



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO HUÁSABAS (2653), 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.....	8
4.2 Geología estructural	12
4.3 Geología del subsuelo.....	13
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
5.4.3 Evolución del nivel estático	16
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	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	23
7.2.1 Evapotranspiración real (ETR)	23
7.2.2 Extracción por bombeo (B).....	25
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	25
8. DISPONIBILIDAD	26
8.1 Recarga total media anual (R).....	27
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	27
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	27
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	28
9. BIBLIOGRAFÍA	29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 Huásabas, definido con la clave 2653 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 29° 38' y 30° 10' de latitud, y 109° 10' y 109° 35' de longitud, cubriendo una superficie de 1130 km². Limita al norte con el acuífero Villa Hidalgo, al este con Río Bacadehuachi, al sur con Nácori Chico, al oeste con Río Moctezuma (figura 1).

Geopolíticamente cubre parcialmente los municipios Cumpas, Moctezuma, Divisaderos y Bacadéhuachi.

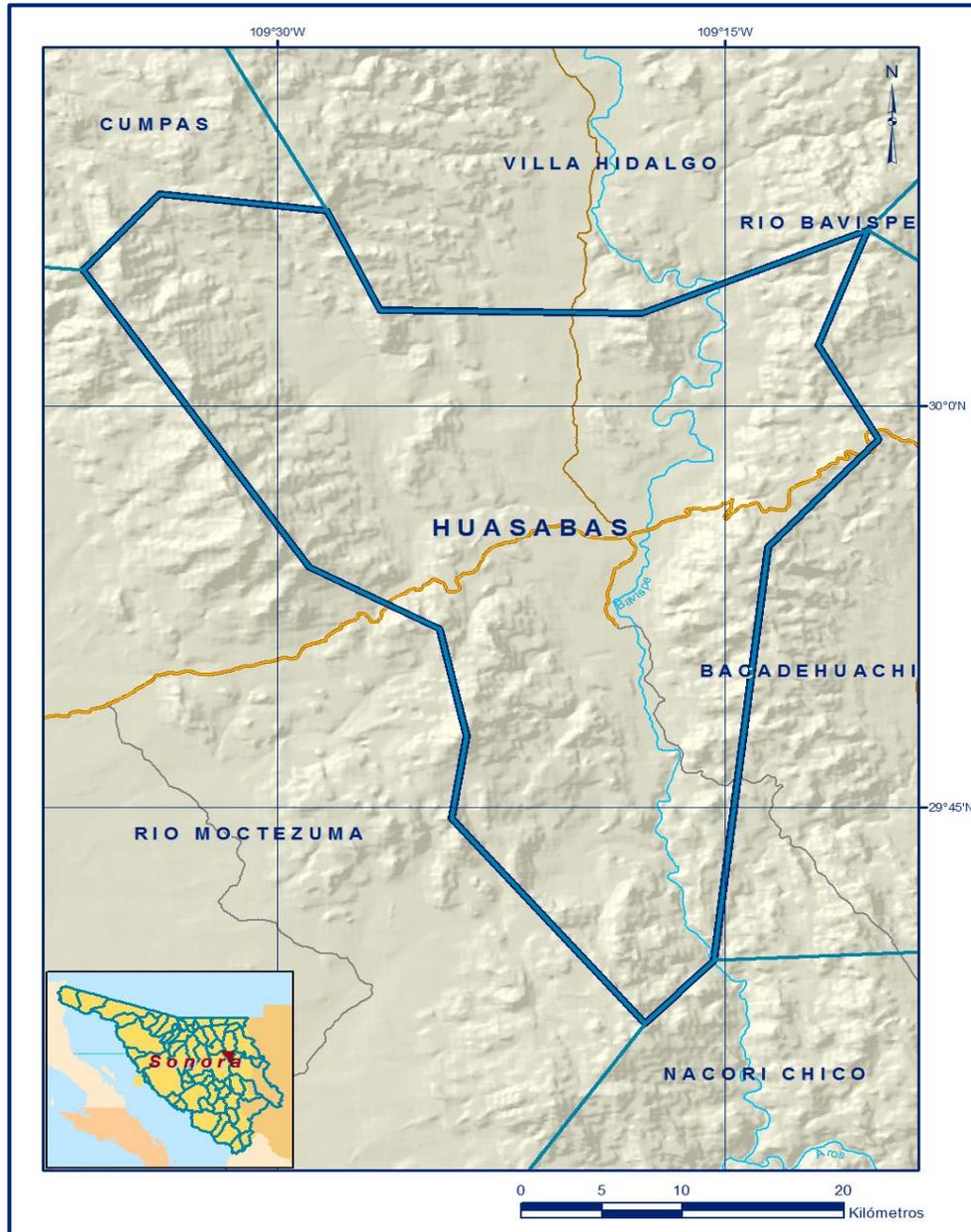


Figura 1. Localización del acuífero

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 2653 HUASABAS						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	109	33	56.5	30	7	53.9
2	109	28	20.3	30	7	16.3
3	109	26	32.8	30	3	33.7
4	109	17	48.5	30	3	26.3
5	109	10	14.7	30	6	33.8
6	109	11	53.1	30	2	14.7
7	109	9	51.0	29	58	44.3
8	109	13	34.5	29	54	41.8
9	109	15	22.0	29	39	16.3
10	109	17	39.8	29	36	54.5
11	109	24	9.5	29	44	35.4
12	109	23	40.1	29	47	39.3
13	109	24	33.4	29	51	38.9
14	109	28	56.1	29	53	57.0
15	109	36	30.6	30	5	2.7
1	109	33	56.5	30	7	53.9

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Huásabas pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. Su territorio no se encuentra regido por ningún decreto de veda para aguas subterráneas.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

Aunque el volumen de extracción es incipiente, el uso principal del agua es para abastecimiento de agua potable a los centros de población. 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 HIDROGEOLOGICA 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.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de Provincias Fisiográficas hecha por INEGI (1997), el área se encuentra comprendida dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, en la subprovincia de Sierras y Valles del Norte.

El área de esta subprovincia cubre totalmente los municipios Huásabas, Moctezuma, Granados y Divisaderos.

La zona que comprende el acuífero Huásabas está formada principalmente por altos estructurales que conforman las sierras, entre las cuales se localiza un valle intermontano con orientación preferente norte – sur; donde la altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur.

En las sierras dominan las rocas volcánicas ácidas. Mientras que en los valles abundan los materiales sedimentarios continentales conformados por conglomerados del Terciario y aluviones. Dentro del polígono del acuífero se encuentran los fisiotipos de valle intermontano, sierra alta y sierra alta con cañadas.

3.2 Clima

De acuerdo con las clasificaciones climáticas de INEGI (2007), el acuífero presenta tres tipos de climas.

Semiseco Semicálido BS1h (x): Presenta una temperatura anual mayor a los 18° C, con temperatura del mes más frío menor a 18° C.

La temperatura del mes más cálido es de 22° C, con lluvias distribuidas en todo el año y porcentaje de lluvias invernal mayor al 18% del total anual.

Semiseco templado BS1k (x): Presenta una temperatura anual de entre 12 y 18° C, con una temperatura del mes frío de entre -3 a 18° C, la temperatura del mes más cálido menor a los 22°C; con lluvias de verano y porcentaje de lluvias invernales mayor al 18% del total anual.

Templado, subhúmedo Cwo (x), temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más caliente bajo 22° C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

El análisis climatológico se realizó con base en los datos de tres estaciones climatológicas en el área de influencia del acuífero, ellas son Huásabas, Granados y Villa Hidalgo. De acuerdo con el análisis de las estaciones climatológicas mencionadas, la temperatura media anual para el acuífero Huásabas es de 26.6° C, con base en el método de Polígonos de Thiessen, se determinó una precipitación media anual de 365.61 mm y con los datos obtenidos de las estaciones, la evaporación potencial es de 2252 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado dentro de la Región Hidrológica 9 Sonora Sur (RH-9), la cual ocupa la mayor superficie en el Estado de Sonora (63.6 % de la superficie estatal), se extiende en la porción oriental desde Agua Prieta hasta Yavaros, prolongándose por el extremo occidente del Estado de Chihuahua. Tiene un relieve con fuertes contrastes altimétricos, la mayoría de sus corrientes nacen en la Sierra Madre Occidental, y la integran las siguientes cuencas: Cuenca (A) Río Mayo, Cuenca (B) Río Yaqui, Cuenca (C) Río Mátape, Cuenca (D) Río Sonora y Cuenca (E) Río Bacoachi. El acuífero Huásabas queda enmarcado en la Cuenca (B) Río Yaqui. La principal corriente superficial de la zona es el Río Bavispe.

El Río Bavispe tiene su origen en la Sierra Madre Occidental, cerca del límite interestatal con Chihuahua, tiene una longitud de 371 Km, una pendiente promedio de 0.46 % y con dirección inicial sureste-noroeste, posteriormente cambia de forma radical de norte a sur (dirección que presenta en el acuífero de Huásabas).

Dentro del acuífero capta las aportaciones de corrientes intermitentes tales como los arroyos Guevarachi, Arroyo Hondo, La Culebrilla, Mina de Moreno y La Tinaja Verde.

3.4 Geomorfología

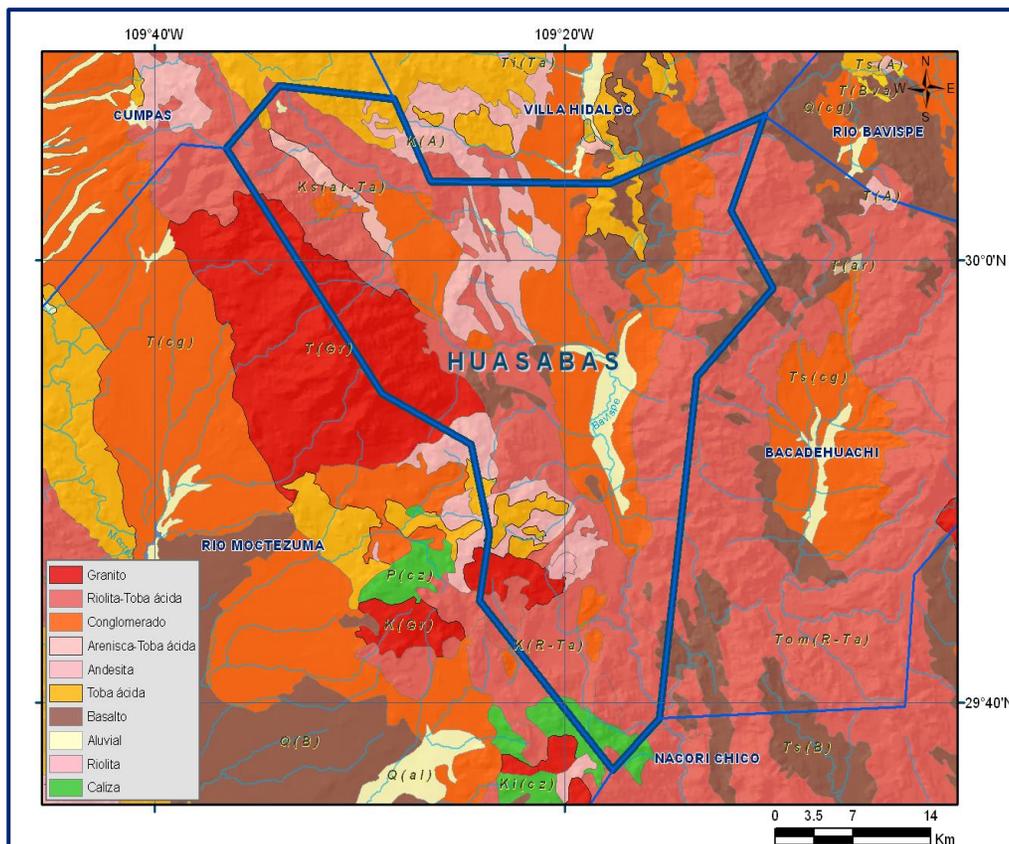
Las formas topográficas presentes en el acuífero están determinadas por las estructuras geológicas. El Valle de Huásabas es una fosa tectónica delimitada por dos sistemas de fallas normales, en la que actúa la erosión principalmente por el sistema fluvial.

De acuerdo a las características fisiográficas y morfológicas se deduce que esta región se encuentra en el ciclo geomorfológico de juventud.

4. GEOLOGÍA

El área donde se enmarca el acuífero Huásabas presenta un contexto geológico variado; las unidades litológicas que afloran comprenden un registro estratigráfico del Cretácico hasta el reciente.

A continuación se describen las unidades estratigráficas en orden cronológico, cuya distribución se presenta en la figura 2. Las descripciones fueron tomadas de la Carta Geológica Minera La Madera H12-9, elaborada por el Servicio Geológico Mexicano.



4.1 Estratigrafía

La secuencia de rocas expuestas en la región se menciona a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente.

ROCAS MESOZOICAS

Grupo Bisbee (Kapa-CzLu).- Está constituido por caliza con intercalaciones escasas de lutita y arenisca de grano fino. Se considera que su ambiente de depósito se llevó a cabo en ambientes marinos de plataforma somera restringida hasta plataforma abierta. Por sus características se puede considerar que esta formación forma parte de las zonas de recarga del acuífero por presentarse fracturada.

Complejo Volcánico inferior KsA-Tq.- Se denomina de esta manera a una secuencia netamente lávica andesítico traquítica y riódacítica que forma parte del Complejo Volcánico inferior, que aflora en la Sierra Los Ceniceros, localizada al oeste del acuífero y que forma parte de las zonas de recarga del mismo. Se le asigna una edad Cretácica tardía. Se encuentra sobreyacido concordantemente por la secuencia volcánica andesítica KsA-TA.

Formación El Tuli (KseA-TA).- Es una secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica que incluyen tobas líticas, tobas de cristales, tobas soldadas o de flujo y aglomerados.

Se encuentra distribuida en la porción centro y sur del acuífero de Huásabas, constituyendo parte del Cordón Tecolote y la Sierra Los Ceniceros.

Está representada por una alternancia de tobas de flujo, tobas líticas, tobas de cristales, brechas, flujos y aglomerados andesíticos con una pseudoestratificación visible. Generalmente son de un color de intemperismo gris claro a oscuro y en ocasiones de color gris oscuro en fractura fresca.

En algunas ocasiones, esta unidad está intercalada hacia la base con horizontes sedimentarios. Su espesor se estima aproximadamente en 500 m. Se deposita concordantemente sobre la unidad inferior (Ks Ar-Tq) y está sobreyacida de la misma manera por el paquete de rocas volcánicas félsicas que corresponden a la unidad superior (TpaeR-TR), que forman generalmente las partes topográficas más altas.

Estas rocas son correlacionables con la secuencia volcanosedimentaria de la Formación Tarahumara del Cretácico Superior definida en el centro de Sonora. Los flujos, los derrames volcánicos y las tobas se emplazaron en ambiente continental.

Grupo Cabullona (KsAr-Cgp).- Potente secuencia de rocas detríticas con cantidades pequeñas de ceniza volcánica que descansan discordantemente sobre rocas del Cretácico Inferior. El Grupo Cabullona se compone de cinco formaciones, que de la base a la cima son: Formación Corral, Arenisca Camas, Lutita Packard, Formación Lomas Coloradas, y Conglomerado El Cemento, que es equivalente lateral de las dos últimas formaciones. De manera general, el grupo está constituido por intercalaciones de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados de colores gris, verde claro, café claro y con algunas intercalaciones de rocas volcánicas, principalmente tobas riolíticas soldadas con estratificación cruzada y de diferente composición y tamaño de granos, que intemperizan en gris verdoso, gris-café y gris-morado.

En el área sólo se presenta un pequeño afloramiento al norte del área del acuífero, en la Sierra La Madera; se presenta fracturada y constituye una zona de recarga para el acuífero.

ROCAS CENOZOICAS

Riolitas-Tobas Riolíticas (Tpae R-TR).- Es una unidad de rocas de composición félsica compuesta por derrames, flujos, tobas riodacíticas a riolíticas.

Se encuentra distribuida en la porción centro del acuífero, en una parte de la sierra Ceniceros. Es una unidad que consta de flujos o derrames riodacíticos, tobas líticas y tobas riolíticas. Las tobas riolíticas presentan una textura lítica en una matriz fina constituida en su mayor parte por sílice con vetillas muy finas de cuarzo y óxidos de fierro diseminados, riolita de biotita. Esta unidad se considera que presenta un espesor de más de 200 m. Cubre a rocas volcanosedimentarias y volcánicas andesíticas del Cretácico Superior. Forman parte de las zonas de recarga del acuífero.

Secuencia Volcánica Ácida ToR-TR .- Es una secuencia de rocas volcánicas representadas por aglomerados, riolitas, tobas riolíticas, ignimbritas y brechas que generalmente forman largas mesetas de orientación NW-SE y pseudoestratificación que buza hacia el NE y SW, formando gran parte del evento volcánico-Oligomiocénico que dio lugar a la Formación de la Sierra Madre Occidental conocida como el Súper Grupo Volcánico Superior.

Estas rocas se encuentran ampliamente distribuidas en el acuífero, tanto en la porción norte como este y oeste del acuífero, forma parte del medio fracturado que sirve de recarga al mismo, el espesor de esta secuencia no fue medido pero posiblemente sea mayor de 1,000 m.

Esta secuencia volcánica está relacionada con las etapas finales de un largo período de subducción en el noroeste de México, produciendo una gran cantidad de rocas ácidas originadas a partir de numerosas calderas.

Estas extrusiones fueron acompañadas por emanaciones intermedias y básicas en sus últimas fases (volcanismo Bimodal). Secuencia Volcánica Ácida del Terciario (Oligoceno) ToTR-Ig.- Esta unidad corresponde a la cubierta volcánica de la porción noroccidental de la Sierra Madre Occidental; se encuentra aflorando en la porción noroeste del área del acuífero.

Esta secuencia volcánica está relacionada con las etapas finales de un largo período de subducción en el noroeste de México, y está constituida predominantemente por ignimbritas riolíticas.

En el área se describe a esta unidad con una parte inferior compuesta de tobas riolíticas e ignimbritas (ToR-Ig). Algunos informes reportan un espesor aproximado de 1600 m para dicha secuencia. Esta unidad se encuentra en discordancia erosional sobre varias unidades más antiguas y es sobreyacida también en discordancia por la Formación Báucarit. Esta formación forma parte del medio fracturado y constituye parte de la zona de recarga del acuífero.

Secuencia Bimodal To A-B.- Se denomina secuencia Bimodal a una serie de flujo de rocas volcánicas de composición andesítico-basáltico, que aflora en la porción norte del acuífero, se presentan como andesitas basálticas y basaltos con ocasionales intercalaciones de tobas riolíticas.

Se encuentra sobreyaciendo a las rocas volcánicas ácidas de la unidad ToR-TR, y subyaciendo al conglomerado Baucarit. Se considera depositada en un ambiente de volcanismo continental, muy ligado a la distensión terciaria y a los procesos volcanogénicos-sedimentarios que dio lugar.

Terciario (Oligoceno) ToB.- Esta unidad corresponde a la cubierta volcánica de la porción noroccidental de la Sierra Madre Occidental y es parte de ella. Se encuentra distribuida en la porción norte y noreste del área. Esta secuencia volcánica está relacionada con las etapas finales de un largo período de subducción en el noroeste de México, y está constituida predominantemente por emanaciones basálticas. Sobreyace a la secuencia bimodal To A-B y es sobreyacida en discordancia por la Formación Báucarit.

Formación Báucarit Tm Cgp-B. Esta Formación consiste de conglomerados de color regularmente pardo claro que cambia por meteorización a pardo oscuro. Generalmente se encuentra bien estratificado, la composición de los clastos es muy heterogénea, lo que indica la variación de la fuente de aporte, se estima que el espesor de la Formación Báucarit llega hasta los 500 m.

La Formación Báucarit sobreyace a las unidades Preterciarias, se encuentra cubierta por rocas volcánicas recientes de naturaleza básica y por depósitos de talud y terrazas aluviales recientes. Se considera producto de sedimentación continental, principalmente de ambientes fluviales y lacustres. Se encuentra interestratificada con rocas volcánicas principalmente básicas, ligadas íntimamente con fenómenos de distensión. Esta formación es considerada el basamento geohidrológico del acuífero Huásabas, puesto que el acuífero en explotación en la región es de tipo granular libre, localizado en depósitos sedimentarios cuaternarios y recientes, relacionados a los márgenes del Río Bavispe.

Secuencia Volcánica TmB.- Es una serie de flujos volcánicos de composición andesítico-basáltico y basáltico que afloran en la porción suroriental del acuífero fuera del área del mismo, conforman parte importante de la Sierra Cordón Tecolote y por lo tanto, forman parte del área de recarga del acuífero Huásabas. Sobreyace al conglomerado Báucarit. Estas rocas se depositaron en ambientes de volcanismo continental, muy ligado a la distensión terciaria.

QPtCgp: Pleistoceno, conglomerados.-Consiste de conglomerados polimícticos, areniscas y limos que varían de consolidados a poco consolidados. Los clastos de los conglomerados están por lo general bien redondeados y son producto de la denudación detrítica reciente, formando terrazas y depósitos de Talud. Se localizan en el valle de Huásabas en los márgenes del Río Bavispe y de algunas corrientes intermitentes. Forman parte del acuífero granular.

Cuaternario Pleistoceno Basaltos QPt-B.- Estas rocas corresponden a secuencias de basaltos continentales intrínsecamente ligados a los eventos tectónicos distensivos iniciados en el Terciario y que aún están activos.

Se originaron en dos episodios de volcanismo basáltico, el primero fisural, toleítico, asociado a la reactivación de fallas antiguas, y el segundo alcalino, asociado a edificios volcánicos que cubren al primero. Se encuentran distribuidos al suroeste del área, fuera del acuífero Huásabas, y forman parte del medio fracturado que sirve de área de recarga al acuífero. Estas unidades sobreyacen al Conglomerado Pleistocénico.

Qho Al Cuaternario Holoceno Aluvión.- Los sedimentos Cuaternarios son producidos por intemperismo y erosión de las rocas preexistentes y son depositados como abanicos aluviales y fluviales, a lo largo de ríos o arroyos y planicies de inundación activos; están constituidos por conglomerados de clastos de diferentes litologías, gravas, arenas y limos.

En estos materiales se encuentran localizados la mayor parte de los aprovechamientos de agua subterránea en el acuífero Huásabas, por lo que se considera que son los principales materiales que componen el acuífero granular de tipo libre. Se estima su espesor máximo de 40 m.

4.2 Geología estructural

El comportamiento estructural de la zona es producto de diversos eventos tectónicos: Orogenia Laramide durante el Cretácico Tardío- Terciario Temprano; posteriormente sobrevino un evento distensivo del Terciario Medio – Tardío, responsable de la formación de la provincia "Basin and Range", característica del noroeste de México y del suroeste de Estados Unidos. Este episodio se manifiesta por la aparición de fallas normales y fracturas de distensión en varias direcciones.

Las características estructurales del área consisten en sierras altas alargadas de rumbo preferencial noroeste-sureste, el acuífero se encuentra enclavado en un valle relleno de material clástico, dicho valle es parte de una fosa tectónica delimitada por un sistema de fallas normales con orientación noroeste-sureste y noreste-suroeste, ambos sistemas son producto de la última etapa tectónica distensiva, iniciada a partir del Terciario, que dislocó y fragmentó las unidades geológicas presentes.

La zona presenta una gran cantidad de fracturas que también siguen los sistemas estructurales noroeste-sureste y noreste-suroeste y afectan a las rocas volcánicas de las sierras circundantes, que conforman el medio fracturado de las zonas de recarga del acuífero.

4.3 Geología del subsuelo

Sobre los límites laterales de la planicie de inundación del Río Bavispe se observan afloramientos locales formados por materiales aluviales y conglomeráticos del Cuaternario, sobre los cuales se encuentran ubicados los aprovechamientos de agua subterránea. Para estos materiales se estima por observaciones de campo un espesor de 40 metros. El basamento geohidrológico de la zona está conformado por una capa de permeabilidad baja formada por rocas conglomeráticas de la Formación Báucarit, que sobreyacen a materiales volcánicos (figura 3).

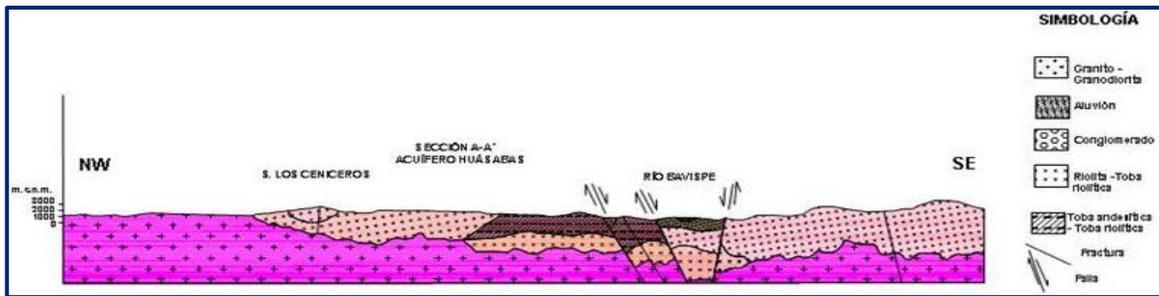


Figura 3. Sección Geológica del Acuífero Huásabas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de tipo **libre** y está conformado por un medio granular y un medio fracturado.

El medio granular es el que actualmente está en explotación y está constituido por depósitos no consolidados y semiconsolidados de granulometría variada, integrados por gravas, arenas, limos y arcillas que representan la planicie de inundación del cauce del Río Bavispe; el espesor del acuífero granular es aproximadamente 40 metros, de acuerdo con las observaciones de campo. El medio fracturado está conformado principalmente por materiales de origen volcánico tales como riolitas, tobas riolíticas, basaltos y andesitas; este medio compone las zonas de recarga ubicadas en las porciones topográficamente elevadas en las sierras La Madera, al noroeste, Cenicero al oeste y Cordón Tecolote al este.

Los dos manantiales localizados en el área también están ubicados en el medio fracturado. Debajo del medio granular que actualmente se explota, se alojan las rocas volcánicas fracturadas que constituyen una unidad con potencial de explotación que no ha sido aún explorado, localmente sujeto a condiciones de semiconfinamiento.

5.2 Parámetros hidráulicos

Durante la campaña de censo de aprovechamientos desarrollada en el estudio de 2008 se observó que los aprovechamientos que cuentan con equipos eléctricos y condiciones adecuadas para desarrollar pruebas de bombeo, están fuera de operación o en su defecto no cuentan con orificio para el monitoreo de los niveles del agua. Estas razones impidieron la ejecución de pruebas de bombeo.

Mediante recorridos de campo y observaciones geológicas se estimaron valores promedio de parámetros hidráulicos representativos del acuífero. Con base en las características de los depósitos granulares y el espesor promedio del acuífero se consideró un valor promedio de transmisividad de **$1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (100 $\text{m}^2/\text{día}$)** y conductividad hidráulica de **$5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$** .

Los valores de transmisividad utilizados en las celdas de entradas y salidas horizontales del acuífero, fueron establecidos con base en las características litológicas, permeabilidad y espesor saturado. En el caso de las entradas y salidas subterráneas se utilizó un valor de **$3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores son consistentes e hidrogeológicamente correlacionables con los obtenidos en el Acuífero Bacadéhuachi (SGM, 2008)

5.3 Piezometría

Con el propósito de conocer las condiciones piezométricas del acuífero, de manera paralela al censo de aprovechamientos elaborado en 2008, se llevó a cabo una campaña de mediciones piezométricas, en la cual se obtuvieron los niveles estáticos de 22 aprovechamientos, de los cuales 19 corresponden a norias y 3 a pozos.

5.4 Comportamiento hidráulico

En el acuífero Huásabas existen varias zonas de recarga conformadas por el medio fracturado, constituido principalmente por riolitas, tobas riolíticas, basaltos y andesitas que afloran en las porciones topográficamente elevadas, como la Sierra Madera al noroeste, la Sierra Ceniceros ubicada al oeste y el Cordón Tecolote al este. Junto con las fallas normales que delimitan la fosa en la que está enclavado el valle de Huásabas. El acuífero responde rápidamente a las precipitaciones pluviales.

La descarga artificial del acuífero se lleva a cabo mediante el bombeo en los materiales aluviales localizados en las márgenes del Río Bavispe, mientras que la descarga natural se concentra principalmente en el extremo sur del área y ocurre como flujo subterráneo y evapotranspiración en zonas con niveles piezométricos someros. Por otra parte, los manantiales en la región son controlados por el fracturamiento en materiales predominantemente volcánicos, los cuales, en su mayoría se presume tienen un control estructural y posiblemente reflejan un sistema de flujo regional, ya que son perennes y tienen una firma química sódica-clorurada.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático varía de 2 a 10 m (Figura 4) en los aprovechamientos censados en el acuífero, que están ubicados en materiales granulares del Río Bavispe. Al norte del acuífero se presentan profundidades que varían entre 4 y 6 m, mientras que en la traza del Río Bavispe los valores fluctúan entre 3 m al sur, 5 m en la parte central, y se incrementan hasta 10 m en la zona sur del valle.

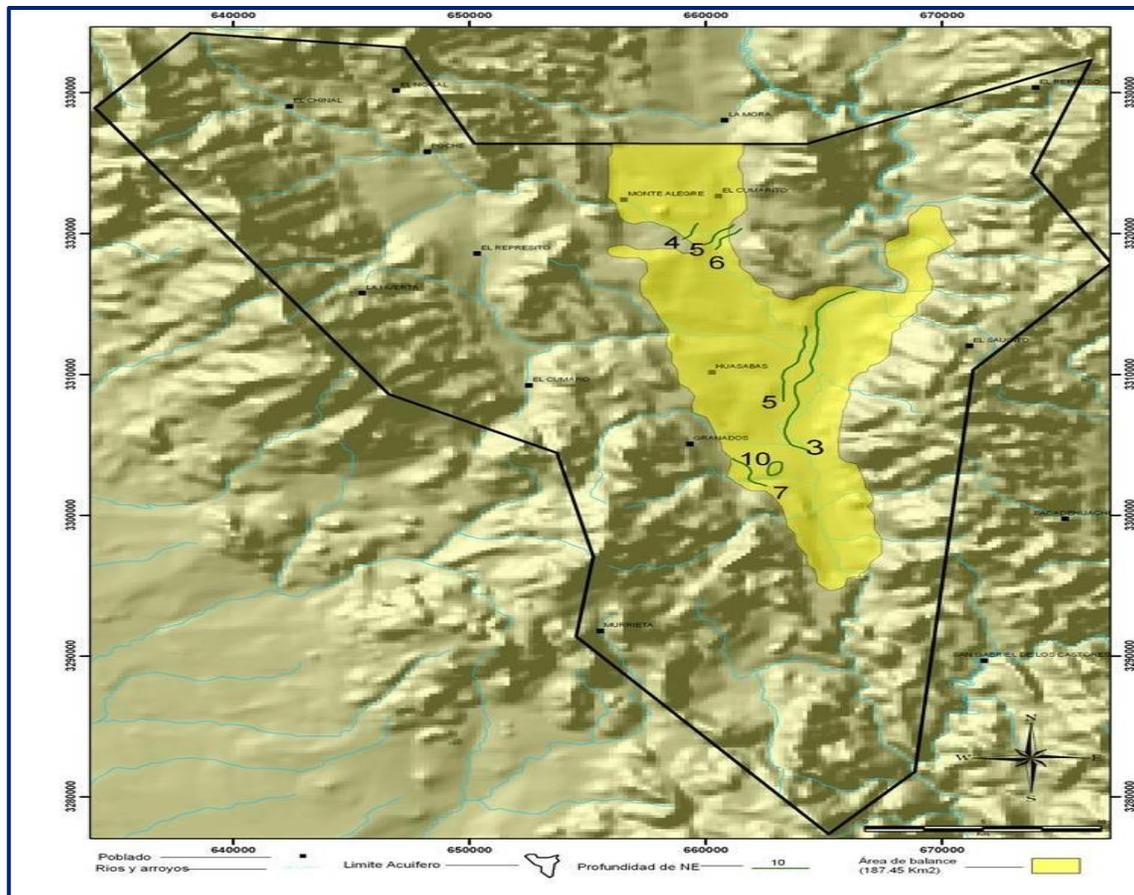


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m para el año 2008 y zona de balance

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para el año 2008 (Figura 5) presenta valores máximos al extremo norte del acuífero, donde varía entre 620 y 625 msnm, hacia la zona central del acuífero se presentan elevaciones del nivel estático entre 500 y 540 msnm, mientras que al sur varían entre 525 y 539 msnm, reflejando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur, con alimentaciones laterales provenientes de los arroyos tributarios del Río Bavispe.

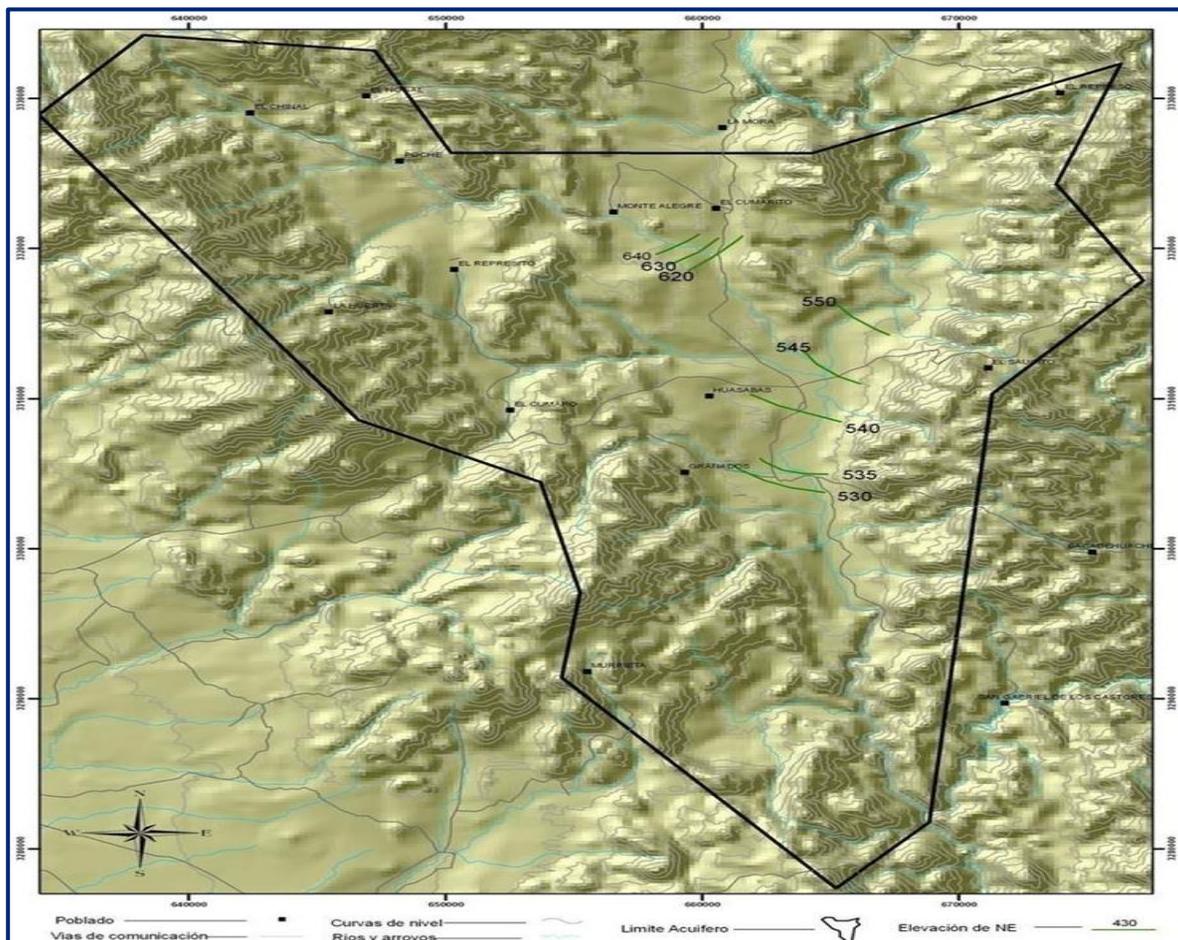


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm para el año 2008

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita su configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra 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.

El volumen de extracción se ha estimado en 0.9 hm³ anuales, valor que es muy inferior a la recarga más conservadora que pudiera estimarse.

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

Durante la etapa de censo y piezometría efectuados en el 2008, se midieron en campo diversos parámetros fisicoquímicos como: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, salinidad, pH y Eh; y se tomaron muestras de agua subterránea en 10 aprovechamientos.

La temperatura promedio del agua subterránea es de 27.1° C, medida en los aprovechamientos; para los manantiales se obtuvieron temperaturas de 33° C y 44.2° C, lo que indica que probablemente formen parte de un flujo regional profundo controlado por los sistemas estructurales predominantes en toda la región.

Las concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) en los aprovechamientos en general no superan 900 partes por millón (ppm), por lo que son menores al límite máximo permisible establecido en la "NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022."

Únicamente un pozo ubicado al sur de la comunidad Granados registró 1599 ppm, cabe mencionar que es el de mayor profundidad a 27 m. La mayor parte del área presenta valores de pH neutros o cercanos a la neutralidad, de 6.2 a 7.1.

En relación a la presencia de metales pesados en concentraciones que exceden los límites permisibles por la Norma Oficial NOM-SSA1-1994, al norte del acuífero se observa la presencia de Aluminio (0.21 mg/l), mientras que en aprovechamientos de la parte central del valle se localizó la presencia de sodio (231 y 248 mg/l), arsénico (0.028 y 0.032 mg/l) y manganeso (0.18mg/l).

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo de aprovechamientos realizado en el 2008, se registró la existencia de 24 aprovechamientos, de los cuales 19 son norias, 3 pozos y dos manantiales; de estos aprovechamientos 17 se encuentran activos y 7 inactivos.

El volumen de extracción total en el acuífero Huásabas asciende a **0.9 hm³/año**; el mayor volumen de extracción es para uso público urbano con 0.725328 hm³/año (77%), seguido por el uso agrícola con 0.146407 hm³/año (15 %) y finalmente el uso pecuario con 0.07272 hm³/año (8%).

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 en una superficie de 329 km², que corresponde a la zona de valle, que es en 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 de un 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.

Se cuenta con información suficiente para calcular entradas y salidas subterráneas, recarga inducida, evapotranspiración y la extracción por bombeo, 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

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo horizontal

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) 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 (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

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 (Ri).

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. 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) 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 (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

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 (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, recarga inducida, evapotranspiración y la extracción por bombeo, el valor de la recarga vertical será despejado de la ecuación de balance definida.

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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

$$Q = V \cdot A$$

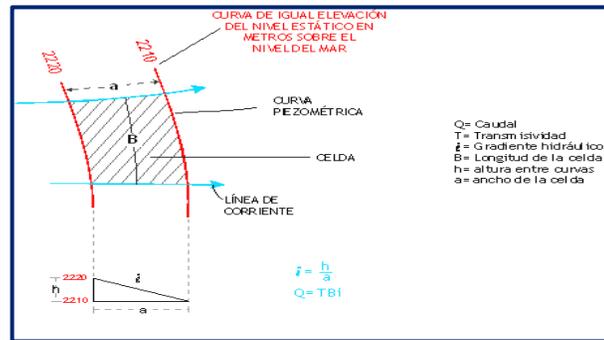
Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh).

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:

$$T = K b$$

Para el cálculo de la recarga subterránea en el acuífero, se analizaron las curvas de elevación del nivel estático 2008.

Las dos celdas de entrada se observan en la figura 6, mientras que el cálculo de volúmenes de entrada se presenta en la tabla 2, donde se utilizó un valor de transmisividad de $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, mismo que fue estimado con base en los resultados de pruebas de bombeo y a las particularidades del subsuelo en esa zona.

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
			(m)		(m ² /s)		
E1	1763	920	5	0.0054	0.003	0.0287	0.9
E2	3588	2280	5	0.0022	0.003	0.0236	0.7
Total entradas							1.6

Como resultado del análisis de celdas de flujo se obtuvo un valor de **1.6 hm³/año** que representa las entradas horizontales a la zona de influencia del balance de aguas subterráneas (zona de valle).

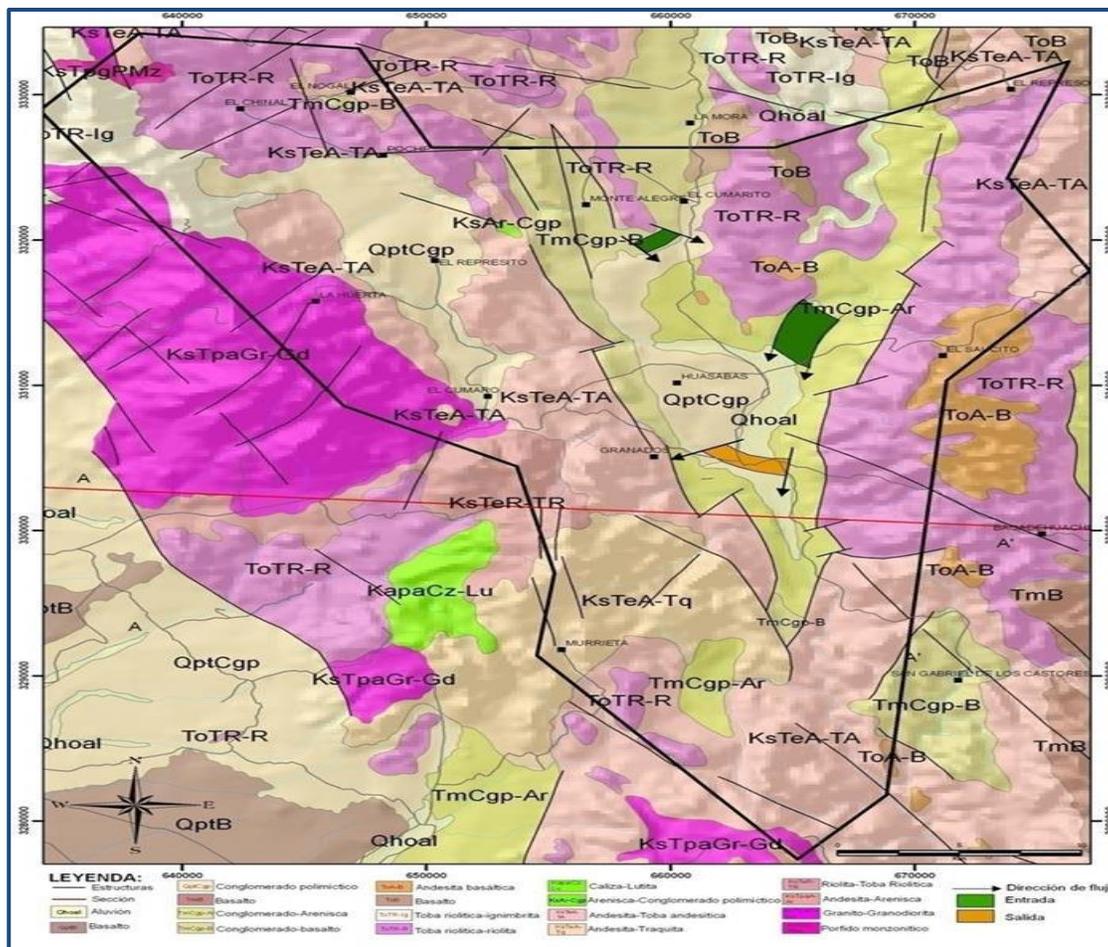


Figura 6. Celdas de Flujo

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas (Sh), y evapotranspiración (ETR). No existen manantiales.

7.2.1 Evapotranspiración real (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 precipitación pluvial media anual es de 365 mm y la temperatura promedio de 26.6 °C, al aplicar el método empírico de Turc para estimar ETR, su valor resulta mayor que la precipitación media, invalidando el resultado.

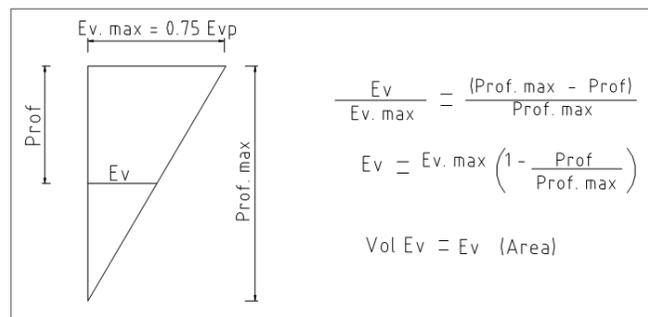
En general, para climas áridos los métodos empíricos para estimar ETR (Turc, Coutagne, por ejemplo) se invalidan para valores inferiores a los 350 mm anuales, dependiendo del valor de la temperatura media anual.

Para el caso particular de este acuífero, la evapotranspiración se presenta en los subálveos del Río Bavispe y afluentes principales, donde existen niveles freáticos someros y vegetación nativa.

De acuerdo al análisis climatológico se establece una evaporación potencial promedio de la zona es de 2254 mm anuales.

Al tomar en cuenta que su valor se determina en un almacenamiento pequeño, se usará un factor de corrección de 0.75 (Saxton & McGuinness, 1982, p. 235).

Considerando que en una superficie 11.7 km² se presentan niveles freáticos someros, con un valor máximo de 4 m de profundidad de extinción, que corresponde en este caso a la profundidad de las raíces de la vegetación nativa y de la profundidad media al nivel estático en la zona de niveles freáticos someros, al considerar la variación que tiene la evaporación con respecto a la profundidad, la evapotranspiración es calculada de la siguiente manera:



$$ETR = [0.75 (\text{Evaporación Promedio}) (\text{Área})] / \text{Prof. Máxima}$$

$$ETR [(0.75) (2.20 \text{ m}) (11.7 \text{ km}^2)]/4 = 0.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

El resultado de aplicar la fórmula anterior, da como resultado un valor de evapotranspiración de **4.8 hm³/año**.

7.2.2 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen total anual de extracción de agua subterránea asciende a **0.9 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 también de la configuración de elevación del nivel estático (Figura 6).

El valor estimado es de **1.6 hm³/año**, calculado en una sección próxima al extremo sur del área de balance.

Las celdas de flujo utilizadas para estimar la salida horizontal se observan en la figura 6, mientras que el cálculo del caudal se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas horizontales

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
			(m)		(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
S1	3367	978	5	0.0051	0.0030	0.0515	1.6
Total salidas							1.6

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

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

Las escasas mediciones piezométricas recabadas para el periodo 2004-2005 registran valores puntuales tanto positivos como negativos en una pequeña superficie del acuífero y no muestra alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento, que pudieran ser causadas por la concentración del bombeo y/o de aprovechamientos.

Por ello se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto $\Delta V(S) = 0$.

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 (Rv), por lo que, despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

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

Sustituyendo valores:

$$Rv = 1.6 + 0.9 + 4.8 - 0.0 - 1.6$$

$$Rv = 5.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a $R = Rv + Eh + Ri$

$$R = 5.7 + 1.6$$

$$R = 7.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso, su valor es de **7.3 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 **DNC = 0.0 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 **1,984,852 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 7.3 - 0.0 - 1.984852 \\ \text{DMA} &= 5.315148 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **5,315,148 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.