

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Hércules (0516), Estado
de Coahuila***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

| CCCLX REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "CUENCAS CENTRALES DEL NORTE" | | R | DNCOM | VCAS | VEXTET | DAS | DÉFICIT |
|---|----------|--|-------|----------|--------|----------|----------|
| CLAVE | ACUÍFERO | CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES | | | | | |
| ESTADO DE COAHUILA | | | | | | | |
| 0516 | HÉRCULES | 5.5 | 0.1 | 0.450980 | 0.5 | 4.949020 | 0.000000 |

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN
EL ACUÍFERO HÉRCULES (0516), ESTADO DE COAHUILA***

México, D.F. Diciembre 2010

CONTENIDO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | GENERALIDADES | 1 |
| | Antecedentes | 1 |
| 1.1. | Localización | 1 |
| 1.2. | Situación administrativa del acuífero | 3 |
| 2. | ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD | 4 |
| 3. | FISIOGRAFÍA | 4 |
| 3.1. | Provincias fisiográficas | 4 |
| 3.2. | Clima | 5 |
| 3.3. | Hidrografía | 5 |
| 3.4. | Geomorfología | 5 |
| 4. | GEOLOGÍA | 6 |
| 4.1. | Estratigrafía | 8 |
| 4.2. | Geología estructural | 10 |
| 4.3. | Geología del subsuelo | 10 |
| 5. | HIDROGEOLOGÍA | 11 |
| 5.1. | Tipo de acuífero | 11 |
| 5.2. | Parámetros hidráulicos | 11 |
| 5.3. | Piezometría | 12 |
| 5.4. | Comportamiento hidráulico | 12 |
| 5.4.1. | Profundidad al nivel estático | 12 |
| 5.4.2. | Elevación del nivel estático | 12 |
| 5.4.3. | Evolución del nivel estático | 12 |
| 5.5. | Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea | 15 |
| 6. | CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA | 15 |
| 7. | BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS | 15 |
| 7.1. | Entradas | 16 |
| 7.1.1. | Recarga vertical (Rv) | 16 |
| 7.1.2. | Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) | 17 |
| 7.2. | Salidas | 18 |
| 7.2.1. | Bombeo (B) | 18 |
| 7.2.2. | Descarga por manantiales (Dm) | 18 |
| 7.3. | Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ | 19 |
| 8. | DISPONIBILIDAD | 19 |
| 8.1. | Recarga total media anual (Rt) | 20 |
| 8.2. | Descarga natural comprometida (DNCOM) | 20 |
| 8.3. | Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS) | 20 |
| 8.4. | Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS) | 20 |
| 9. | BIBLIOGRAFÍA | 21 |

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA).

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 Hércules, definido con la clave 0516 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción centro-occidental del estado de Coahuila, entre los paralelos 27° 19' y 28° 0' de latitud norte y los meridianos 103° 34' y 103° 57' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 1878 km².

Colinda al este con el acuífero Laguna el Guaje; al sur con Laguna del Rey-Sierra Mojada, pertenecientes al estado de Coahuila; al oeste con Laguna de Jaco y con Rancho Denton, pertenecientes al estado de Chihuahua (figura 1).

Geopolíticamente, el acuífero Hércules se encuentra totalmente contenido dentro del municipio Sierra Mojada y una pequeña porción al suroeste pertenece al municipio Jiménez.

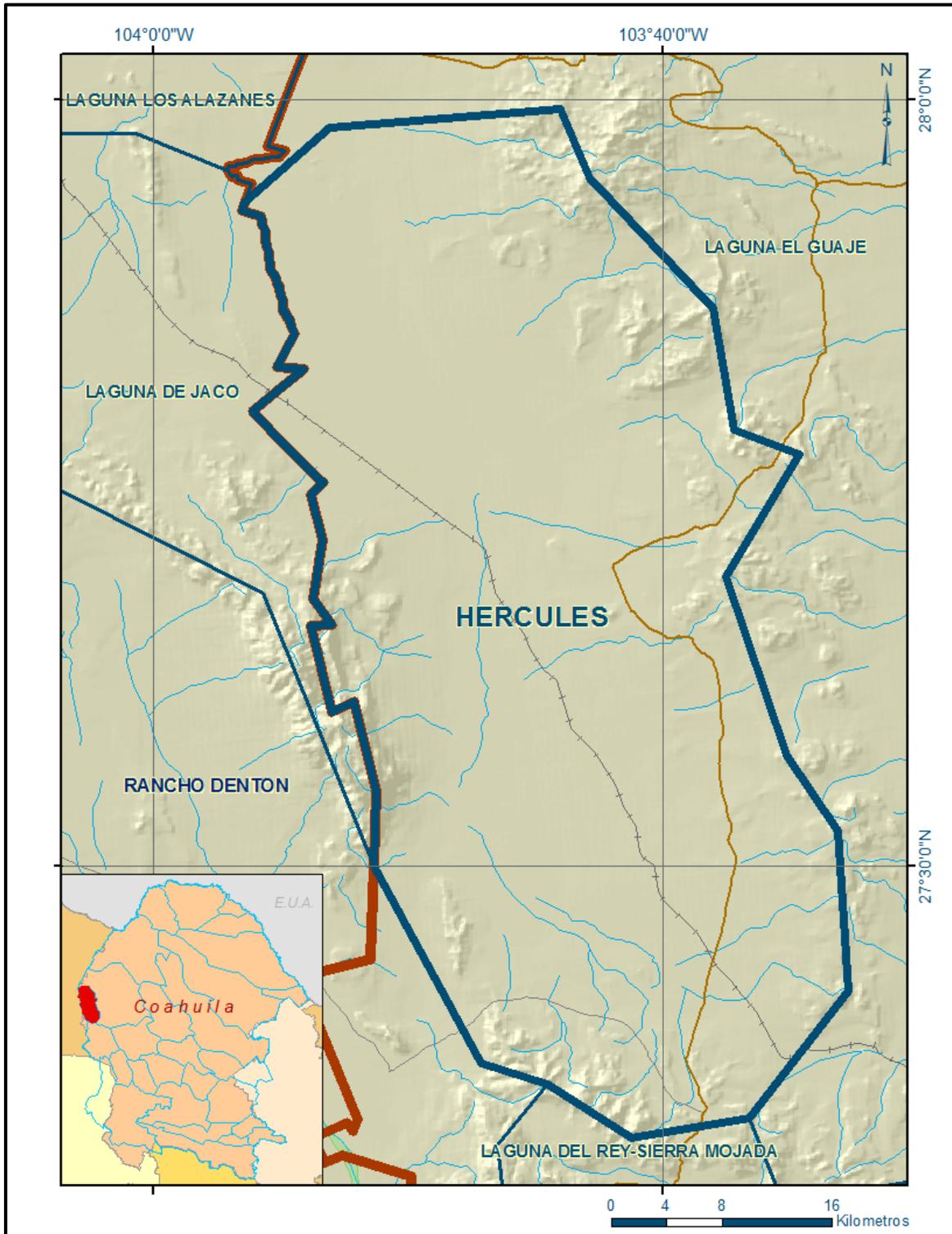


Figura 1. Localización del acuífero

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 0516 HERCULES | | | | | | | |
|------------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|----------------------------------|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | | OBSERVACIONES |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | |
| 1 | 103 | 51 | 21.9 | 27 | 29 | 59.9 | del 1 al 2 por el límite estatal |
| 2 | 103 | 56 | 24.3 | 27 | 55 | 57.7 | |
| 3 | 103 | 53 | 3.7 | 27 | 58 | 53.7 | |
| 4 | 103 | 44 | 3.0 | 27 | 59 | 37.0 | |
| 5 | 103 | 42 | 54.2 | 27 | 56 | 57.0 | |
| 6 | 103 | 38 | 4.2 | 27 | 51 | 47.6 | |
| 7 | 103 | 37 | 15.5 | 27 | 47 | 3.0 | |
| 8 | 103 | 34 | 41.4 | 27 | 46 | 6.8 | |
| 9 | 103 | 37 | 34.7 | 27 | 41 | 19.6 | |
| 10 | 103 | 35 | 10.9 | 27 | 34 | 19.6 | |
| 11 | 103 | 33 | 11.6 | 27 | 31 | 22.1 | |
| 12 | 103 | 32 | 44.7 | 27 | 25 | 7.6 | |
| 13 | 103 | 36 | 39.0 | 27 | 20 | 8.5 | |
| 14 | 103 | 41 | 14.8 | 27 | 19 | 21.7 | |
| 15 | 103 | 44 | 32.7 | 27 | 21 | 26.3 | |
| 16 | 103 | 47 | 7.5 | 27 | 22 | 17.0 | |
| 1 | 103 | 51 | 21.9 | 27 | 29 | 59.9 | |

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Hércules pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Coahuila. En el territorio completo del acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2010, el municipio Sierra Mojada se clasifica como zona de disponibilidad 6 y Jiménez como zona de disponibilidad 3.

El principal uso es el doméstico. En el territorio que cubre 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

En el territorio que comprende el acuífero sólo se ha realizado un estudio hidrogeológico de evaluación que abarca su superficie completa, además de otros estudios en acuíferos vecinos, denominado:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS SANTA FE DEL PINO, HÉRCULES, LAGUNA EL GUAJE, LAGUNA EL COYOTE, ACATITA, LAS DELICIAS, SERRANÍA DEL BURRO Y VALLE DE SAN MARCOS, EN EL ESTADO DE COAHUILA; elaborado mediante convenio con el Instituto del Agua del Estado de Nuevo León, para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 2010. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, conocer su funcionamiento hidrodinámico y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Como parte de sus actividades de campo incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos.

Este estudio fue 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. Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el acuífero Hércules se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte. Se encuentra limitado al oriente, poniente y sur, por sierras alargadas orientadas NW-SE, al poniente por rocas sedimentarias del Cretácico y al oriente por elevaciones topográficas constituidas principalmente por rocas ígneas del Terciario y Cuaternario.

Por otro lado, según el INEGI, el acuífero pertenece a la Provincia Fisiográfica de las Sierras y Llanuras del Norte y a la subprovincia de las Llanuras y Sierras Volcánicas, donde se encuentran en abundancia Xerosoles y Yermosoles, que son suelos típicamente localizados en zonas con clima seco o semiseco. En sierras que ocupan una buena parte de la subprovincia, dominan los suelos someros de colores claros (Litosol y Regosol), en sus partes más bajas, estas sierras presentan suelos de color pardo amarillento (Xerosoles) y suelos negros calcáreos y poco profundos de textura fina (Rendzinas).

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 predominante para la zona del acuífero Hércules corresponde a un tipo muy seco, semicálido y con lluvias en verano (BW_{hw}). Hacia las elevaciones topográficas de la Sierra Cruces (al noreste), la Sierra Almagre (al poniente) y la Sierra Mojada (al sur), el clima cambia al tipo BS₀kw y BS₁kw que se clasifica como seco y semiseco, templado y con lluvias en verano que alcanzan entre el 5 y el 10.2 % de la precipitación anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 1 estación climatológica, que tienen influencia en el área del acuífero: Sierra Mojada, cuyo registro comprende un periodo de 30 años. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **290 mm** y **19 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2500 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos periodos de ocurrencia uno de mayo a octubre, cuando se registran los valores más altos, y otro de noviembre a abril, con precipitaciones menos significativas. Hacia la planicie la precipitación media anual en el área del acuífero es de 300 mm y se incrementa hasta 400 mm en las sierras que lo limitan. En cuanto a la distribución anual de la temperatura media mínima y máxima, en el periodo de lluvias, es de 15 y 30 °C respectivamente, mientras que en el periodo de estiaje es de 6 y 21 °C.

3.3. Hidrografía

El acuífero Hércules se encuentra ubicado dentro de la Región Hidrológica 35 Mapimí, no presenta corrientes o almacenamientos perennes, se caracteriza por su aridez y la ausencia casi total de elevaciones importantes. Todas las cuencas que lo conforman son endorreicas. En toda la región los índices de escurrimiento superficial son muy bajos.

3.4. Geomorfología

En la zona comprendida por el acuífero se distinguen 3 principales unidades geomorfológicas:

a) Sierras anticlinales: corresponden a elevaciones topográficas alargadas con una orientación NNW-SSE, formadas principalmente por pliegues anticlinales en rocas calcáreas Cretácicas. Entre las que se encuentran la Sierra Almagre, la Sierra Las Mariquitas, la Sierra Planchada y la Sierra Mojada, todas ellas formando el límite poniente y sur del acuífero. Las pendientes son fuertes llegando a formar acantilados. Alcanza hasta 2490 msnm. Sobre sus flancos orientales, se presentan

arroyos intermitentes que vierten sus aguas hacia el centro del valle. Los escurrimientos se pierden en el momento de llegar al valle.

b) Sierras Ígneas: el límite oriental del acuífero, se encuentra constituido por elevaciones topográficas correspondientes a roca ígneas en su mayoría extrusivas. Presentan formas redondeadas, se elevan entre 1800 y 2100 msnm mientras que el valle se encuentra a 1250 msnm.

c) Llanos: Corresponde a una extensa planicie ubicada en la porción central del área, limitadas al oriente, poniente y sur por sierras. En épocas de lluvias, se forman escurrimientos que circulan de sur a norte desde la Sierra Planchada y que circulan hasta el centro-poniente de la planicie, donde se llega a formar la laguna intermitente La Colorada. Hacia el norte, los escurrimientos se pierden en el extenso llano en cuya porción centro-occidental se forman zonas planas de inundación ocasional en temporadas de lluvias extraordinarias. Esta planicie presenta ligera pendiente del este al oeste; los escurrimientos ocasionales circulan hacia el norte; se eleva a 1250 msnm.

4. GEOLOGÍA

La geología regional de la zona está representada básicamente por rocas sedimentarias marinas y continentales. La geología de la zona incluye formaciones del Cretácico Inferior (La Virgen, Cupido, La Peña y Aurora), del Cretácico Superior (Eagle Ford/Boquillas y Austin), así como sedimentos continentales del Terciario y Cuaternario (Conglomerados, aluviones y eólicos). Complementan la columna, rocas ígneas principalmente extrusivas y en menor proporción intrusivas. La distribución de las diferentes unidades litológicas en la zona del acuífero se presenta en la figura 2.

En el área afloran yesos y calizas de la Formación La Virgen, sobreyaciendo de manera concordante a esta, se tienen calizas de plataforma en estratos medianos a gruesos de la Formación Cupido sobreyacida concordantemente por la Formación La Peña, ampliamente distribuida dentro del área, constituida por calizas arcillosas y lutitas calcáreas, cuyo contacto superior es concordante con los estratos gruesos a medianos de caliza y dolomía de la Formación Aurora. Cubren concordantemente a la Formación Aurora, lutitas con intercalaciones delgadas de calizas arcillosas, pertenecientes a la Formación Kiamichi, la que se encuentra sobreyacida concordantemente por calizas de las formaciones Georgetown-Salmon Peak, que a su vez está concordantemente sobreyacida por el Grupo Washita compuesto por calizas y lutita.

Sobreyacen concordantemente lutitas y calizas delgadas de la Formación Eagle Ford, en cuyo contacto superior suprayace una alternancia rítmica de lutitas y calizas fuertemente fosilíferas, con aislados horizontes de caliza arcillosa de la Formación Austin; la cual está cubierta concordantemente por areniscas de la Formación Upson.

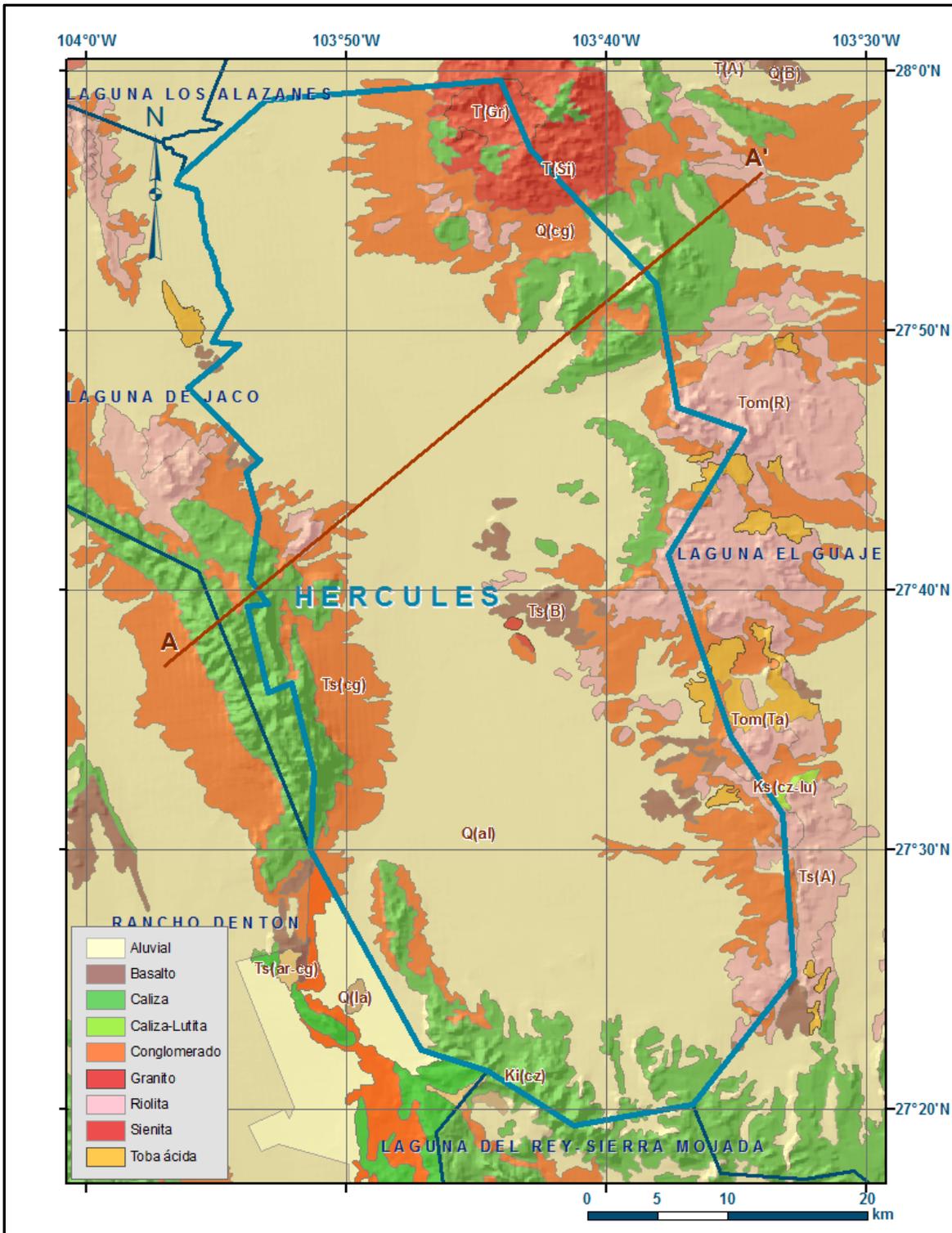


Figura 2. Geología general del acuífero

Cubriendo a las unidades anteriores se observa un conglomerado polimíctico de posible edad Eoceno-Oligoceno de la Formación Ahuichila. Discordantemente al paquete de rocas sedimentarias, afloran una serie de rocas volcánicas, como flujos piroclásticos, toba riolítica e ignimbrita, riolita,

derrames de andesita y toba andesítica, paquetes de conglomerado oligomíctico, basalto y andesita, estas últimas pertenecientes al campo Volcánico Camargo, en donde se han reportado edades de 1.8 Ma.

Hacia la zona norte, en la Sierra de Cruces, aflora un cuerpo intrusivo de composición granito-diorita con edad estimada del Oligoceno, que afecta a las formaciones Cupido, Aurora y Kiamichi; generando rocas metamórficas de contacto.

En la parte oriental se encuentra una unidad de conglomerado polimíctico de edad cuaternaria, así como mesetas de basalto probablemente de la misma edad. Las unidades recientes en esta zona, están conformadas por, depósitos conglomeráticos polimícticos, lacustres, eólicos, aluviales de planicie y aluviales de río.

4.1. Estratigrafía

La columna estratigráfica, consiste de un basamento de composición granítica-granodiorítica, con edades de 266 a 211 Ma sobre el que se depositan unidades sedimentarias del Cretácico con cambios laterales de facies al poniente del área, constituida por rocas calizas, lutitas, areniscas, andesitas y conglomerados, cuyo registro estratigráfico comprende edades que van del Cretácico Inferior (Barremiano) al Reciente (Carta Geológica-Minera G13-3 "Ocampo" Esc. 1:250,000, SGM, 2008). La columna estratigráfica presente en la zona se describe a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente:

Formación La Virgen: Conformada de forma general por yeso y caliza. En la mayoría de los sitios donde se encuentra, ha sido subdividida en tres miembros. Llega a presentar espesores entre 449 y 535 metros. La unidad inferior tiene 162 metros y está formada por una alternancia de capas de yeso y calizas de textura fina con fragmentos de conchas. La unidad intermedia consiste de 43 metros de calizas de textura gruesa con fragmentos de moluscos y un pequeño intervalo de yesos en su parte intermedia. En la unidad superior predomina el yeso.

Formación Cupido: La Formación Cupido es una unidad geológica común en el norte de México que, junto con la Formación Aurora, constituyen los núcleos de las principales sierras. Presenta un espesor variable. La parte baja de esta formación, consiste de caliza de textura fina, calcarenita y calcilutita en estratos gruesos. Arriba del cuerpo de calizas, se encuentran 80 metros de lutitas interestratificadas con calizas criptocristalinas que pasan a caliza de textura de calcarenita. Estas calizas incluyen oolitas y fragmentos de conchas. Los 170 metros superiores de esta sección corresponde a oolitas y calcarenitas con fragmentos de moluscos.

Formación La Peña: Consiste básicamente de lutita fisil negra, que alterna con calizas de estratificación delgada y media de color gris oscuro a negro. La edad de la Formación La Peña corresponde al Aptiano Tardío. El medio sedimentario en el cual se llevó a cabo la depositación de esta formación, correspondió a un mar abierto y en una zona relativamente profunda. La coloración negra de las lutitas con abundante materia orgánica y en ocasiones la presencia de pirita, indica que la sedimentación se efectuó en condiciones reductoras y sin la influencia de procesos mecánicos.

Le sobreyacen 10 metros de calizas arcillosas con interestratificaciones de lutitas y lutitas calcáreas. Continúa hacia arriba con 82 metros de lutitas calcáreas con interestratificaciones de calizas arcillosas lajeadas a laminares. Se aprecian estratos de limolitas asociadas a las lutitas. Generalmente esta unidad se encuentra cubierta por depósitos de talud.

Formación Aurora: La distribución de esta unidad es amplia, ya que generalmente se encuentra formando las principales masas montañosas de la región. Consiste básicamente de caliza con textura mudstone a wackestone gris, en estratos gruesos y medios, aunque también se llegan a presentar estratos delgados y masivos. Contiene, aunque no de forma abundante, pedernal, cristales de pirita y nódulos ferruginosos. Hacia la parte norte, esta unidad cambia de facies con las Formaciones Del Carmen y Glen Rose.

Su posición estratigráfica sobre la Formación La Peña del Aptiano Tardío y bajo la Formación Kiamichi del Albiano Tardío, la sitúa en el Albiano Medio. Por su composición litológica y contenido faunístico, se considera que esta Formación se depositó en un ambiente de aguas marinas profundas y baja energía hidráulica.

Formación Kiamichi: Consiste de lutitas calcáreas gris obscuro, que intemperizan a tonalidades verdosas, las cuales se observan interestratificadas con caliza de textura mudstone y wackestone nodulares, de color gris claro a gris oscuro y de estratificación delgada a media. En su parte media presenta un cuerpo calcáreo constituido por caliza de textura mudstone de fragmentos biógenos. Una característica importante de esta unidad es su abundancia de fauna, principalmente de amonitas, equinodermos, pelecípodos y gasterópodos. También presenta microorganismos básicamente plantónicos y abundantes concreciones de marcasita y fierro.

Su edad corresponde a la parte superior del Albiano Medio y gran parte del Albiano Tardío. Los sedimentos se depositaron en un ambiente de mar abierto, de aguas relativamente profundas y de poca energía hidráulica.

Conglomerado Terciario: Corresponde a depósitos continentales, principalmente conglomerados poco cementados, producto del transporte y sedimentación de detritos erosionados de las partes altas y generalmente depositados en los pies de monte de las sierras. En el norte del Estado de Coahuila

se le define como Conglomerado Sabinas y en el suroeste como Conglomerado Ahuichila. El espesor que se le ha calculado es de 30 m. Sobreyace discordantemente a las formaciones del Cretácico Superior y de acuerdo con su posición estratigráfica se le ha asignado una edad de Mioceno-Plioceno.

Rocas ígneas extrusivas: Principalmente en las elevaciones topográficas del oriente del acuífero, se encuentran extensos afloramientos de rocas ígneas extrusivas, tanto del tipo de andesitas, como tranquiandesitas, riolitas y basaltos.

Rocas ígneas intrusivas: El principal cuerpo intrusivo de la zona corresponde a la Sierra Las Cruces, al noreste del acuífero y junto al poblado minero de Hércules. Corresponde principalmente a un intrusivo (cuarzomonzonita y riolita) y en menor proporción a rocas extrusivas de composición traquiandesítica, riolítica y basáltica.

Cuaternario: Los sedimentos continentales del Cuaternario se encuentran extensamente distribuidos en el área, consisten en aluviones depositados en piedemonte y en planicies de inundación. Los primeros son principalmente conglomerados y arenas, en cambio los últimos están formados de limos, arcillas y evaporitas. Se encuentran ocupando las partes bajas, los flancos de las sierras y los valles. Solamente hacia los cauces de los arroyos que bajan de las sierras, se llegan a encontrar espesores relativamente mayores de aluvión, principalmente de tipo fluvial. Hacia la parte baja de la planicie, sobre el flanco poniente, se encuentran sedimentos finos intercalados con evaporitas.

4.2. Geología estructural

Desde fines del Cretácico al Eoceno, la Orogenia Laramide plegó a toda la columna sedimentaria, formando una serie de estructuras sinclinales y anticlinales, afectadas por fallas inversas, características de esfuerzos compresionales. La orientación NW-SE de los pliegues sugiere que los esfuerzos principales provienen del SW a NE. Los principales pliegues anticlinales se encuentran al Sur de la Sierra de Cruces.

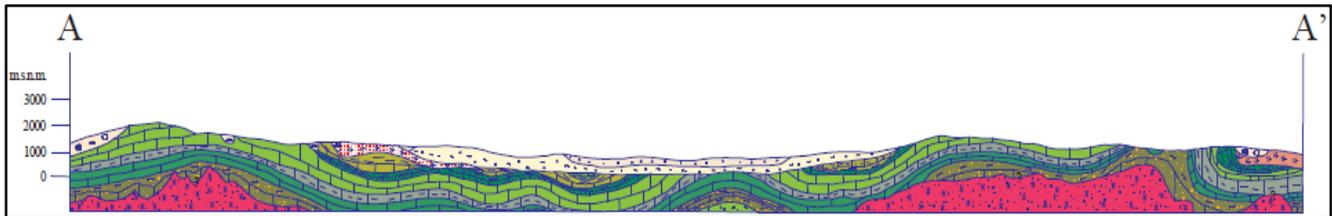
La fase tectónica tardía en el norte de México se distingue por dos características principales que son los pliegues de curvatura amplia y las fallas transcurrentes orientadas N-S.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de cortes litológicos de algunos pozos, geofísica y de geología superficial recabada en el acuífero, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variable y conglomerados, de permeabilidad media a alta, que constituyen las extensas planicies y los piedemonte, cuyos

espesores al centro de los valles es de varios cientos de metros. La porción inferior está conformada por rocas sedimentarias como calizas, calizas arcillosas y lutitas calcáreas de las formaciones La Virgen, Cupido, La Peña y Aurora, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, que constituyen horizontes acuíferos profundos que no han sido explorados en la zona.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias al desaparecer el fracturamiento, así como las rocas volcánicas extrusivas, los intrusivos y los productos de metamorfismo de contacto que produjo su intrusión (calizas marmorizadas, skarns y hornfels) (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-3 "Ocampo" Esc. 1:250,000 (SGM, 2008)

Figura 3. Sección Geológica Esquemática

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 vertical como horizontal, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, producto de la erosión de las rocas que constituyen las sierras que delimitan las planicies, cuyo espesor puede alcanzar varios metros en el centro del valle, localizado en las partes bajas de los valles, en el que el agua que circula por arcillas, gravas y arenas de permeabilidad media y baja.

En el área que comprende el acuífero, existe un parteaguas subterráneo que provoca la formación de dos flujos, uno con dirección al norte y otro con dirección al sur. Se debe aclarar que para el caso del acuífero Hércules, debido a los pocos aprovechamientos y valores obtenidos las curvas generadas son inferidas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en 2010 se realizaron 4 pruebas de bombeo tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de la interpretación de dichas pruebas se obtuvieron valores de transmisividad que varían entre 0.08×10^{-3} y $3.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ para los materiales probados.

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 año 2010.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De la configuración de profundidad al nivel estático para el 2010, mostrada en la figura 4, se puede observar que los niveles piezométricos varían entre 20 y 60 m para la parte norte del acuífero, algunas norias sobre el flanco noreste del acuífero tienen niveles alrededor de 10 m; en la parte sur, las profundidades medidas varían de 60 a 100 m.

Debido a la existencia de pocos aprovechamientos de apoyo para la elaboración de la configuración al nivel estático y a que la extensión del acuífero es grande, las curvas son inferidas en su mayor parte.

5.4.2. Elevación del nivel estático

Con los escasos valores piezométricos existentes en este acuífero, se trazó la configuración de la elevación del nivel estático (inferida). La curva más alta se encuentran en la parte noreste del acuífero (1,300 msnm) y disminuyen hacia el centro del valle. Existe un parteaguas subterráneo que provoca la formación de dos flujos, uno con dirección al norte y otro con dirección al sur (figura 5).

5.4.3. Evolución del nivel estático

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

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

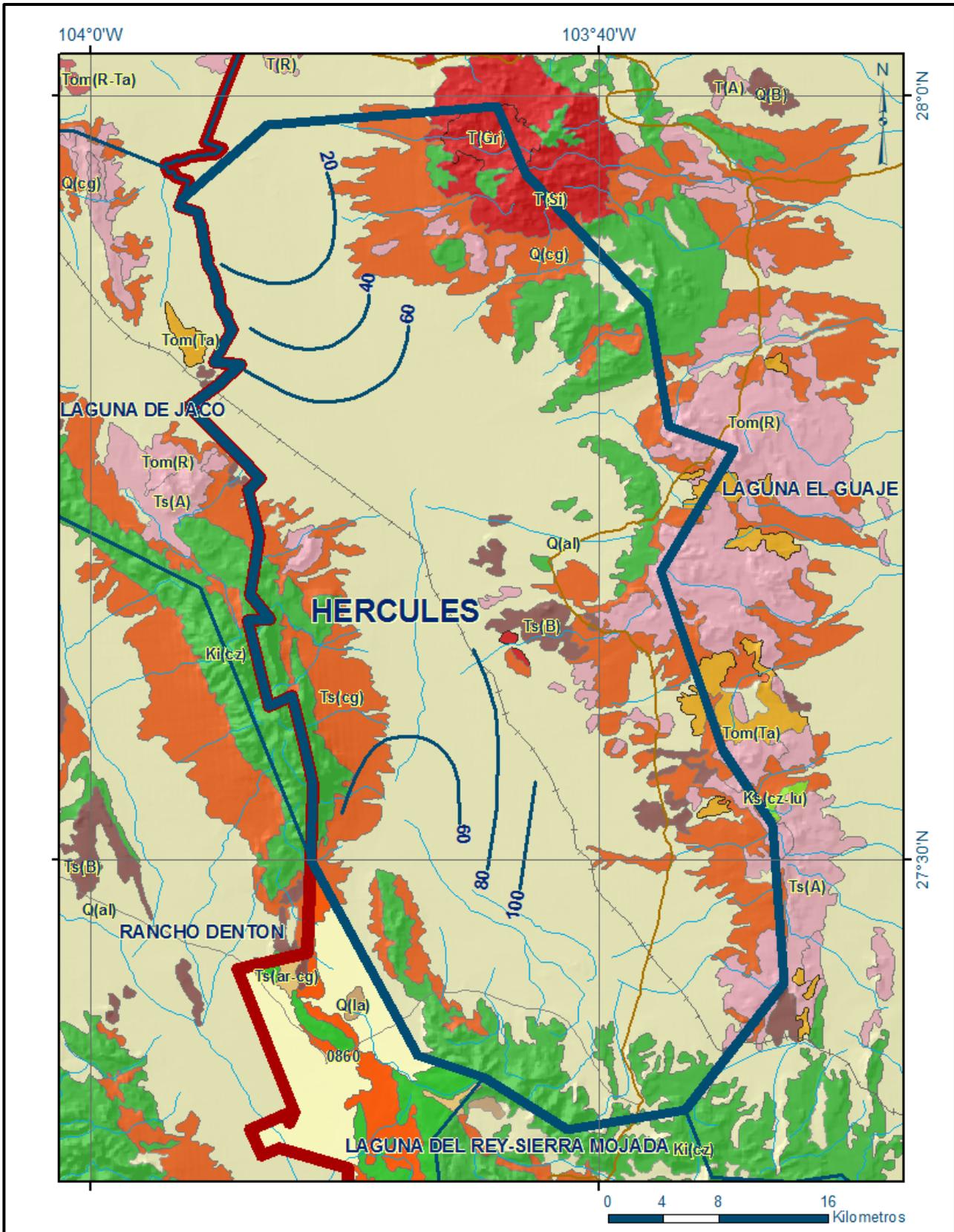


Figura 4. Profundidad al nivel estático en metros (2010)

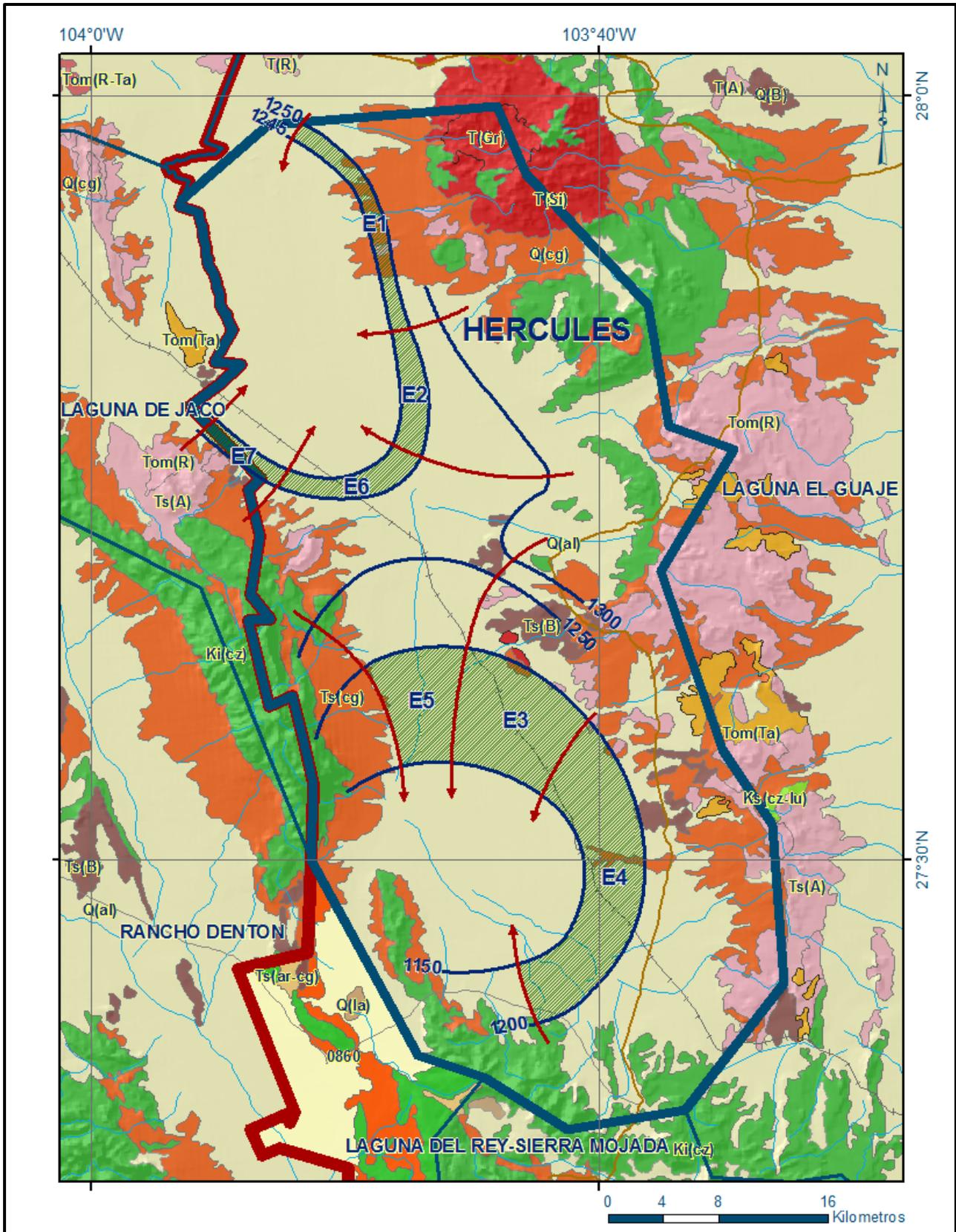


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 7 muestras de agua subterránea en diferentes aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros de pH, temperatura, conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sólidos totales disueltos, alcalinidad, dureza de calcio, dureza de magnesio y dureza total, arsénico, etc., para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

Las concentraciones de los diferentes iones y elementos de algunas muestras sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD), se encuentran en concentraciones muy bajas en 2 aprovechamientos (470 a 517 mg/l), en otras 2 captaciones se detectaron concentraciones “medias” (1,217 y 1,511 mg/l) y en 3 sitios se presentan concentraciones altas (2,143 a 4,866 mg/l). De manera general se observa que las concentraciones se incrementan desde la zona de recarga, que constituyen las estribaciones de las sierras que delimitan las planicies, hacia la zona de los valles, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo que presenta una red concéntrica en ambas zonas.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificaron 2 familias dominantes: sulfatada (en 3 muestras) y bicarbonatada (en 4 muestras), en las que predomina el sodio por parte de los cationes.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2010, se identificaron un total de 35 aprovechamientos; de los cuales 18 son pozos, 16 son norias y sólo 1 manantial. Del total de aprovechamientos censados 33 se encuentran activos y los otros 2 fuera de operación.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **0.5 hm³ anuales**. El principal uso que se le da al agua obtenida de los aprovechamientos activos es Doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se definió, para el 2010, en una superficie de 1230 km², que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localizan los escasos aprovechamientos de agua subterránea.

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

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

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 definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga vertical (Rv) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos, 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) como recarga por retorno de riego (Rr).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

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 en valor nulo de las salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical;

Eh: Entradas subterráneas por flujo horizontal;

B: Bombeo;

Dm: Descarga a través de manantiales;

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

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

La recarga del acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre las zonas topográficamente más altas del área de estudio y por la infiltración de los escurrimientos superficiales. El agua se infiltra por las fracturas de las rocas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 5. 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:

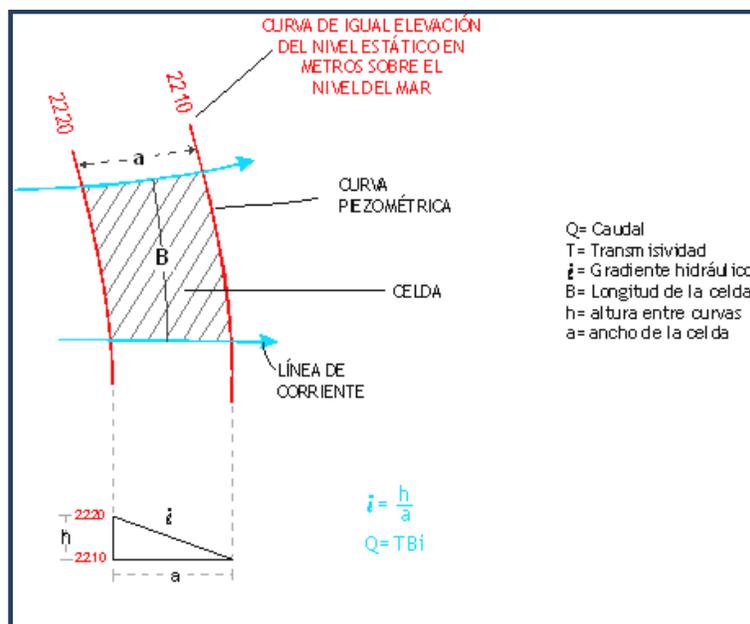
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo (m);

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$);

T: Transmisividad en el canal de flujo (m^2/s);



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En las tablas 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

Tabla 2. Calculo de entradas por flujo subterráneo (2010)

| CELDAS | ANCHO a | LARGO B | h2-h1 | GRADIENTE | TRANSMISIVIDAD | CAUDAL | VOLUMEN |
|--------|---------|---------|-------|------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | (m) | (m) | (m) | HIDRAULICO | (T) | Q=TBi | hm ³ /año |
| | | | | (i) | m ² /s | m ³ /s | |
| E-1 | 1230 | 17640 | 5 | 0.0041 | 0.0005 | 0.035854 | 1.1 |
| E-2 | 2050 | 9025 | 5 | 0.0024 | 0.0003 | 0.006604 | 0.2 |
| E-3 | 8200 | 9435 | 50 | 0.0061 | 0.0003 | 0.017259 | 0.5 |
| E-4 | 4510 | 21740 | 50 | 0.0111 | 0.0003 | 0.072306 | 2.3 |
| E-5 | 8615 | 5330 | 50 | 0.0058 | 0.0003 | 0.009280 | 0.3 |
| E-6 | 2050 | 11490 | 5 | 0.0024 | 0.0003 | 0.008407 | 0.6 |
| E-7 | 1640 | 6975 | 5 | 0.0030 | 0.0005 | 0.010633 | 0.3 |
| | | | | | | TOTAL | 5.4 |

El volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **5.4 hm³/año**.

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron de los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y descarga a través de manantiales (Dm). No existe evapotranspiración (ETR) de niveles freáticos someros, ni información para estimar el flujo base en ríos.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **0.5 hm³ anuales**.

7.2.2. Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo realizado en el 2010, existe un manantial dentro de la zona. El volumen de descarga estimado asciende a **0.1 hm³/año**.

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 histórica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo largo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es aún menor a la recarga que recibe el acuífero, no se tiene la presencia de 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. Sin embargo con la información disponible y por correlación con el acuífero vecino Laguna El Guaje, es posible determinar la variación promedio de los niveles del agua subterránea en la zona del acuífero para el balance de aguas subterráneas. De esta manera, para la zona de balance, cuya superficie es de 1230 km², su recuperación promedio anual estimada es de 0.2 m. Tomando en cuenta un coeficiente de almacenamiento de 0.02, se tiene:

$$\Delta V(S) = 1230 \text{ km}^2 (0.2 \text{ m}) (0.02) = 4.9 \text{ hm}^3$$

Por lo tanto, el cambio de almacenamiento del acuífero es $\Delta V(S) = 4.9 \text{ hm}^3$ anuales.

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:

$$\begin{aligned} Rv &= \pm \Delta V(S) + B + Dm - Eh & (2) \\ Rv &= 4.9 + 0.5 + 0.1 - 5.4 \\ Rv &= 0.1 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (R_t), que es la suma de todas las entradas es:

$$\begin{aligned} R_t &= Rv + Eh \\ R_t &= 0.1 + 5.4 \\ R_t &= 5.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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:

$$\text{DAS} = \text{Rt} - \text{DNCOM} - \text{VCAS} \quad (3)$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

Rt = Recarga total media anual;

DNCOM = Descarga natural comprometida;

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **5.5 hm³**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. La descarga natural comprometida corresponde a los volúmenes de agua concesionados de los manantiales, por lo que la **DNCOM = 0.1 hm³ anuales**.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **31 de Marzo de 2010 es de 450,980 m³ anuales**.

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión 3, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

$$\mathbf{DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad (3)}$$

$$DAS = 5.5 - 0.1 - 0.450980$$

$$\mathbf{DAS = 4.94902 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

La cifra indica que existe un volumen adicional de **4'949,020 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de los acuíferos Santa Fe del Pino, Hércules, Laguna el Guaje, Laguna el Coyote, Acatita, Las Delicias, Serranía del Burro y Valle de San Marcos, en el estado de Coahuila, elaborado por el Instituto del Agua del Estado de Nuevo León.

Servicio Geológico Mexicano, 2008. Carta Geológica-Minera G13-3 "Ocampo", escala 1:250,000.