considerables de agua subterránea, susceptibles de ser aprovechados. Existe también la presencia de depósitos marinos, los cuales se observan formando terrazas costeras, constituidas de arenas de grano fino a muy fino con alto contenido de cuarzo, en la parte media del acuífero.

4.2 Geología estructural

En la parte baja del área de explotación, correspondiente al Ejido Eréndira se observan pequeñas fallas normales sobre las areniscas y conglomerados con orientación NW-SE y NE-SW preferencialmente.

Los rasgos morfológicos que genera la deformación producida por las fallas son muy visibles en la zona que le corresponde al acuífero de La Calentura ya que corta las Sierras generando Cañones (Cañón La Calentura), cañadas y valles con orientación NW-SE, formando facetas triangulares y valles en escalón.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la interpretación geológica y las características de las unidades litológicas que conforman el acuífero Cañón La Calentura, es posible definir tres unidades hidrogeológicas, clasificadas de acuerdo a la permeabilidad de cada una de las formaciones que constituyen el sistema acuífero, las unidades que se determinaron son las siguientes:

Unidad impermeable: en esta unidad quedan agrupadas todas las formaciones geológicas constituidas por rocas ígneas extrusivas y metamórficas, así como dacitas y riodacitas, del mismo modo se encuentran aflorando rocas ígneas intrusivas como tonalitas, granodioritas y gabro.

Unidad semipermeable: la integran depósitos sedimentarios, conglomerados poco consolidados del Cretácico, calizas de la formación Alisitos así como restos de rocas ígneas extrusivas representadas por basaltos del Paleógeno-Neógeno, de acuerdo a su distribución y localización es de poca importancia en cuanto al funcionamiento acuífero participando como canales hidráulicos de conducción del agua originada durante los ciclos de lluvia y así conducirla hasta los depósitos permeables.

Unidad permeable: está constituida por depósitos aluviales, fluviales y depósitos recientes, constituidos por arenas, gravas, gravillas, arcilla, areniscas, conglomerados y boleas; estos localizados en la zona de mayor energía, así como depósitos eólicos de playa.

El origen de estos depósitos fue a través del intemperismo y erosión de rocas pre-existentes, transportadas hacia las partes más bajas o bien por meteorización in-situ, como se observa en el Llano Colorado y Mesa de San Antonio en esta zona se encuentra la mayoría de los aprovechamientos, dentro de esta Unidad Hidrológica se aloja el acuífero Cañón La Calentura siendo este el de mayor rendimiento hidráulico.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero presenta un acomodo local de la capa de materiales granulares, dando lugar a un acuífero **libre**, ya que esta capa de sedimentos constituyen la unidad con mayor potencial geohidrológico; estos materiales sobreyacen a las rocas ígneas que constituyen el basamento y fronteras laterales del área la cual se encuentra delimitada por barrancos que forman pequeños valles montañosos, profundos y estrechos, equivalentes a cañones o valles en forma de V, con pendientes verticales empinadas.

En la línea litoral se observa un drenaje superficial que está canalizado por el barranco en la parte central de la propiedad hacia el cual fluyen las aguas pluviales de las laderas situadas al norte y al sur.

5.2 Parámetros hidráulicos

No se han realizado pruebas de bombeo en los aprovechamientos de la región. Sin embargo, de acuerdo con estimaciones hidrogeológicas hechas en 1979, los valores de transmisividad van de **0.29×10^{-3} a $1.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , teniendo como promedio un valor de $0.80 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Se reporta además un coeficiente de almacenamiento promedio de **0.021**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento del acuífero se cuenta con información correspondiente a los años 1999 y 2008.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo a la configuración realizada con los datos obtenidos para el estudio para los años de análisis 1999 y 2008 se observa que la profundidad varía entre 5 y 45 m, localizándose las mayores profundidades en la porción noreste del acuífero, observándose así una variación gradual del nivel piezométrico hacia las zonas con menor pendiente topográfica (figura 3).

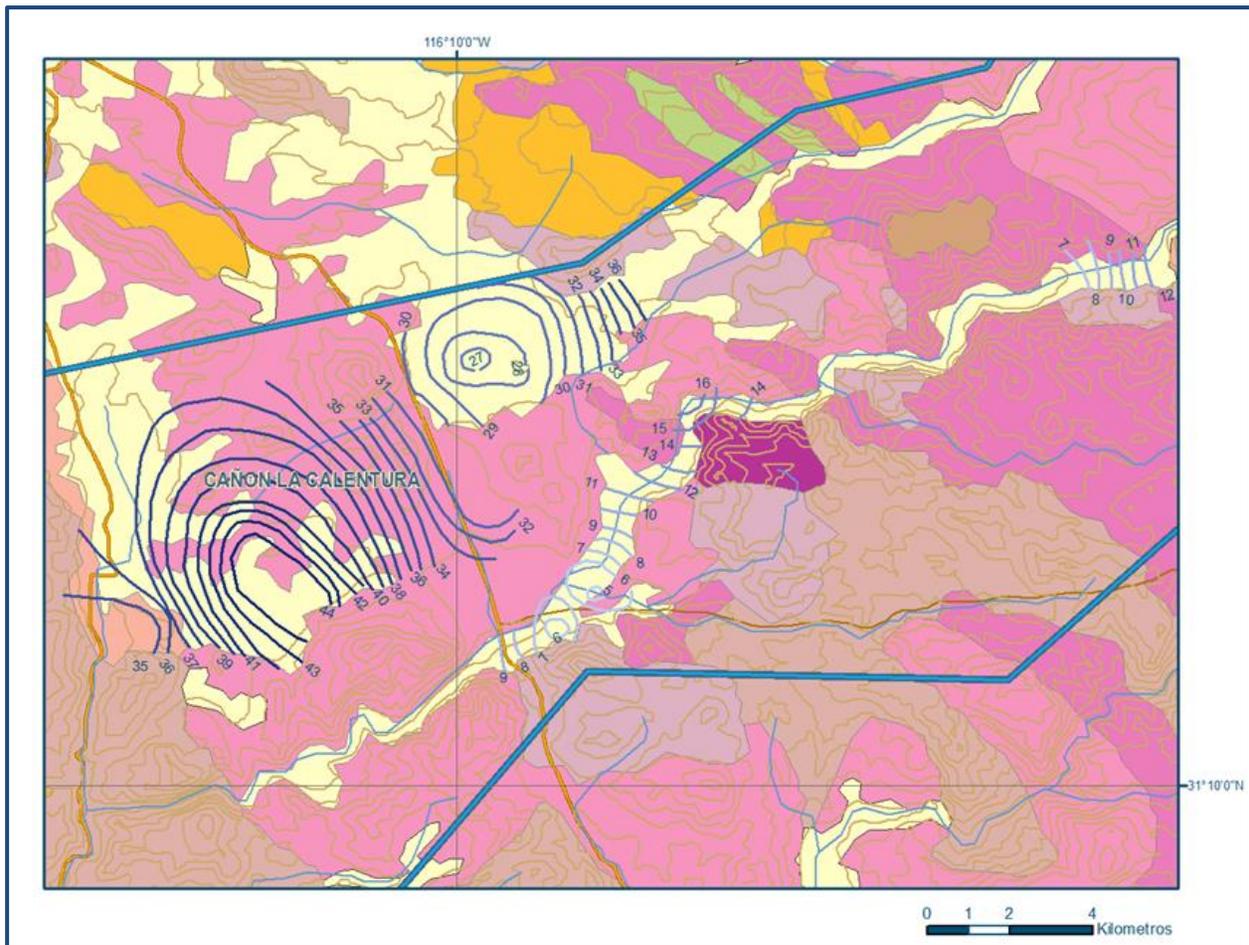


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2008)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración para el análisis en cuanto a la elevación del nivel estático (figura 4), indica que hay una variación en el nivel del agua de 28 y 3 msnm, observándose en la porción centro occidental así como en la parte que corresponde a Llano Colorado las mayores elevaciones y un descenso gradual hacia la parte de la costa con valores de 6 msnm, esto al suroeste del Cañón La Calentura.

Estableciendo así que la dirección del agua subterránea va desde las partes más altas localizadas al este en el Cerro Los Cochis y El Cañón La Calentura hacia la parte de la costa. Por lo que se considera que hay una pequeña descarga de agua subterránea hacia el mar.

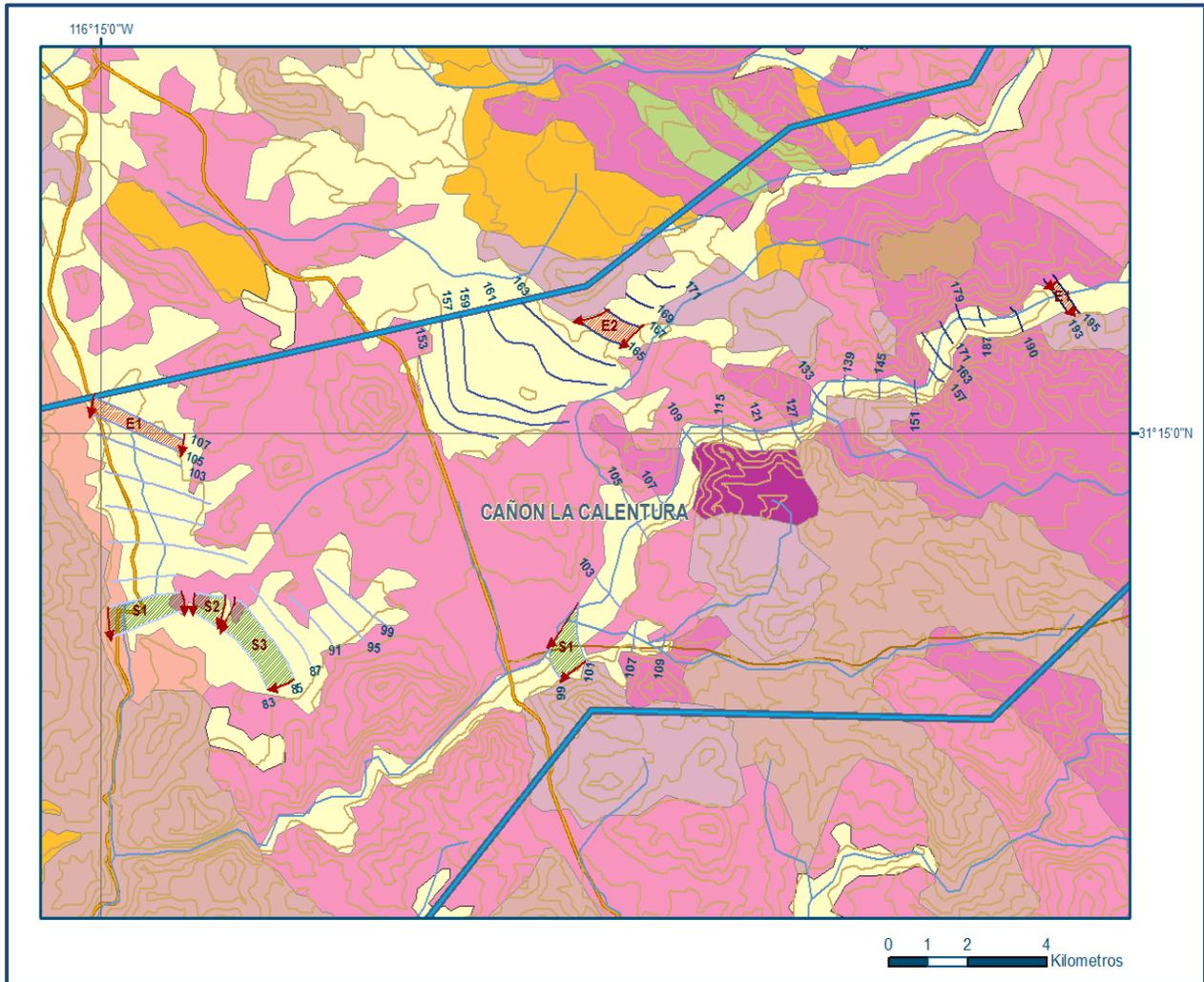


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

5.4.3 Evolución del nivel estático

De acuerdo con los estudios realizados la evolución del nivel estático para el periodo octubre de 1999 a noviembre 2008. Existe un incremento en la elevación del nivel del agua, en las zonas cercanas a la porción central y noreste, los incrementos son de 0.93 m en la parte centro oriental del Valle se presentan algunos decrementos, estos últimos coinciden con el área de mayor explotación.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

De acuerdo con la información de los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua, que se realizaron como parte de los trabajos del estudio realizado en 1979, se determina que las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 774 a 2406 ppm.

El catión más abundante es el sodio con valores que van de 110 a 442 ppm y un promedio de 181 ppm; aparece también el calcio que va de 40 a 232 ppm con un promedio de 122 ppm. El anión más común es el cloruro con valores de 248 a 838 ppm., con un promedio de 380 ppm.; bicarbonato que va de 98 a 390 ppm. El agua del acuífero es de tipo sódico-clorurada o mixto-clorurada, lo que indica que ha tenido contacto con formaciones de origen marino, disolviendo los minerales que contienen las rocas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

No fue posible realizar una estimación de los volúmenes de extracción por bombeo, por lo que se considera el valor del volumen registrado e inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). De acuerdo con esto, existen 75 aprovechamientos que en conjunto extraen un volumen anual de 10,135,120 m³. De ellos, 10,097,926 m³ (99.6%) se destinan a las actividades agrícolas y el resto para satisfacer las necesidades del uso doméstico. Sin embargo y de acuerdo con recorridos de campo se considera que el valor del bombeo es de 6.59 hm³/año.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo de 1999 a 2008, considerando dos áreas de balance, el área de explotación 1 comprende una superficie de 63 Km² y el área de explotación 2 de 18 Km², que corresponden a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. 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 masa se expresa como:

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

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 una unidad hidrogeológica:

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

7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso solo se considera recarga inducida por retornos de riego para la zona de explotación 2, para el resto del área de balance se considera que no existe.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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

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

Donde:

R_v : Recarga vertical

E_h : Entradas por flujo horizontal

B : Bombeo

S_h : Salidas por flujo horizontal

ETR : Evapotranspiración real

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Recarga inducida (Ri)

Esta componente se calculó de acuerdo con la superficie regable que tiene el área de explotación 2 dentro del acuífero Cañón-La Calentura para el periodo 1999 a 2008, los volúmenes que se destinan al riego por año agrícola fueron estimados de acuerdo al área considerada como agrícola, tomando en cuenta los sistemas de riego empleados, tipo de cultivo y lámina de riego, con este volumen y de acuerdo con el total del área, se definió un coeficiente de infiltración por retorno de riego del 8 y 10 %. Considerando que los principales cultivos son la vid y hortalizas. El volumen anual considerado como retorno de riego es de **0.25 hm³**.

Tabla 2. Cálculo de retorno por riego en el área de explotación 2

AREA TOTAL Ha	205.4867							
FRUTO	REQUERIMIENTO DE RIEGO m	% ÁREA	ÁREA Ha	ÁREA m ²	VOLUMEN m ³	VOLUMEN hm ³	8.0%	10.0%
VID	1.3	0.7	144	1,438,407.33	1,872,000	1.872		
SANDIA	1.49	0.3	61	616,460.29	908,900	0.9089		
						2.7809	0.22	0.28

7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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 1999 y 2008 (figura 4).

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

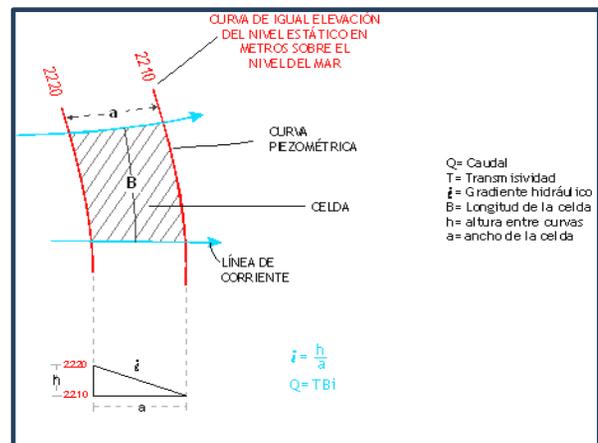


Tabla 3. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo.

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (10^3 m)	i	Q1 (m^3/s)	Vol ₁ anual (hm^3)
ENTRADAS HORIZONTALES ÁREA DE EXPLOTACIÓN 1 (1999)					
E ₁	11.806	0.907	0.00350	0.0401	1.265
E ₂	5.556	1.675	0.00650	0.0605	1.909
ENTRADAS HORIZONTALES ÁREA DE EXPLOTACIÓN 1 (2008)					
E ₁	11.806	0.975	0.00332	0.0382	1.205
E ₂	5.556	2.195	0.00582	0.0710	2.239

Tabla 4. Estimación del volumen de entrada por flujo subterráneo. Área de explotación 2.

Celda	T ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)	B (10^3 m)	i	Q1 (m^3/s)	Vol ₁ anual (hm^3)
ENTRADAS HORIZONTALES ÁREA DE EXPLOTACIÓN 2 (1999)					
E ₁	16.667	0.885	0.00608	0.0896	2.827
ENTRADAS HORIZONTALES ÁREA DE EXPLOTACIÓN 2 (2008)					
E ₁	8.333	0.895	0.01685	0.1257	3.964

Para el periodo de 1999-2008, el volumen promedio anual de entradas para el área de explotación 1 es de **3.31 hm^3** y para el área de explotación 2 es de **3.40 hm^3** .

7.2 Salidas

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

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) son parámetros utilizados para estimar la recarga potencial por infiltración. Esta componente se evaluó solo para el área de explotación 2

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

$$ETR (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	17.8		
P(mm) =	197	P ² =	38809
L =	1026.9876	L ² =	1054703.53
ETR (mm)	203.5		

Sin embargo, debido a que el valor de la precipitación media anual es muy bajo (197 mm), no se pueden aplicar los métodos empíricos para la estimación de ETR, como los métodos de Turc o el de Smith, ya que en ambos métodos para considerar confiable la estimación del volumen de evapotranspiración, deben presentarse precipitaciones mayores a 320 y 300 mm, respectivamente, dependiendo del valor de la temperatura promedio anual. Debido a que la precipitación resultó menor que la relación $0.31L$, 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 ausencia 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 5.

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 (**1 905.7 mm** para **1999** y **1 819.6 mm** para **2008** CONAGUA Organismo de Cuenca Baja California).

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.

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 evaporado, para el año **1999 de 0.37 hm³** y para **2008 un volumen de 0.01 hm³**. En la tabla 5 se muestran los porcentajes respecto al volumen evaporado para las profundidades de 100, 200 y 300 cm. El volumen por evapotranspiración (ETR) es de **0.19 hm³/año**.

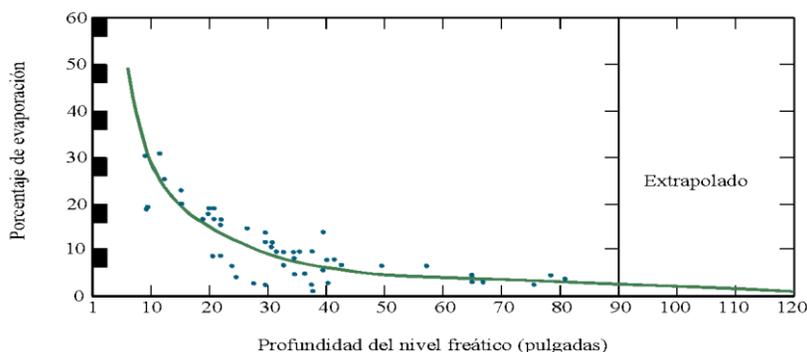


Figura 5. Evaporación del agua freática en función de la profundidad al nivel estático.

Tabla 5. Volumen de evapotranspiración

Profundidad media al nivel estático (cm)	% de evaporación (estimado gráfica de White)	Lámina Evaporada en el acuífero (mm/año)	Lámina Evaporada en el acuífero de acuerdo a la profundidad (mm/día)	Área (Km ²)	Volumen evapotranspiración (hm ³ /año)	Total Volumen Evapotraspirado (hm ³ /año)
ÁREA DE EXPLOTACIÓN 2 1999						
100	6.25	1,950.7	0.33	0.2	0.03	
200	3.75	1,950.7	0.20	3.59	0.26	
300	0.92	1,950.7	0.05	5.09	0.09	
						0.37
ÁREA DE EXPLOTACIÓN 2 2008						
100	6.25	1,819.6	0.31	0.1	0.01	
200	3.75	1,819.6	0.19	0.0	0.0	
300	0.92	1,819.6	0.05	0.0	0.0	
						0.01

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **6.59 hm³/año**.

7.2.3 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 presentada en la figura 5. El valor estimado es de **2.39 hm³** para el área de explotación 1 y **3.31 hm³** para el área de explotación 2 (tablas 6 y 7).

Tabla 6. Estimación del volumen de salidas por flujo subterráneo 1999 Área de explotación 1

Celda	T (10 ⁻³ m ² /s)	B (10 ³ m)	i (m/m)	Q1 (m ³ /s)	Vol ₁ anual (hm ³)
SALIDAS HORIZONTALES ÁREA DE EXPLOTACIÓN 1 (1981)					
S ₁	3.472	1.050	0.0089	0.0323	1.019
S ₂	4.167	2.535	0.00483	0.0510	1.610
SALIDAS HORIZONTALES ÁREA DE EXPLOTACIÓN 1 (2008)					
S ₁	4.861	1.695	0.0035	0.0288	0.909
S ₂	4.861	0.685	0.00346	0.0115	0.363
S ₃	4.861	2.020	0.00286	0.0281	0.887

Tabla 7. Estimación del volumen de salidas por flujo subterráneo 1999 Área de explotación 2

Celda	T (10 ⁻³ m ² /s)	B (10 ³ m)	i (m/m)	Q1 (m ³ /s)	Vol ₁ anual (hm ³)
SALIDAS HORIZONTALES ÁREA DE EXPLOTACIÓN 1 (1981)					
S ₁	15.278	1.435	0.0064	0.1393	4.394
SALIDAS HORIZONTALES ÁREA DE EXPLOTACIÓN 1 (2008)					
S ₁	15.278	1.565	0.0030	0.0710	2.238

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cambio de almacenamiento se estimó a partir de la evolución de las elevaciones de los niveles estáticos del periodo 1999–2008.

Para esta determinación se utilizaron las configuraciones de las elevaciones de los niveles estáticos, realizadas para los años mencionados, obteniendo de acuerdo a estas un cambio en el volumen almacenado (ΔV) de -34.73 hm^3 para el área de explotación 1 y para el área de explotación 2 de -17.65 hm^3 , considerando un coeficiente almacenamiento (S_y) de 0.05, el promedio es de **$-1.74 \text{ hm}^3/\text{año}$** para el área 1 mientras que el área 2 presenta un promedio de **$-0.88 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

Solución a 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:

$$\mathbf{Rv = Sh + B + ETR \pm \Delta V(S) - Eh \quad (2)}$$

Área de explotación 1

$$\begin{aligned} Rv &= 2.39+3.62+0.00-1.74-3.31 \\ Rv &= 0.96 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Área de explotación 2

$$\begin{aligned} Rv &= 3.31+2.97+0.19-0.88-3.40 \\ Rv &= 2.19 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Incluyendo los datos para las dos áreas, tenemos:

$$\begin{aligned} \mathbf{Rv} &= \mathbf{5.7+6.59+0.19-2.62-6.71} \\ \mathbf{Rv} &= \mathbf{3.15 \text{ hm}^3/\text{año}} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{Rv + Eh} \\ R &= 3.15 + 6.71 \\ \mathbf{R} &= \mathbf{9.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}} \end{aligned}$$

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 **9.9 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNCOM)

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.

La descarga natural comprometida se considera como un porcentaje de las salidas por flujo subterráneo horizontal el cual se estimó en un 10% este porcentaje se considera porque la zona no presenta un entorno ecológico el cual requiera de este recurso para sostenerse o bien mantenerse en equilibrio.

Además de que el acuífero se encuentra afectado naturalmente por intrusión marina, por lo que se propone controlar el bombeo dentro de la zona cercana a la costa manteniendo los niveles de agua dulce por arriba del nivel del mar para no incrementar la entrada de agua de mar hacia el área de explotación.

Por lo tanto, se considera un volumen de **DNC = 0.6 hm³ anuales**.

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 **15,944,887 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 de aguas Subterráneas (DAS)

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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 9.9 - 0.6 - 15.944887 \\ \text{DMA} &= -6.644887 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **6,644,887 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA