

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO AGUA CALIENTE (2657), ESTADO DE
SONORA**

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.....	7
4 GEOLOGÍA.....	7
4.1 Estratigrafía	9
4.2 Geología estructural	12
4.3 Geología del subsuelo.....	12
5 HIDROGEOLOGÍA	13
5.1 Tipo de Acuífero	13
5.2 Parámetros hidráulicos	14
5.3 Piezometría.....	14
5.4 Comportamiento hidráulico.....	14
5.4.1 Profundidad al nivel estático	15
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	16
5.5 Hidrogeoquímica y Calidad del Agua	17
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	18
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	18
7.1 Entradas.....	19
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	20
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	20
7.2 Salidas	22
7.2.1 Evapotranspiración (ETR)	23
7.2.2 Bombeo (B)	24
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.3 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)	24
8 DISPONIBILIDAD	25
8.1 Recarga total media anual (R)	26
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	26
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	26
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	26
9 BIBLIOGRAFÍA	28

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.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa).

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El Acuífero Agua Caliente, definido con la clave 2657 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza al sur del Estado de Sonora (Figura 1), aproximadamente a 50 km al norte de Ciudad Obregón. El área del acuífero abarca una superficie de 1785 km², entre las coordenadas 27° 49' a 28° 25' de latitud norte y 109° 52' a 110° 23' de longitud oeste. El 36% del área pertenece al municipio de Cajeme, 34% al municipio de Guaymas y finalmente 30% queda dentro del municipio de BÁCUM.

Colinda al norte y oeste con el Acuífero Valle de Guaymas, al noreste con Río Tecoripa, al sureste con Cumuripa y al sur con el Acuífero Valle del Yaqui, todos ellos del estado de Sonora. El Acuífero Agua Caliente pertenece a la Cuenca del Yaqui.



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 que delimita al acuífero

ACUIFERO 2657 AGUA CALIENTE						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	110	6	418	28	18	30.3
2	110	6	412	28	16	26.3
3	110	2	39.2	28	9	25.8
4	109	55	35.3	28	4	54.5
5	109	52	5.6	27	57	312
6	109	54	20.2	27	49	15
7	110	3	23.6	27	53	50.0
8	110	3	47.6	27	56	4.7
9	110	6	26.0	27	57	6.3
10	110	10	2.7	27	55	7.0
11	110	13	10.2	27	55	59.9
12	110	15	2.4	27	49	54.0
13	110	19	26.4	27	59	38.8
14	110	18	42.0	28	3	312
15	110	23	13.0	28	9	38.6
16	110	21	52.7	28	19	14.3
17	110	10	47.3	28	24	2.6
1	110	6	418	28	18	30.3

1.2 Situación Administrativa del Acuífero

El Acuífero Agua Caliente pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. La mayor parte de su territorio, se encuentra regido por el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de septiembre de 1978. Esta veda se clasifica como tipo III la cual indica 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 3.

Aunque el volumen de extracción es incipiente, el uso principal del agua es el agrícola. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

No existen estudios de evaluación geohidrológica realizados en la superficie que cubre el acuífero, ni en la región, ya que se trata de acuíferos intermontanos en los que la extracción del agua subterránea es incipiente y donde no existe competencia por su uso. Los únicos realizados son con fines de exploración minera.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA, realizado por el Servicio Geológico Mexicano, en convenio con Comisión Nacional del Agua, 2008.

Este estudio realiza una evaluación preliminar de algunos acuíferos serranos del estado de Sonora, entre ellos Villa Hidalgo, incluyendo actividades de campo para el planteamiento del balance de aguas subterráneas: censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y pruebas de bombeo.

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

El acuífero Agua Caliente queda circunscrito fisiográficamente dentro de dos provincias; en la Provincia Llanura Sonorense y Sierra Madre Occidental (Edwin Raisz, 1964), en la primera destacan dos subprovincias: Sierra Compleja con Lomeríos, ubicada al sur, sureste y extremo noreste del acuífero, y Bajada con Lomeríos, cubriendo toda la zona de planicie, en la cual se ubican los aprovechamientos que actualmente extraen agua del acuífero. Dentro de la Provincia Sierra Madre Occidental se ubica la subprovincia Sierras y Valles del Norte, misma que tiene las siguientes características: Bajada con Lomeríos en la zona centro oriental del acuífero y Valle Abierto de Montaña, ubicada al oriente del acuífero.

3.2 Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), para las condiciones de la República Mexicana, en la zona se presentan cinco tipos de climas:

1) *Árido, Cálido* ($BSo(h')(x')$), con temperatura media anual mayor a 22° C, temperatura del mes más frío mayor a 18° C, lluvias repartidas todo el año con porcentaje de lluvia invernal mayor a 18%. Se ubica en prácticamente toda la zona acuífera, con excepción de los extremos sur y sureste.

2) *Árido, Semicálido* ($BSo(h'')w$), con temperatura media anual mayor de 20° C, temperatura del mes más frío mayor de 18° C, lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

3) *Muy árido, cálido* ($BW(h')w$), con temperatura media anual mayor de 22° C, temperatura del mes más frío mayor a 18° C, lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Se localiza en los extremos sur y sureste del acuífero.

4) *Semiárido, Semicálido* ($BS1h(x')$), con temperatura media anual superior a los 25° C, temperatura del mes más frío es mayor 21° C. Con lluvias en verano, con porcentaje de lluvia invernal mayor a 20%. Su ubicación es al norte de la zona, fuera de los límites del acuífero.

5) *Árido, Cálido* ($Bso (H')$), con temperatura media anual superior a los 25° C, temperatura del mes más frío es mayor 22° C. Con lluvias en verano, con porcentaje de lluvia invernal mayor a 10%. Se ubica en el extremo sur del acuífero.

El análisis climatológico del acuífero se efectuó con la información de tres estaciones que tienen influencia en la zona del acuífero, mediante el método de polígonos de Thiessen. Se trata de las estaciones Álvaro Obregón, localizada cerca de la cortina de la presa del mismo nombre, la estación Suaqui Grande, localizada al norte del acuífero y por último la estación La Misa, ubicada al oeste.

La temperatura media anual para el acuífero es de 24.8° C, la precipitación media anual para la zona es de 442 mm/año y el valor de evaporación potencial para la zona de acuerdo con datos obtenidos de las estaciones es de 2573 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra en la Región Hidrológica 9 Sonora Sur (RH-9). Esta región se caracteriza por tener un relieve con fuertes contrastes altimétricos, la mayoría de sus corrientes nacen en la Sierra Madre Occidental.

Se encuentra dentro de la Subregión Hidrológica Río Yaqui, en la Cuenca del Río Yaqui, Subcuenca Agua Caliente. La corriente principal que cruza por la zona es el Río Agua Caliente, que es una corriente intermitente que descarga sus aguas en la Presa Álvaro Obregón, localizada al sureste de la zona.

La infraestructura hidráulica de este acuífero consiste principalmente de obras de captación de agua subterránea, preferentemente pozos y en menor proporción norias, así como un manantial. Las norias y pozos se utilizan principalmente en uso pecuario y doméstico.

Aunque parte de la Presa Álvaro Obregón se encuentra en el extremo sureste del acuífero, sus aguas son vertidas fuera de él, para ser aprovechadas por los distritos de riego No. 18 “Vicam” y No. 41 “Río Yaqui”, ubicados hacia la costa del Estado de Sonora.

3.4 Geomorfología

La topografía de la zona está representada principalmente por sierras en forma de mesetas, como es el caso de la Sierra Bacatete, que forma el límite superficial del acuífero en la parte oeste de la zona. Hacia el este se caracteriza por tener una serie de cerros aislados, mientras que hacia el centro del acuífero se localiza el valle Agua Caliente, de forma alargada con dirección preferente noreste - sureste.

Las mayores elevaciones se localizan en la Sierra Bacatete con valores entre 600 a 800 msnm. Esta sierra se caracteriza por formar una serie de mesetas de composición basáltica. Hacia el oriente del acuífero los cerros tienen menor elevación, alcanzando un máximo de 600 msnm.

Se observan una serie de sierras localizadas al oriente del acuífero, formadas por andesitas de la Formación Tarahumara, caracterizada por pendientes poco pronunciadas que originan barrancos cuya profundidad varía de 10 a 30 m.

Otras sierras de composición ácida tienen forma alargada, caracterizadas por pendientes más abruptas y barrancos de mayor profundidad que sobrepasan los 50 m. En la zona se observa drenaje dendrítico típico de conglomerados característicos de la Formación Báucarit, ya que ésta tiene una amplia distribución dentro y fuera de la zona.

4 GEOLOGÍA

En el Acuífero Agua Caliente afloran unidades litoestratigráficas que varían en edad del Triásico al Reciente y están representadas por rocas ígneas intrusivas, volcánicas y rocas sedimentarias cuya distribución se observa en la Figura 2.

Las rocas intrusivas cubren gran parte de la zona central del acuífero, su composición varía de granito a granodiorita con una edad del Triásico al Paleoceno. La Formación Báucarit tiene una amplia distribución en el sureste, esta formación agrupa varios tipos de litología: conglomerado polimíctico constituido por rocas volcánicas e intrusivas con intercalaciones de arenisca y basalto.

Las rocas volcánicas (Formación Lista Blanca) están constituidas por una secuencia intercalada de tobas riolíticas, ignimbritas, dacitas, riolitas y aglomerados de depósito vulcanosedimentario, a éstas se les asignó una edad del Mioceno Superior. Las rocas del Pleistoceno están representadas por un conglomerado polimíctico que se encuentra formando valles así como piedemonte. Este conglomerado está constituido por riolita, andesita e ignimbritas, es poco consolidado y de matriz arenosa.

El aluvión del Holoceno está constituido por grava, arena, limo y arcilla sin consolidar, los espesores de éste son variables, pudiendo llegar hasta los 50 m, se encuentra en las zonas topográficamente bajas y cubriendo a las unidades más antiguas.

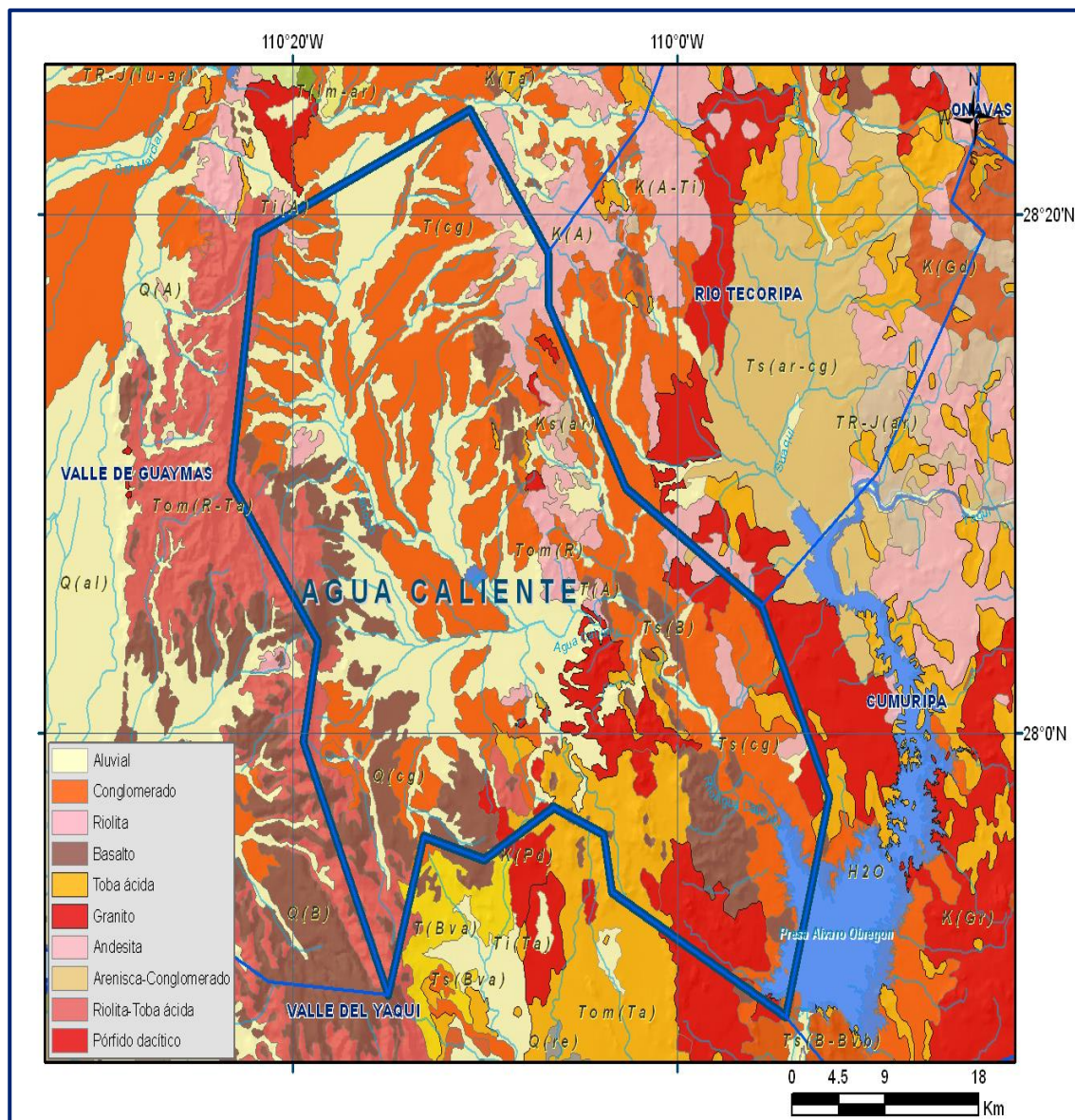


Figura 2. Mapa Geológico

4.1 Estratigrafía

La descripción de las unidades litológicas que se encuentran expuestas en la zona fue realizada por el extinto Consejo de Recursos Minerales (ahora Servicio Geológico Mexicano) en su cartas Geológico Minera Tecoripa y Ciudad Obregón, escala 1:250,000, mismas que se retomaron para hacer la descripción de las unidades litológicas que comprenden la zona del acuífero y que se encuentran representadas en la columna estratigráfica de la zona.

MESOZOICO

Triásico

Areniscas-Lutitas (T_{RS} Ar-Lu). Esta unidad se conoce como Grupo Barranca, está formada por tres unidades distribuidas de la siguiente manera: en la base se encuentra la Formación Arrallanes, en la parte media la Formación Santa Clara y en la cima la Formación Coyotes. Litológicamente están compuestas por areniscas de cuarzo, limolitas y conglomerado con clastos de cuarcita y pedernal. La unidad tiende a presentarse en estratos delgados, cabe mencionar que no aflora dentro de los límites del acuífero, sin embargo se encuentra expuesta al norte y este de la poligonal.

Cretácico

Formación Tarahumara. Andesita-Toba Andesítica (Ks A-TA). Esta unidad fue descrita por Wilson y Rocha (1946), está constituida por rocas volcánicas de composición andesítica, dacítica y rocas volcanosedimentarias. Aflora en la porción norte del acuífero, en las inmediaciones de la comunidad Agua Caliente y Rancho El Realito, así como en el Cerro Picacho y al oeste del Rancho Peñasco Blanco. Fuera del área también existen afloramientos cerca del Rancho Torimacuca en la Sierra Chichiquelite, que se localiza al noreste del acuífero. El color de esta roca es gris y pardo, con tonalidades rojizas al intemperismo; su textura varía de afanítica a porfídica, cuando tiene esta última textura se pueden observar plagioclasas, hornblenda, piroxenos y biotita. Hidrogeológicamente se le considera con permeabilidad baja.

Batolito Laramide

Intrusivos Porfídicos Secundarios ($Kstpa$ GrGd, $ToPMz$, $ToPR$, $ToPA$, $To PRd$). El Batolito Laramide de Sonora, definido por Damon (1983), tiene una amplia distribución en la zona, aflora al sur del acuífero extendiéndose de forma alargada con una orientación preferente noroeste – sureste, de igual forma en la Sierra La Finalesa, localizada al este del acuífero, constituyendo uno de sus principales límites en superficie y a profundidad.

De igual manera se observa en las inmediaciones de los ranchos El Realito y Bonancita, donde se observa cubierto por rocas volcánicas y conglomerados más recientes.

Este batolito incluye intrusiones de cuerpos que se observan fuera de la poligonal del acuífero, aunque su litología varía un poco, fueron englobadas por el Consejo de Recursos Minerales (COREMI 1998).

De manera general este intrusivo es compacto con textura porfídica, es de color gris claro a crema y en superficie está muy intemperizado con coloración ocre. Esta unidad representa en el acuífero una barrera impermeable y es parte del basamento hidrogeológico.

Toba Riolítica – Dacita (To R-Da). Roca volcánica y piroclástica de composición ácida con dacitas en la cima. Esta unidad aflora en la parte sureste de la zona, se observa al poniente de la Presa Álvaro Obregón, sus afloramientos se extienden fuera de la poligonal que circunscribe al acuífero, incluye afloramientos de derrames y aglomerados volcánicos de composición andesítica–dacítica.

Andesita-Dacita (Tm A-Da, TmTR-B, TmB-A). Unidad volcánica del Oligoceno de composición intermedia-ácida, constituida por andesitas y dacitas de textura porfídica, rocas piroclásticas de una coloración que varía de gris claro a rojizo. La distribución en la zona es principalmente hacia el sur, en la Sierra La Ventana y al sur del Rancho La Escondida, localizado fuera del acuífero. Hidrogeológicamente esta unidad se considera con una permeabilidad media a baja debido al fracturamiento que presenta.

Formación Báucarit TmCgp-Ar, TmCgp-B, TmB-A. Definida por King en 1939, como una secuencia de areniscas, arcillas y conglomerados bien estratificados, ligeramente consolidados y en cuya parte inferior existen derrames de basalto intercalado con aglomerados basálticos.

El Consejo de Recursos Minerales agrupó dentro de esta formación a una secuencia de rocas volcánicas intermedias y básicas que están intercaladas con los conglomerados en su base y en la parte superior del conglomerado, también agrupa a un conglomerado polimíctico con clastos de basalto y andesitas basálticas. Aflora al sureste del acuífero, forma el pie de monte de las sierras La Finalesa y La Ventana, de igual forma constituye el embalse de la Presa Álvaro Obregón.

Fuera del acuífero se localiza al este, formando parte de la Sierra Agua Zarca, así como en las cercanías del Rancho Divisadero y el poblado Cumuripa. Dado su alto grado de compactación, a la unidad se le considera como basamento hidrogeológico de la parte granular del acuífero, frecuentemente crea condiciones de semiconfinamiento.

Formación Lista Blanca (TmTR-R). Definida por Dumble (1900), consiste de una secuencia volcánica y conglomerática. Actualmente la edad asignada a esta unidad es del Terciario (Bertollini et al 1991), ya que sobreyacen de manera concordante al conglomerado de la Formación Báucarit. Aflora en la parte central del acuífero formando la Sierra La Ventana y el Cerro Agua Caliente, de igual forma se observa al sur del acuífero formando la Sierra El Bacatete, misma que forma parte del límite oeste del acuífero. Debido a su fracturamiento se le asigna permeabilidad que varía de media a baja.

Toba Riolítica- Basalto (TmB, Tm TR-B). Se le conoce así a una serie de rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición basáltica y andesítica-basáltica que están intercaladas con tobas riolíticas e ignimbritas; afloran en la porción suroeste del acuífero, su textura es afanítica, los minerales que forman los basaltos son labradorita, olivino, vidrio, anfíboles y piroxenos; la andesita basáltica está intercalada con tobas riolíticas e ignimbritas, se encuentra sobreyaciendo a la unidad ToTR-R. Aflora al suroeste del acuífero, en la Sierra Bacatete y en el Cerro Mesa del Estapiate. Su textura es afanítica los minerales que forman los basaltos son labradorita, olivino, vidrio, anfíboles, piroxenos, la andesita basáltica está intercalada con tobas riolíticas e ignimbritas y se encuentra sobreyaciendo a la Formación Lista Blanca. Se considera de permeabilidad media y conforma parte de la zona de recarga.

Conglomerados Recientes Limos, Arenas y Gravas (Qpt-Cgp). Los conglomerados recientes están definidos por unidades conglomeráticas polimícticas mal consolidadas con escasos horizontes de limos y arenas, los clastos de los conglomerados están por lo general bien redondeados. Los conglomerados forman terrazas, depósitos de talud y pequeños abanicos aluviales.

En la zona estos conglomerados se encuentran ampliamente distribuidos, formando terrazas, depósitos de talud y pequeños abanicos aluviales, forma parte del Valle de Agua Caliente, siendo parte del acuífero en explotación, ya que algunos de los aprovechamientos se encuentran perforados en esta unidad. Debido a su litología se considera que tienen una permeabilidad alta, constituyendo zonas importantes de recarga al acuífero.

Limos arenas (Qho Im-ar). Unidad constituida por limos y arenas, su distribución en la zona es en el centro del Valle Agua Caliente, gran parte de los aprovechamientos se localizan en esta unidad.

Aluvión Cuaternario (Qhoal). Los sedimentos del Holoceno producidos por el intemperismo de las rocas preexistentes son depositados como abanicos aluviales y fluviales: se encuentran a lo largo de ríos, arroyos y planicies de inundación activas y están constituidas por gravas de diferentes litologías, arenas y limos. Aunque tienen una permeabilidad alta, su espesor es reducido. En esta unidad se localizan parte de los aprovechamientos hidráulicos que existen en el acuífero.

4.2 Geología estructural

La zona se caracteriza por presentar una sucesión de sierras altas y de escarpes pronunciados hacia el este principalmente. Estas sierras tienen un rumbo preferencial noroeste-sureste y se encuentran separadas por el Valle de Agua Caliente. Las sierras se ven afectadas por fallas con la misma orientación, originadas por los esfuerzos compresivos debido a la Orogenia Laramide y distensivos de origen más reciente que están relacionados con la apertura del Golfo de California.

La región presenta fallamiento normal con orientación noroeste-sureste, truncado por fracturas con orientación noreste-suroeste; este tipo de estructuras se puede observar en la parte este del acuífero. El rasgo más importante del que se tiene evidencia de la Orogenia Laramide es la presencia del batolito granítico que tiene una amplia distribución en la zona este del acuífero.

4.3 Geología del subsuelo

El acuífero que se explota actualmente se ubica en un medio granular conformado por sedimentos recientes, poco consolidados constituidos por conglomerados, gravas, arenas y arcillas que en gran parte del área sobreyacen a la Formación Báucarit.

El Valle Agua Caliente está enmarcado al oeste por La Sierra Bacatete, al este por una serie de montañas y sierras: La Ventana, La Finales y Agua Zarca. Los basaltos que se localizan al oeste del acuífero actúan como zona de la recarga, de igual forma la unidad compuesta por tobas y riolitas que se encuentran subyacidos por los basaltos. El conglomerado de la Formación Báucarit actúa como una capa confinante debido al grado de cementación y a su litología (Figura 3).

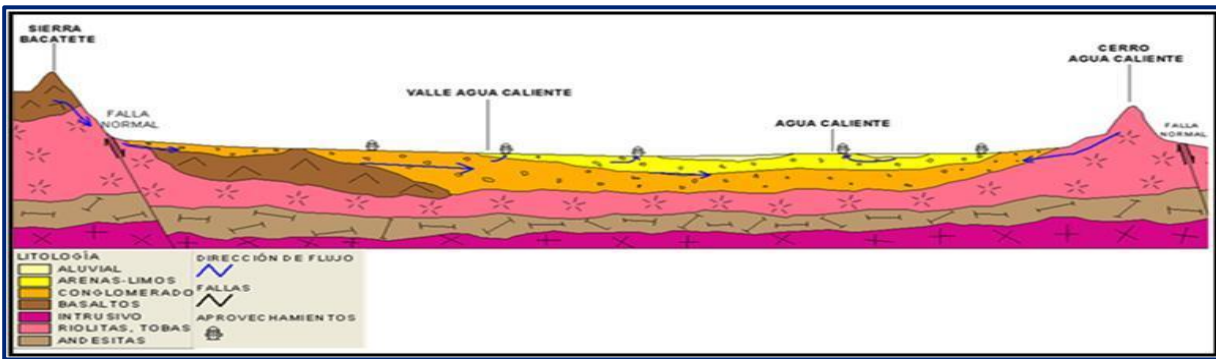


Figura 3. Sección Esquemática del Acuífero

El espesor de esta unidad es variable y en algunas partes es bastante considerable; esta unidad sobreyace a andesitas y basaltos que aunque presentan una densidad de fracturamiento alta, su permeabilidad es baja, ya que las fracturas se encuentran rellenas. El basamento geohidrológico es el Batolito Laramide.

Existen condiciones de confinamiento en la parte profunda del acuífero, o debido a que material de la Formación Baucarit confina material volcánico ácido (Formación Lista Blanca), que en la zona tiene potencial hidrogeológico medio que no ha sido explorado.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

El acuífero que actualmente se explota es de **tipo libre**, formado por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por conglomerados, gravas y arenas, de permeabilidad alta, que se restringe a la zona del Valle Agua Caliente.

Debajo de esta secuencia se localiza el conglomerado de la Formación Báucarit, el cual genera la presencia de un acuífero confinado formado por rocas volcánicas de permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Como basamento geohidrológico a profundidad y aflorando en algunas zonas del acuífero, se localizan rocas intrusivas.

Las rocas volcánicas tales como riolitas, tobas riolíticas, basaltos y andesitas constituyen las unidades de recarga, a través del fracturamiento, aunque el relleno de las fracturas limita la recarga. Estas unidades constituyen un acuífero de potencial medio a bajo, ya que los aprovechamientos que se encuentran en estas unidades extraen gastos entre 15 y 30 lps.

5.2 Parámetros hidráulicos

Durante la campaña de censo de aprovechamientos desarrollada en el estudio de 2008 se observó que no existe una infraestructura adecuada en los aprovechamientos para llevar a cabo una prueba de bombeo. Esta razón impidió la ejecución de pruebas de bombeo.

Mediante recorridos de campo y observaciones geológicas se estimaron valores promedio de los parámetros hidráulicos representativos del acuífero. Se asignó una transmisividad de $200 \text{ m}^2/\text{día}$ (**$2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$**), al considerar que la mayoría de los aprovechamientos están perforados sobre material granular poco consolidado y que por debajo de este material se encuentra el conglomerado de la Formación Baucarit, mientras que en la zona serrana se estimó un valor de $130 \text{ m}^2/\text{día}$ (**$1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$**).

5.3 Piezometría

Para el análisis y la configuración de niveles piezométricos, así como la determinación del funcionamiento acuífero, se utilizaron los datos piezométricos recabados por SGM (2008) en 27 aprovechamientos de agua subterránea. El volumen de extracción de agua subterránea es incipiente, los niveles de profundidad al nivel estático observados en la zona son del orden de 30 a 50 m. De manera general, los niveles en la porción este del valle son más profundos que los ubicados en la zona oeste.

La parte topográficamente más baja del acuífero se encuentra en las cercanías del poblado Agua Caliente, donde se tienen los niveles piezométricos más someros (menores a 10 m). En esta zona se localiza un manantial perenne aprovechado por la comunidad Yaqui.

5.4 Comportamiento hidráulico

Las zonas de recarga se localizan en las sierras que delimitan al valle, como el caso de la Sierra El Bacatete, ubicada en el límite oeste del acuífero, la Sierra Agua Zarca, ubicada al noroeste, la Sierra La Finalesa que se localiza en el límite este del acuífero y la Sierra La Ventana.

El flujo de agua infiltrada en estas sierras circula por el medio fracturado hasta llegar a las partes bajas donde se encuentra el Valle Agua Caliente, que está formado por conglomerados y material aluvial recientes, donde se concentran la mayoría de los aprovechamientos censados.

La dirección del agua subterránea sigue el patrón que tienen los arroyos, este flujo subterráneo es paralelo a la dirección del Río Agua Caliente y demás corrientes superficiales tributarias a la Presa Álvaro Obregón.

El modelo conceptual del funcionamiento del acuífero muestra que el agua se infiltra en las partes altas, y circula a través del medio fracturado de las rocas volcánicas de composición ácida como las riolitas e ignimbritas.

Así como desde las sierras que están compuestas por material volcánico de composición básica como andesitas y material basáltico, posteriormente el agua llega al valle donde circula a través del material aluvial.

El material aluvial consiste de conglomerados recientes poco consolidado, gravas y arenas localizados al pie de monte y en la zona del Valle Agua Caliente, constituye el acuífero que actualmente se encuentra en explotación

Esta subyace por conglomerado de la Formación Báucarit que opera como capa confinante entre la capa granular y la zona fracturada.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo a la campaña de censo de aprovechamientos y medición de niveles estáticos hechos en 2008, los niveles de profundidad al nivel estático del acuífero son variados.

Existen niveles someros que oscilan entre 0.3 a 5 m característicos de aprovechamientos que se localizan en las márgenes de los arroyos, como los que se observan se observan en el poblado Agua Caliente y en el Rancho Los Sahuaritos.

Los aprovechamientos que se encuentran alejados de la influencia de los arroyos registran valores de profundidad hasta de 20 m.

Los niveles de mayor profundidad, hasta 57 m, se localizan en el límite norte del acuífero.

En la Figura 4 muestra la configuración de la profundidad al nivel estático.

5.4.2 Elevación del nivel estático

16

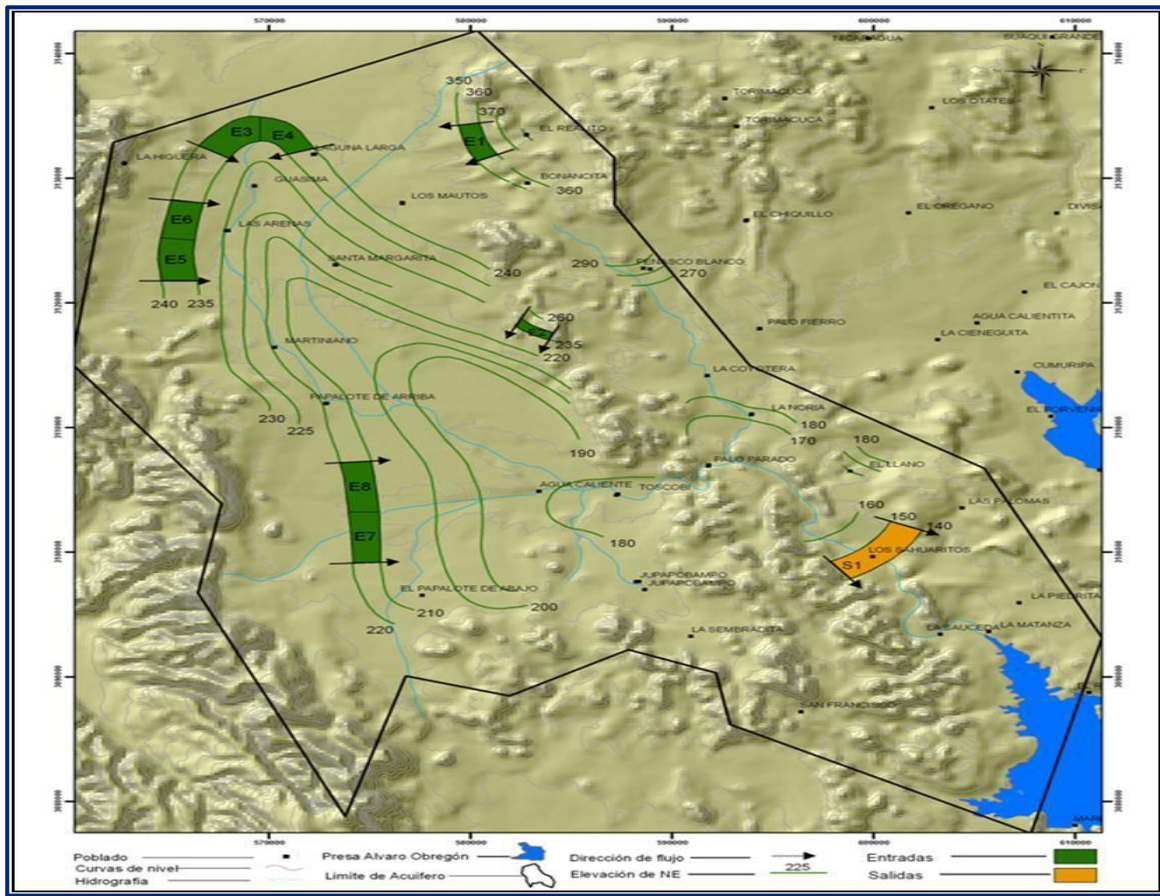


Figura 5. Elevación del nivel estático (msnm), 2008

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, debido a la falta de estudios hidrogeológicos previos, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita su configuración, por lo que no fue posible establecer una evolución de niveles piezométricos. 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 y/o del bombeo, ya que el volumen de extracción es muy bajo.

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

Como parte de los trabajos de campo hechos en 2008, se tomaron las lecturas in situ de parámetros físicos y químicos con el pH, Sólidos Totales Disueltos (STD), temperatura y Conductividad Eléctrica.

Como resultado de esta actividad se establece que la mayor parte del agua subterránea tiene valores pH cercanos a la neutralidad, los valores de STD varían entre 300 y 500 mg/l, con excepción del aprovechamiento ubicado en el Rancho El Chupadero, con 2,170 mg/l.

La baja concentración de STD sugiere que la mayor parte del agua subterránea es de reciente infiltración, por ende su calidad tiende a ser aceptable. No se descarta la presencia de metales pesados, en su caso su distribución sería puntual y su concentración estaría relacionada al marco geológico y sus procesos de mineralización.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2008, se registró la existencia de un total de 39 aprovechamientos, de los cuales 17 corresponden a norias, 21 son pozos y 1 manantial. En estado inactivo se encuentran 5 pozos y 4 norias, que corresponden al 14% de los aprovechamientos censados.

La zona carece de infraestructura agrícola, existen únicamente cuatro pozos que se utilizan para esta actividad y con escasa área de riego, la mayoría de los aprovechamientos tienen uso pecuario (46.1 %), mientras que el 43.6% de los aprovechamientos corresponde a uso mixto (pecuario y doméstico) y el 10.25% corresponde a uso agrícola pecuario.

El volumen de extracción conjunto se estimó en 0.406 hm³ anuales, de los cuales 0.298 hm³ (73.5%) tienen uso agrícola, 0.0965 hm³ (23.7%) para uso doméstico, mientras que 0.0113 hm³ (2.8%) son para uso pecuario.

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 de aguas subterráneas se definió para una superficie de **958** km², que corresponde a la zona donde se localizan gran parte de los aprovechamientos de agua subterránea.

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

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

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 del acuífero:

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

Para este caso particular, dadas las pocas variaciones en niveles estáticos con respecto al tiempo, fue considerado un cambio de almacenamiento nulo, por lo cual se optó por calcular la recarga natural considerándola como incógnita de la ecuación de balance.

De esta manera la ecuación de balance propuesta es la siguiente

$$E_h + R_v - B - S_h - ETR = \pm \Delta V(S) \quad \text{----- (I)}$$

Donde:

Eh: Entradas por flujo horizontal

Rv: Recarga vertical

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real

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

7.1 Entradas

Representa la sumatoria de entradas de agua al sistema acuífero, ya sean naturales o inducidas.

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) está integrada 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 (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 constituye otra fuente de recarga al acuífero. Este volumen se integra en la componente de recarga inducida (R_i).

Debido a que el volumen del agua destinada al uso agrícola es muy bajo y que no existen poblaciones urbanas de importancia en las que se generen infiltraciones de las fugas en las redes de distribución de agua potable y del alcantarillado, se considera que la recarga inducida es despreciable.

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:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Recarga por flujo horizontal

Ri: Recarga inducida

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real en niveles someros

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del 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.

La cuantificación del caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada subterránea horizontal al acuífero, para un período considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático para el período analizado.

La ley de Darcy, se expresa de la siguiente manera:

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 5). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:

$$Q = V \cdot A$$

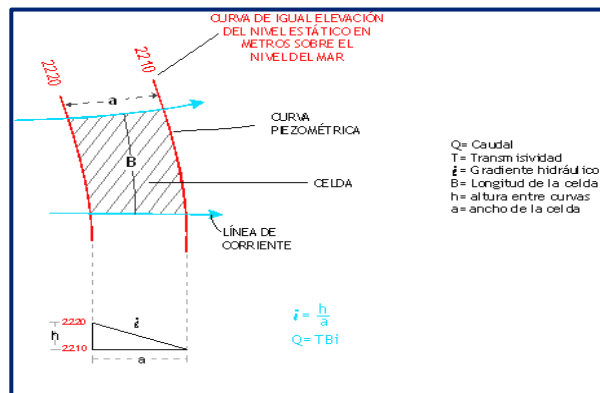
Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

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:

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

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

Para el cálculo es necesario conocer el espesor saturado del acuífero (b) y su coeficiente de permeabilidad (K), o bien, el valor de transmisividad (T).

Los demás datos se obtienen de la piezometría. Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático y la geología, y se calcula el flujo a través de cada una de ellas.

El coeficiente K, se obtiene a partir de las pruebas de bombeo de las cuales se obtiene el valor de transmisividad (T), que es el producto de la conductividad hidráulica (K) por el espesor saturado:

$$T = K b$$

En el extremo sureste y este de la zona de balance fueron generadas nueve celdas, enumeradas del uno al nueve de norte a sur, mismas que se observan en la Figura 6, en las que se utilizaron valores de transmisividad entre 130 y 200 m²/día, mismos que fueron estimados de acuerdo a las características hidrogeológicas de las rocas.

Como resultado del análisis de celdas de flujo se obtuvo un valor de **9.5 hm³/año** que representa las entradas horizontales a la zona de influencia del balance de aguas subterráneas (tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	2909	1085	10	0.0092	0.00151	0.0405	1.3
E2	1960	609	10	0.0164	0.00151	0.0486	1.5
E3	2889	1867	5	0.0027	0.00232	0.0179	0.6
E4	2783	1676	5	0.003	0.00232	0.0193	0.6
E5	3364	1751	5	0.0029	0.00232	0.0223	0.7
E6	3057	1610	5	0.0031	0.00232	0.022	0.7
E7	4044	1434	10	0.007	0.00232	0.0654	2.1
E8	4047	1450	10	0.0069	0.00232	0.0648	2
Total de entradas							9.5

7.2 Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el sistema acuífero. Para el Acuífero Agua Caliente las descargas están representadas por Salidas Horizontales (Sh), bombeo (B) y descarga por evapotranspiración (ETR).

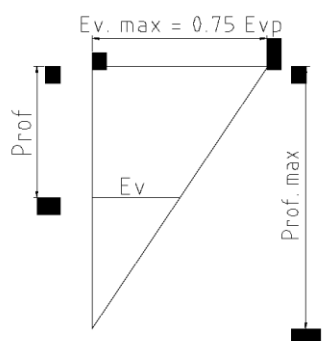
7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

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).

Dado que la lámina de precipitación pluvial media anual es del orden de los 442 mm y la temperatura promedio de 24.8 °C, al aplicar el método empírico de Turc para estimar ETR, su valor resulta mayor que la precipitación media, invalidando el resultado. En general, para climas áridos los métodos empíricos para estimar ETR (Turc, Coutagne, por ejemplo) se invalidan para valores inferiores a los 350 mm anuales, dependiendo del valor de la temperatura media anual.

Para el caso del Acuífero Agua Caliente, dada la falta de vegetación en zonas de niveles estáticos someros, se consideró que sólo ocurre el fenómeno de evaporación, que se presenta en las proximidades de las principales corrientes superficiales, donde existen niveles freáticos someros con profundidades entre 1 y 4 m.

De los datos reportados por evapórimetros de las estaciones analizadas se determina que la evaporación potencial promedio de la zona es de 2573 mm anuales. Se utilizó un valor de corrección de 0.75, al considerar que se determina en un almacenamiento pequeño (CNA, 2002). La superficie en la que se consideró que ocurre la evapotranspiración es de 14.2 km², que presenta profundidades al nivel estático con un valor máximo de 4 m, intervalo considerado para calcular la evaporación de acuerdo a la siguiente expresión:



$$\frac{Ev}{Ev. max} = \frac{(Prof. max - Prof)}{Prof. max}$$

$$Ev = Ev. max \left(1 - \frac{Prof}{Prof. max} \right)$$

$$Vol Ev = Ev (Area)$$

$$ETR = \frac{0.75 \text{ (Evap. Prom.) (Área)}}{4}$$

$$ETR = \frac{0.75 \text{ (2.6 m) (14.2 km}^2\text{)}}{4}$$

$$ETR = 6.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Si se toma en cuenta que esta variable no presenta variaciones significativas ya que el flujo se mantiene de forma constante, se obtiene que la evapotranspiración potencial para la zona del acuífero como valor promedio es de **6.9 hm³/año**.

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen total anual de extracción de agua subterránea asciende a **0.4 hm³ anuales**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El volumen de las salidas subterráneas se calculó de la misma manera que las entradas subterráneas, tomando en cuenta la elevación del nivel estático mostrada en la Figura 5 y a través de la Ley de Darcy. En la Tabla 3 se muestra que el valor de las salidas subterráneas es de **2.5 hm³ anuales**, que tienden a descarga hacia la Presa Álvaro Obregón.

Tabla 3. Cálculo de salidas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	4679	1725	10	0.0058	0.0029	0.0787	2.5
Total salidas							2.5

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. Por otra parte, la configuración de elevación del nivel estático no muestra aún la presencia de conos de abatimiento o deformaciones de la dirección natural del flujo subterráneo, que sean ocasionados por la concentración del bombeo o de aprovechamientos. Adicionalmente, debido a que el volumen de extracción es muy inferior a la estimación más conservadora de la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

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. Bajo estas consideraciones, la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo $\Delta V(S) = 0$.

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración por lluvia (R_v), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + ETR - \Delta V(S) - E_h & (2) \\ R_v &= 2.5 + 0.4 + 6.9 - 0.0 - 9.5 \\ R_v &= 0.3 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a:

$$\begin{aligned} R_t &= R_v + E_h \\ R_t &= 0.3 + 9.5 \\ R_t &= 9.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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 **9.8 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, su valor es de **0.0 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

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 **5,008,093 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 9.8 - 0.0 - 5.008093 \\ \text{DMA} &= 4.791907 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,791,907 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1994. Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos, México, Distrito Federal.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Estudio Geohidrológico del Acuífero Río Sahuaripa. Convenio de Colaboración con Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca del Noroeste.