

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CUQUÍO (1446), ESTADO DE JALISCO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación Administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia Fisiográfica	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	6
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA	8
4.1 Estratigrafía	9
4.2 Geología Estructural.....	10
4.3 Geología del subsuelo	11
5. HIDROGEOLOGÍA.....	11
5.1 Tipo de acuífero	11
5.2 Parámetros hidráulicos.....	12
5.3 Piezometría	12
5.4 Comportamiento hidráulico.....	12
5.4.1 Profundidad al nivel estático	12
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	13
5.4.3 Evolución del nivel estático	14
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	15
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	16
7.1 Entradas	16
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	17
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	17
7.1.3 Recarga inducida (Ri)	18
7.2 Salidas.....	19
7.2.1 Bombeo (B).....	19
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	19
7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)	19
7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb).....	20
7.2.5 Evapotranspiración (ETR).....	21
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	23
8. DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	24
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	24
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	25
9. BIBLIOGRAFÍA	26

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 Cuquío, definido con la clave 1446 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-norte del estado de Jalisco, entre los paralelos 20° 43' y 21° 04' de latitud norte y los meridianos 102° 57' y 103° 25' de longitud oeste; abarcando una superficie de 923 km². Limita al norte con el acuífero Los Puentes, al este con el acuífero Yahualica, al sur con el acuífero Altos de Jalisco y al oeste con los acuíferos Arenal y Atemajac, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco (figura 1). Geopolíticamente se encuentra ubicado principalmente en los municipios Cuquío e Ixtlahuacán del Río y en pequeñas porciones de los municipios San Cristóbal de la Barranca, Guadalajara, Zapopan y Acatic.

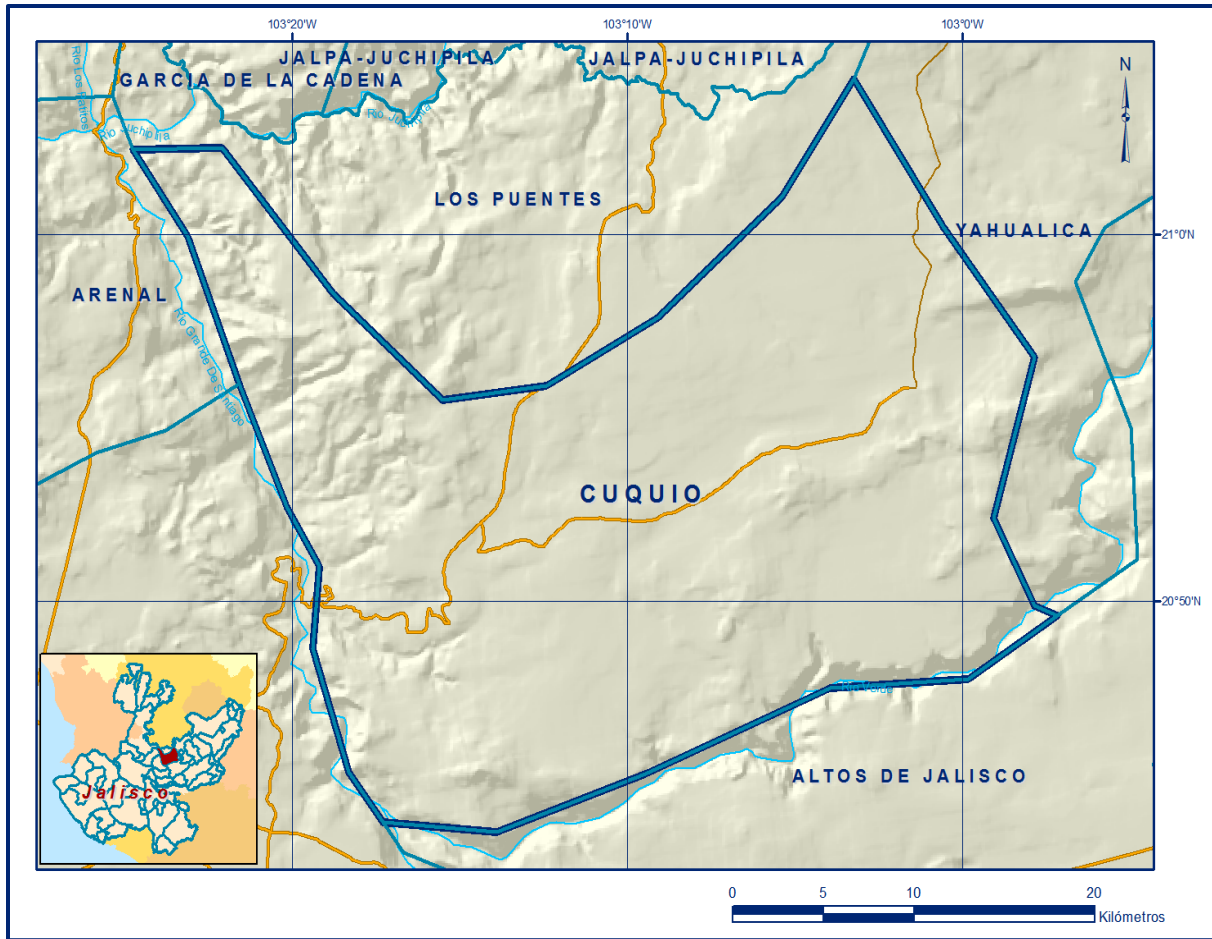


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUIFERO 1446 CUQUIO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	21	36.2	20	55	56.6
2	103	23	8.0	20	59	58.1
3	103	24	45.8	21	2	18.7
4	103	22	6.8	21	2	21.8
5	103	18	48.1	20	58	23.3
6	103	15	32.5	20	55	29.1
7	103	12	26.0	20	55	53.5
8	103	9	7.3	20	57	43.6
9	103	5	24.1	21	1	2.3
10	103	3	15.7	21	4	14.9
11	103	0	36.7	21	0	13.4
12	102	57	51.7	20	56	39.4
13	102	59	5.0	20	52	16.5
14	102	57	51.7	20	49	52.8
15	102	57	11.9	20	49	37.5
16	102	59	50.9	20	47	53.6
17	103	3	58.5	20	47	38.3
18	103	9	28.7	20	45	17.7
19	103	13	54.6	20	43	42.9
20	103	17	19.3	20	43	58.4
21	103	18	20.6	20	45	20.7
22	103	19	24.8	20	48	42.5
23	103	19	12.6	20	50	57.0
24	103	20	10.6	20	52	34.8
1	103	21	36.2	20	55	56.6

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2. Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Cuquío pertenece al Organismo de Cuenca “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas en diversos municipios del estado de Jalisco y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los municipios del estado de Jalisco”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 7 de diciembre de 1987. Esta veda es de tipo III, la cual permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el público urbano. En el acuífero no existe Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero Cuquío se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA DE ACATIC, TEPATITLÁN Y ARANDAS, JALISCO. Elaborado por la Compañía Geólogos Consultores, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1981. El estudio tiene por objetivo, conocer las condiciones hidrogeológicas y su relación con el funcionamiento de los acuíferos de la zona; localizar área con mayores posibilidades para el almacenamiento y explotación de aguas subterráneas; proponer zonas para la perforación de pozos de exploración; delimitar la extensión y posibilidades acuíferas de las rocas terciarias. El informe aporta la descripción geológica, la distribución espacial de las capas del subsuelo y el modelo estratigráfico.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS VALLE DE GUADALUPE, CUQUÍO, TEQUILA, JALOSTOTITLÁN Y COLOTLÁN EN EL ESTADO DE JALISCO. Elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua para la Comisión Nacional del Agua en 2010.

Este estudio tuvo como objetivo general, actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento geohidrológico, para contar con la información necesaria que permita calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la ejecución de actividades de campo que incluyeron: censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue básico para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Raisz F. (1964), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en el traslape integrado por la estribación meridional de la Sierra Madre Occidental (Subprovincia Sierras y Valles Zacatecanos) y la cubierta del Eje Neovolcánico (Subprovincia Altos de Jalisco).

La Sierra Madre Occidental es una región disectada relativamente alta, compuesta por una compleja secuencia de rocas volcánicas del Cenozoico, cubiertas en algunos lugares por delgados depósitos de suelos residuales. EL Eje Neovolcánico es un área de montañas altas compuesta por una secuencia compleja de rocas volcánicas del Cenozoico, con fosas profundas rellenas con material lacustre del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, el clima que prevalece en el acuífero Cuquío es el templado subhúmedo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Cuquío, Ixtlahuacán del Río, Acatic, La Soledad y Puente Arcediano, que cuentan con un periodo de análisis de 66 años (1939-2005).

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **877.6 mm y 15.3 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1914.4 mm anuales**.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica RH 12, Lerma Santiago y forma parte de dos cuencas Río Santiago-Guadalajara y Río Verde Grande. La Región hidrológica Lerma-Santiago es la región más importante del estado, no sólo por representar el 50% de la superficie estatal, sino por incluir un 70% de población y prácticamente la mayor parte de la industria. La principal corriente de esta región es conocida como Río Grande Santiago que se origina en el Lago de Chapala.

Las principales corrientes son el Río Verde y el río Santiago. Existen diversos aprovechamientos superficiales que interceptan las corrientes intermitentes y perennes. Los almacenamientos que destacan son: La presa De Los Sauces, la Presa Los Gigantes y la Presa de Cuacuala, localizadas en la porción centro- norte del acuífero. Al Noreste del acuífero existen bordos que son utilizados principalmente para el abastecimiento agropecuario.

3.4 Geomorfología

La Subprovincia de las Sierras y Valles Zacatecanos se localiza en pequeñas porciones al noreste de Jalisco, se caracteriza por sus sierras altas, alargadas en sentido norte-sur, frecuentemente rematadas por mesetas que alternan con valles, también alargadas en esa misma dirección.

Los pisos de los valles son a veces de pendientes suaves, pero con mayor frecuencia presentan terrazas y lomeríos, que probablemente son producto de la erosión de antiguos pisos de valles más altos. El drenaje se dirige a través de los valles hacia el noreste y sólo en su porción austral se encuentran algunas corrientes que desembocan hacia el sur, en los ríos Verde y Grande de Santiago. Los sistemas de topoformas que se encuentran dentro de Jalisco son: Las Sierras Altas con Mesetas, que se elevan de los 2,300 a los 2,850 msnm; sus laderas son abruptas cortadas por abundantes cañadas, su transición a los valles amplios es también abrupta y las crestas de las sierras en ocasiones están rematadas por pisos de mesetas, alargadas perpendicularmente al eje de la sierra y paralelas a las cañadas que bajan de ella.

El Piso Amplio de Valle con Lomeríos que está formado por las partes bajas del valle, casi llena desde su contacto con las sierras que las rodean de materiales aluviales finos. Los Lomeríos Suaves producto de la erosión de antiguas bajadas de las sierras (conglomerados) o frecuentemente formados por las mismas rocas.

El Cañón del río Verde-Santiago que es el único sistema en su tipo dentro de esta subprovincia y que se continua hacia el oeste, adentrándose en la parte sur de la subprovincia Mesetas y Cañones del Sur.

En la zona del fondo del cañón, sobre todo al norte de Guadalajara afloran rocas sedimentarias ricas en carbonatos, que probablemente constituyen el basamento sobre el que descansa la Sierra Madre Occidental.

La Subprovincia Altos de Jalisco queda en su mayor parte dentro del estado de Jalisco, se caracteriza por amplias mesetas de origen volcánico y presenta la mayor densidad de topoformas degradativas, generadas por disección hídrica y abundancia de valles profundos de laderas escarpadas a fines de los caños de la Sierra Madre Occidental.

Representa el 17.51% con respecto a la superficie total de la entidad y se distinguen en ella los siguientes sistemas de topoformas: Escudo-Volcanes Aislados o en Conjunto, Pequeña Meseta asociada con lomeríos, Gran Meseta con Cañadas, Meseta Lávica, Meseta Lávica asociada con lomeríos, Meseta Escalonada, Lomerío de Colinas Redondeadas, Lomeríos Suave en Arenisca Conglomerado, Valle de Laderas Escarpadas asociadas a lomeríos, Valle con Terrazas, Cañón y Depresión.

4. GEOLOGÍA

Representando a las secuencias de la Sierra Madre Occidental se tienen flujos piroclásticos riolíticos del Oligoceno-Mioceno. Previo al vulcanismo del Cinturón Volcánico Transmexicano se tienen dos secuencias de tobas, una de composición riolítica (Mioceno), a la cual se correlacionan una secuencia de tobas y brechas andesíticas, así como, una secuencia de calizas lacustres y terrígenos intercalados con horizontes volcánicos.

El primer evento magmático que pertenece al Cinturón Volcánico Transmexicano, es una unidad basáltica. También de edad Plioceno, se tienen, la ignimbrita San Gaspar, la Formación Chapala con sedimentos lacustres con intercalaciones de ceniza y pómez y una unidad de andesitas y basaltos.

Durante el Plioceno-Pleistoceno se desarrolló una cadena de volcanes que va desde la región de Tequila hasta El Salto, Jal., y constan de andesita y basaltos.

Representando al Pleistoceno se tienen el Campo Volcánico Acatlán, que consta de un grupo de domos andesíticos y riolíticos, conos y flujos de lava andesíticos.

La ignimbrita Acatlán, la cual muestra evidencias de mezcla de magmas riolíticos y andesíticos; El Complejo Volcánico Tequila formado por rocas de composición riolítica denominada Toba Tala y la fase efusiva con domos riolíticos (figura 2).

Unidad: Basalto–Brecha volcánica básica, Plioceno-Cuaternario, se distribuye en la porción Oeste del acuífero, desde la margen del río Santiago.

4.2 Geología Estructural

El Límite entre el Cinturón Volcánico Transmexicano y la Sierra Madre Occidental en el occidente de México está controlado por un sistema de fallas cuyo estudio aún está en desarrollo. En este sentido, este límite estaría representado por las zonas donde ahora se distinguen el Graben Tepic-Zacoalco y el Graben de Chapala.

El Graben Plan de Barrancas-santa Rosa es una depresión estructural de 20 km de ancho, desarrollada a lo largo del límite entre la Sierra Madre Occidental y el Bloque Jalisco y limitado por la falla Cinco Minas-Santa Rosa hacia el norte y el sistema Plano de Barrancas hacia el sur.

El semigraben de Ameca está limitado al norte por la falla Ameca-Ahuisculco, la cual puede ser dividida en el segmento Ameca, con 34 km de longitud con una dirección de 80° a 110° y el segmento Ahuisculco, con 22 km de longitud y una dirección 160°-170°.

El semigraben de Zacoalco está limitado por la falla San Marcos de 20 km de longitud y dirección 160°-170°.

El Graben de Chapala, es una de las depresiones más notables del occidente de México su porción occidental está formado por las fallas Bola Vieja II, Chapala y Citala que buzan hacia el sur formado un sistema de bloques basculados hacia el norte; la porción oriental del Graben de Chapala está delimitado al sur por la falla Pajacuarán de dirección E-W y una inclinación de 70°, y al norte por la falla Ixtlán tiene una dirección general NW-SE y una longitud de unos 35 km, la continuidad de esta estructura esta evidenciada por las manifestaciones hidrotermales superficiales.

El Graben de Colima se considera como un sistema constituido por una falla principal denominada Techalutla y otras menores que limitan la depresión en su margen oriental y que progresivamente, hacia el norte, se unen con el semigraben de Citala.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el subsuelo en el área se encuentra conformado por tobas riolíticas (Oligoceno - Mioceno), fracturadas, permeabilidad secundaria, generalmente impermeable, espesor aproximado 400 m.

Ignimbritas de composición riolítica (Oligoceno – Mioceno), poco permeable, espesor aproximado 300 m. Arenas pumíticas, gravas y conglomerados (Oligoceno – Plioceno), permeable, espesor aproximado 50 m. Lavas, brechas y escorias de composición basáltica andesítica (Pleistoceno), permeables, espesor aproximado de 100 m. Gravas, arenas, limos y arcillas, suelos residuales (Reciente), espesor de 10 a 30 m (Carta Geológico-Minera F13-12 Guadalajara, Esc. 1:250,000 del SGM).

Tomando en cuenta lo anterior, se interpreta que la base del acuífero se encuentra limitada por un acuicludo, representado por Tobas riolíticas no fracturadas, sobre yaciéndolo un acuífero fracturado, acuitardo, representado por las ignimbritas de composición riolítica, de poco interés para ser explotado de forma intensiva.

Sobreyaciendolos se ubica un acuífero compuesto por arenas pumíticas, grava y conglomerados, de espesor reducido (50 m) y un acuífero fracturado, compuesto de lavas, brechas y escorias de composición basáltica andesítica; siendo este acuífero el de mayor explotación actualmente (200 m). El acuífero en algunas partes funciona como confinado y en otras como libre.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, el acuífero somero se distingue por gravas, arenas, limos y arcillas, suelos residuales. La profundidad del nivel freático oscila entre los 10 a 20 m. Las norias son los principales aprovechamientos que explotan estos horizontes.

Sin embargo, este acuífero superficial es limitado ya que tiene un espesor reducido (10-20 m) que no permite sustentar su explotación.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se llevaron a cabo 5 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Theis y Jacob-Cooper. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **3.52×10^{-5} a $3.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un valor promedio de **$1.76 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** , en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de **8.8×10^{-8} a $9.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$** con un valor promedio de **$4.4 \times 10^{-7} \text{ m/s}$** .

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

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en el 2010. De las 111 obras subterráneas, reportados en el censo, en 50 se reporta la profundidad al nivel piezométrico. La información indica un valor mínimo de 0.15 m en norias y máximo de 216.7 m.

La variación en los rangos de la profundidad al nivel piezométrico (0.15 a 216.7 m) es indicativo que se trata de un acuífero multicapa. De forma general los niveles registrados en norias y pozos con profundidades que van de los 0.15 a 16.7 m, corresponde a un acuífero somero. Los valores de la profundidad que oscilan entre los 68.0 – 216.7 m, corresponden a un acuífero profundo que funciona en partes como libre y otras como confinado.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de profundidad al nivel estático para 2010 (figura 3), se observa que los valores varían de 105 m, en la porción centro y noreste del acuífero; a 165 m, al sureste, hacia los límites con el acuífero Altos de Jalisco, lo cual refleja el comportamiento del acuífero profundo.

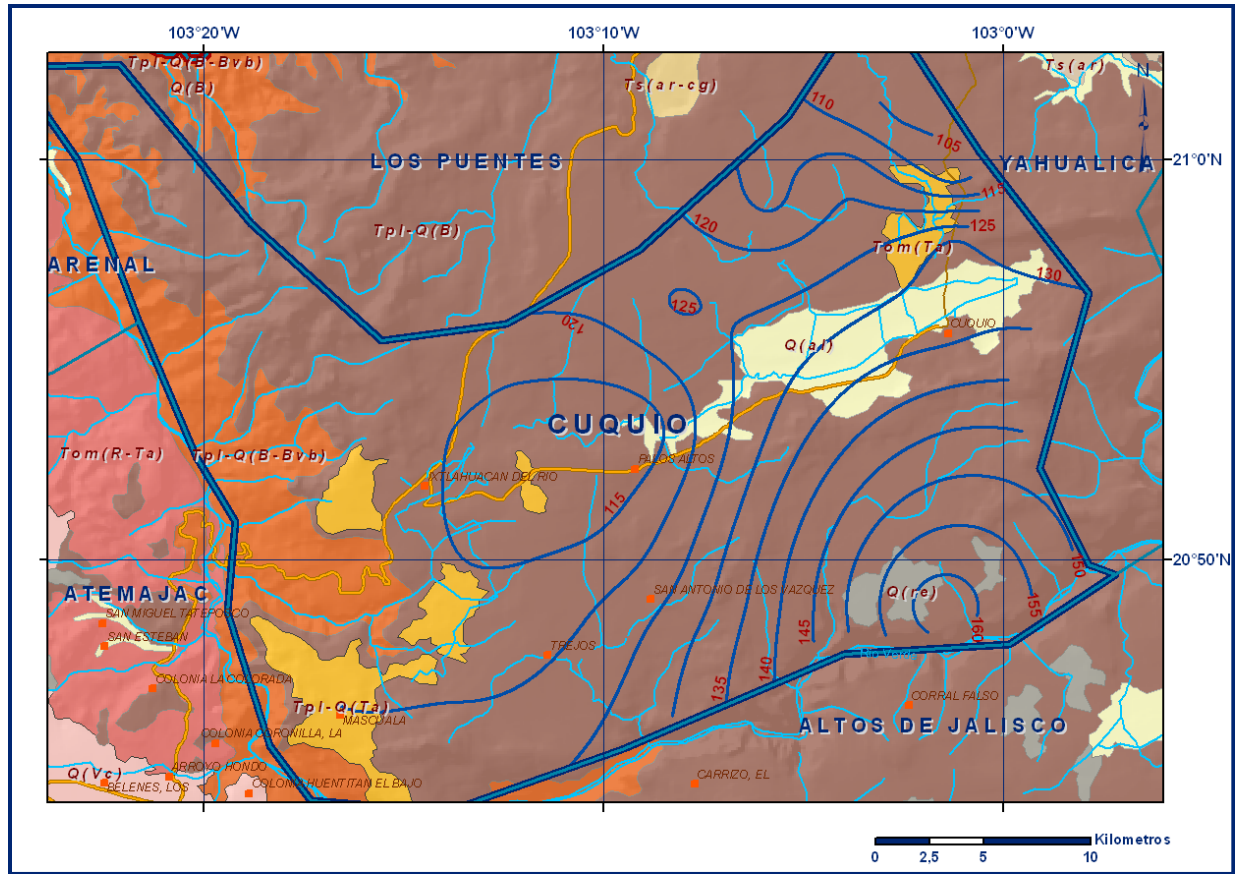


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático (figura 4), se observa que los valores varían entre 1,500 a 1,840 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo presenta una dirección preferencial norte-sur.

Los valores máximos se localizan al norte, en la zona de El Consuelo y San Juan del Monte y disminuyen de forma gradual en dirección sur, hasta llegar a la margen del río Verde; zona San Antonio de los Vázquez y Mascuala.

5.4.3 Evolución del nivel estático

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.

Las mediciones realizadas en 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 4 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, etc., para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 126 a 218 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.

En la porción norte del acuífero, la recarga está caracterizada por agua bicarbonatada-sódica y evoluciona a medida que se profundiza a bicarbonatada-cálcica hacia las zonas de descarga o salidas del flujo subterráneo, localizadas al sur del acuífero.

En términos de salinidad, las aguas subterráneas presentan valores bajos y pueden utilizarse para la mayor parte de los cultivos en los diferentes tipos de suelo, particularmente los que son poco tolerantes a la salinidad, en los diferentes tipos de suelo y prácticamente, sin riesgo que desarrollen salinidad, con excepción de suelos de muy baja permeabilidad.

El agua es baja en contenido de sodio y puede utilizarse en la mayoría de los suelos con escasas posibilidades de elevar las concentraciones de sodio intercambiable.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamiento realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 111 aprovechamientos, de los cuales 77 son pozos, 29 norias y 5 manantiales; de ellos 65 están activos (35 pozos, 25 norias y 5 manantiales) y 46 inactivos (42 pozos y 4 norias).

El volumen de extracción se ha estimado en **1.0 hm³ anuales**, de los cuales 0.9 hm³ (92.3%) se destinan para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 0.07 hm³ (7.3%) para la actividad pecuaria y los 0.004 hm³ restantes (0.4%) para satisfacer las necesidades de otros usos. Adicionalmente, de los manantiales censados, se descarga un caudal de **0.05 hm³**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para 2010. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

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

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

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

7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

Para este caso, el censo reporta que la mayoría de los pozos se utilizan para uso Público Urbano, por lo que solamente se considera la contribución por pérdidas de conducción.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Este término es uno de los que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con 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:

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

Donde:

Eh= Entrada por flujo subterráneo horizontal;

Rv= Recarga vertical;

Ri= Recarga inducida;

B= Bombeo;

Sh= Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ETR= Evapotranspiración;

Dm= Descarga a través de manantiales;

Dfb= Caudal base;

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas 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. Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al 2010, (figura 4). Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

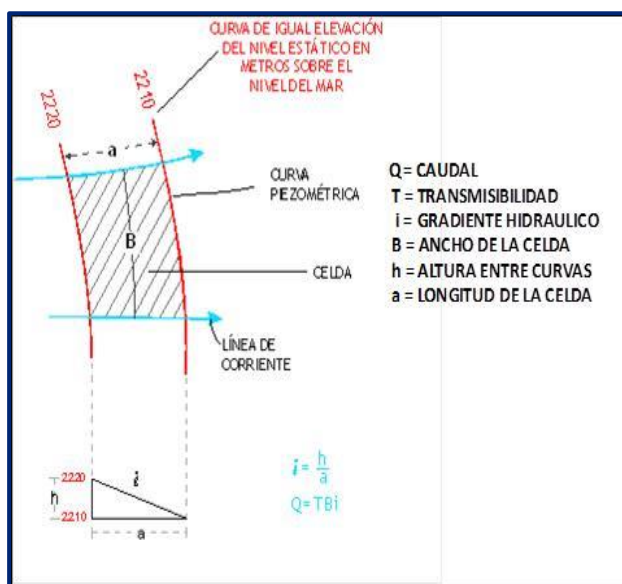
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m²/s)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

La recarga total del flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	6670	1667	20	0.012000	0.00017	0.0136	0.4
E2	3333	1481	20	0.013500	0.00017	0.0076	0.2
E3	7037	2037	20	0.009800	0.00017	0.0117	0.4
E4	5556	2037	20	0.009800	0.00017	0.0093	0.3
E5	3421	1360	20	0.014700	0.00017	0.0085	0.3
Total entradas							1.6

El volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **1.6 hm³/año**.

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

En el censo, se reporta que la mayoría de los pozos se utilizan para uso Público Urbano, por lo que solamente se considera la contribución por pérdidas de conducción.

El volumen destinado para el uso Público Urbano es de $0.89 \text{ hm}^3/\text{año}$, considerando que un 30% del volumen total utilizado retorna al acuífero por fugas en las redes de abastecimiento, la recarga resulta de $0.3 \text{ hm}^3/\text{año}$. El total de la Recarga inducida es de **$0.3 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2 Salidas

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

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **1.0 hm^3 anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de la elevación del nivel estático en 2010 (figura 4). Las celdas de salida se localizaron en la parte más baja del área de explotación.

El valor estimado para este año de análisis se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas subterráneas horizontales asciende a **$1.3 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($\text{hm}^3/\text{año}$)
S1	5171	1640	20	0.012200	0.00017	0.0107	0.3
S2	5200	1422	20	0.014100	0.00017	0.0125	0.4
S3	4522	1986	20	0.010100	0.00017	0.0078	0.2
S4	5548	1682	20	0.011800	0.00017	0.0111	0.4
Total entradas							1.3

7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con los aforos, el volumen promedio de descarga de los manantiales asciende a **0.05 hm^3 anuales**.

7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb)

El flujo base es una descarga de agua subterránea convertida en agua superficial como escurrimiento directo. El gasto base se calcula de acuerdo a la expresión siguiente:

$$Q_B = Q_0 K^t$$

Dónde:

Q_0 = Gasto inicial;

K = Conductividad hidráulica;

t = tiempo de estiaje;

La ecuación de gasto base requiere conocer además de un gasto inicial, un valor de conductividad y un tiempo de estiaje, la longitud de las corrientes perennes durante el periodo de estiaje. Son cuatro las corrientes superficiales con gasto base. El desarrollo total es de unos 66.7 km. En la tabla se muestra el desarrollo de cada una.

Corriente	Longitud (km)
Achichilco	37.1
San Pablo	13.9
Afluente del oeste (a)	7.8
Afluente del oeste (b)	7.8
Total	66.7

Con un valor de gasto inicial de 0.07 m³/s, en un periodo de 100 días de estiaje y una conductividad hidráulica de 0.905 m/s, para 66.7 km de corrientes perennes, se obtiene lo siguiente:

$$Q_B = Q_0 K^t$$

$$Q_B = 0.07 \times 0.905^{100} = 3.24 \times 10^{-6}$$

$$Dfb = (3.24 \times 10^{-6}) (66700) = 0.2158 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$Dfb = 6.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Se estima un flujo base, para 66.7 km de corrientes perennes en el periodo de estiaje, que asciende a **6.8 hm³/año**.

7.2.5 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

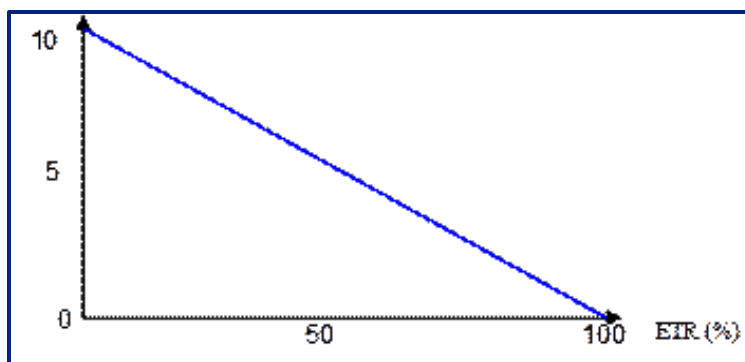
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

T (°C) =	15.3		
P(mm) =	877.62	P ² =	770216.864
L =	861.57885	L ² =	742318.115
ETR (mm)	630.5		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



Para realizar una estimación más real del valor de la evapotranspiración, se tomará en cuenta únicamente la evapotranspiración del agua freática que se produce durante los meses de estiaje que es cuando el agua se transfiere del subsuelo a la atmósfera por el proceso de evapotranspiración, y durante el periodo de lluvias, el agua susceptible de evapotranspirarse es la que queda almacenada en la superficie, sobre todo en depresiones del terreno, antes de infiltrarse al subsuelo.

Configurando las profundidades del nivel estático, se identifican dos áreas con un valor de 0 a 5 m de profundidad. Sin embargo, es preciso indicar que, en 2010, se registraron lluvias intensas lo que ocasionó que a nivel local se registrarán niveles someros.

En la tabla 4, se muestran los porcentajes respecto al volumen evapotranspirado, para las diferentes profundidades.

Tabla 4. Volumen evapotranspirado respecto al porcentaje estimado

Intervalo curvas (m)	Profundidad considerada (m)	Area (km ²)	ETR (m)	%	Vol ETR (hm ³ /año)
0 - 1	0.5	0.285	0.6305	0.95	0.17
1 - 2	1.5	1.846	0.6305	0.85	0.99
2 - 3	2.5	0.769	0.6305	0.75	0.36
3 - 4	3.5	0.348	0.6305	0.65	0.14
4 - 5	4.5	2.603	0.6305	0.55	0.90
5	5.0	2.600	0.6305	0.50	0.82
TOTAL					3.4

De acuerdo a lo anterior, se estima que el valor de la evapotranspiración promedio anual para 2010 es de **3.4 hm³**.

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

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

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero. Por lo tanto, para fines del balance $\Delta V(S) = 0$.

Solución de la ecuación de balance

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

$$R_v = Sh + B + ETR + D_m + D_{fb} - E_h - R_i \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

$$R_v = 1.3 + 1.0 + 3.4 + 0.05 + 6.8 - 1.6 - 0.3 + 0.0$$

$$R_v = 10.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 10.6 + 1.6 + 0.3$$

$$R = 12.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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 **12.5 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 el caso del acuífero Cuquío se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de 2.1 hm³ anuales, de los cuales 0.4 hm³ corresponden al 30% de las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero Altos de Jalisco, 1.0 hm³ al 30% de la evapotranspiración que debe comprometerse para preservar el ecosistema, 0.05 hm³ a la salida a través de manantiales y 0.68 hm³ al 10% de las salidas por caudal base. Por lo tanto, **DNC = 2.1 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 **12,556,225 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 12.5 - 2.1 - 2.156225 \\ \text{DMA} &= \text{hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **2,156,225 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2010. Estudio de Actualización Geohidrológica de los acuíferos Valle de Guadalupe, Cuquío, Tequila, Jalostotitlán y Colotlán, en el estado de Jalisco. Realizado por el Instituto Mexicano de tecnología del Agua.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1981. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en la zona de Acatic, Tepatitlán y Arandas, Jalisco. Realizado por la Compañía Geólogos Consultores, S.A.