

**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO CUMPAS (2661), ESTADO DE  
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 GENERALIDADES.....</b>                                   | <b>2</b>  |
| <b>Antecedentes.....</b>                                      | <b>2</b>  |
| 1.1 Localización.....   | 2         |
| 1.2 Situación administrativa del acuífero.....                | 4         |
| <b>2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>3 FISIOGRAFÍA .....</b>                                    | <b>6</b>  |
| 3.1 Provincia fisiográfica.....                               | 6         |
| 3.2 Clima.....  | 6         |
| 3.3 Hidrografía.....  | 7         |
| 3.4 Geomorfología.....  | 7         |
| <b>4 GEOLOGÍA.....</b>  | <b>7</b>  |
| 4.1 Estratigrafía.....  | 8         |
| 4.2 Geología estructural.....                                 | 12        |
| 4.3 Geología del subsuelo.....                                | 13        |
| <b>5 HIDROGEOLOGÍA .....</b>                                  | <b>14</b> |
| 5.1 Tipo de acuífero.....                                     | 14        |
| 5.2 Parámetros hidráulicos.....                               | 14        |
| 5.3 Piezometría.....  | 14        |
| 5.4 Comportamiento hidráulico.....                            | 15        |
| 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        |
| <b>6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>         | <b>17</b> |
| <b>7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>                   | <b>17</b> |
| 7.1 Entradas.....   | 18        |
| 7.1.1 Recarga vertical (Rv).....                              | 18        |
| 7.1.2 Recarga inducida (Ri).....                              | 19        |
| 7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....     | 19        |
| 7.2 Salidas.....  | 21        |
| 7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....                           | 21        |
| 7.2.2 Bombeo (B).....   | 22        |
| 7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....      | 22        |
| 7.3 Cambio de almacenamiento.....                             | 23        |
| <b>8 DISPONIBILIDAD .....</b>                                 | <b>24</b> |
| 8.1 Recarga total media anual (R).....                        | 24        |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....                  | 24        |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....   | 25        |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 25        |
| <b>9 BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                    | <b>26</b> |

## **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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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

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

### **1.1 Localización**

El acuífero Cumpas, definido con la clave 2661 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción nor-oriental del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 29° 55' y 30° 35' de latitud, y 109° 30' y 110° 10' de longitud, cubriendo una superficie de 2415 km<sup>2</sup>. Limita al sur con los acuíferos Huasabas y Río Moctezuma, al este con el Acuífero Villa Hidalgo, al oeste con Río Sonora mientras que al norte con el acuífero Río Bacoachi (figura 1).

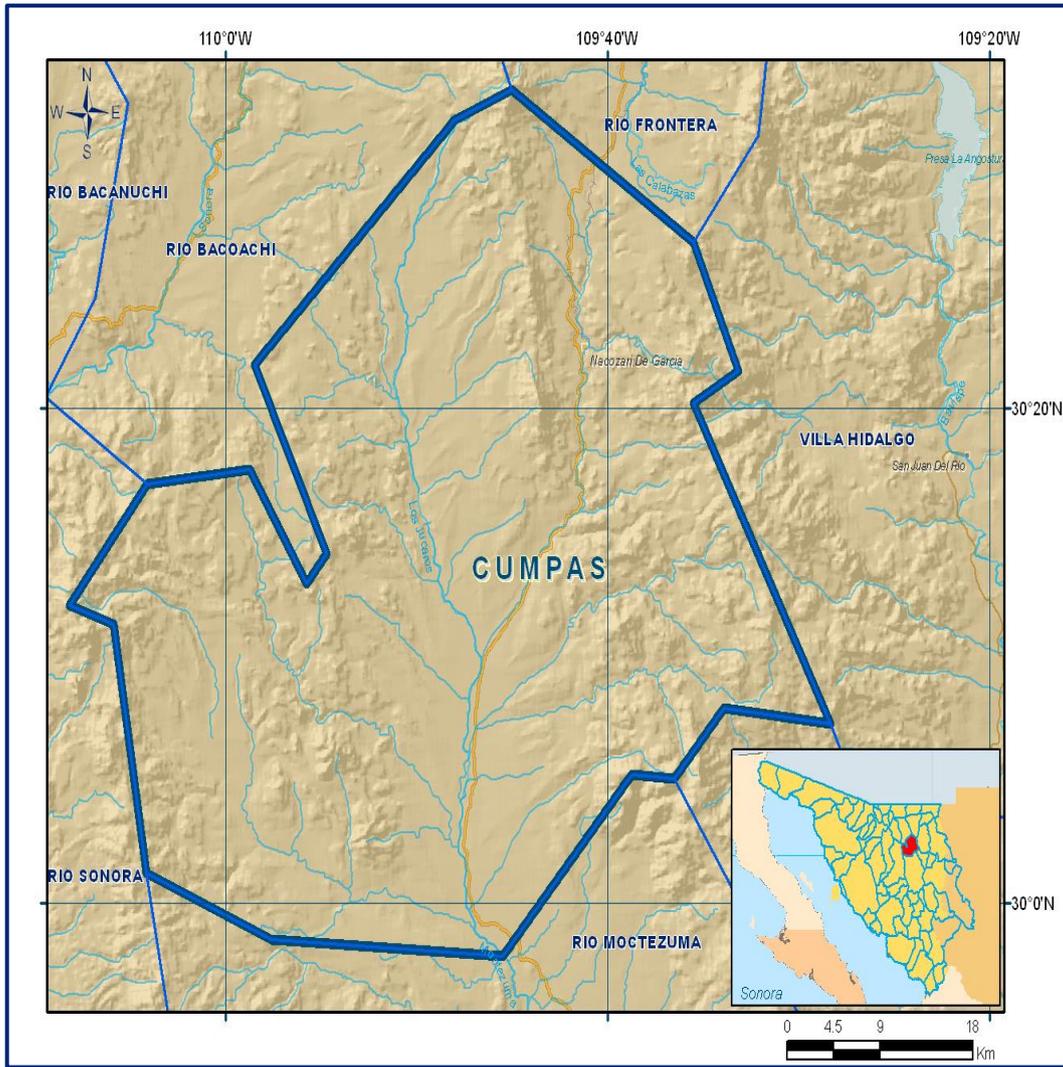


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente cubre parcialmente territorio de los municipios Cumpas y Nacozari de García. 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 2661CUMPAS |                |         |          |               |         |          |
|---------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|
| VERTICE             | LONGITUD OESTE |         |          | LATITUD NORTE |         |          |
|                     | GRADOS         | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS        | MINUTOS | SEGUNDOS |
| 1                   | 109            | 35      | 32.2     | 30            | 20      | 13.9     |
| 2                   | 109            | 28      | 20.3     | 30            | 7       | 16.3     |
| 3                   | 109            | 33      | 56.5     | 30            | 7       | 53.9     |
| 4                   | 109            | 36      | 30.6     | 30            | 5       | 2.7      |
| 5                   | 109            | 38      | 44.3     | 30            | 5       | 13.9     |
| 6                   | 109            | 45      | 29.4     | 29            | 57      | 53.4     |
| 7                   | 109            | 57      | 36.0     | 29            | 58      | 32.0     |
| 8                   | 110            | 4       | 8.4      | 30            | 1       | 13.3     |
| 9                   | 110            | 5       | 51.5     | 30            | 11      | 13.6     |
| 10                  | 110            | 8       | 9.8      | 30            | 12      | 18       |
| 11                  | 110            | 4       | 5.6      | 30            | 16      | 55.8     |
| 12                  | 109            | 58      | 44.9     | 30            | 17      | 32.8     |
| 13                  | 109            | 55      | 45.7     | 30            | 12      | 56.2     |
| 14                  | 109            | 54      | 43.3     | 30            | 14      | 9.4      |
| 15                  | 109            | 58      | 30.3     | 30            | 21      | 45.1     |
| 16                  | 109            | 48      | 10       | 30            | 31      | 39.8     |
| 17                  | 109            | 45      | 2.7      | 30            | 32      | 52.1     |
| 18                  | 109            | 35      | 32.2     | 30            | 26      | 42.0     |
| 19                  | 109            | 33      | 11.3     | 30            | 21      | 31.7     |
| 1                   | 109            | 35      | 32.2     | 30            | 20      | 13.9     |

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero de Cumpas pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero de ellos rige en su porción oriental, “Decreto por el cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo”, publicado en el DOF el 2 de junio de 1967; y el segundo en la región norte “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las Aguas del Subsuelo en la parte que corresponde a diversos Municipios del Estado de Sonora.”, publicado en el DOF el 24 de septiembre de 1984.

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

Los usuarios principales del agua son los sectores agrícola y pecuario. 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). Ambos de tipo II en los que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

## 2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero Cumpas se han realizado estudios de investigación geológica y de exploración minera, en los cuales han participado organismos gubernamentales, universidades, investigadores extranjeros y empresas privadas. Entre los estudios más importantes podemos mencionar:

**PANORAMA GEOHIDROLÓGICO DEL ESTADO DE SONORA.** Daniel Alberto Arámbula, Julio Censar Palomino Montero, 1991. Establece un panorama general de las condiciones geohidrológicas del Estado de Sonora.

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ESTADO DE SONORA.** Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2007. Al igual que el estudio antes citado, se describen de manera general las condiciones geohidrológicas de la zona. En lo que al área refiere, se establece que no existen condiciones de sobreexplotación acuífera.

**INFORME DE ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR EN EL ÁREA DE NOGALES-AGUA PRIETA, EN EL ESTADO DE SONORA,** realizado para extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) a través de la empresa Geoexploraciones y Construcciones, S.A. en el año de 1980.

Se ejecutaron 30 Sondeos eléctricos de resistividad, de los cuales 26 se realizaron en el valle de Fronteras (perteneciente al acuífero Río Fronteras), y 4 en la zona del Río Santa Cruz. La profundidad de investigación fue de 300 a 500 m.

**INFORME PRELIMINAR DE LOS SERVICIOS DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA DE SAN BERNARDINO EN EL ESTADO DE SONORA**, realizado por la empresa: Geólogos Consultores, S.A., efectuado en 1983. En el estudio se realizaron 30 Sondeos Eléctricos Verticales de resistividad para investigar a una profundidad de 300 m.

De estos sondeos, 5 se llevaron a cabo en la zona del acuífero Río Fronteras; los 25 restantes se distribuyeron en las zonas de Agua Prieta, Cuquiárachic, ejido 18 de Agosto, y en la carretera a Agua Prieta – Janos.

**ESTUDIO REGIONAL DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO AGUA PRIETA, MUNICIPIO DE AGUA PRIETA, SONORA**, realizado por la empresa Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente, para la empresa RAMMADSA, de Agua Prieta, Sonora, en el año 2007. Este estudio se realizó con el propósito de evaluar la recarga media anual que recibe el acuífero.

Como parte de las actividades de campo para el planteamiento y estimación de las componentes del balance de aguas subterráneas, se llevaron a cabo el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos, ejecución de sondeos geofísicos y toma de muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente.

**ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA**, realizado en 2008 por el Servicio Geológico Mexicano, en convenio con Comisión Nacional del Agua, llevó a cabo el estudio cuyo objetivo fue realizar una evaluación hidrogeológica preliminar de los acuíferos de estas cuencas, para determinar su recarga media anual y su disponibilidad.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes. Para la descripción del marco geológico regional y local, se consultaron las cartas geológicas por el Servicio Geológico Mexicano: *Cartas Geológica del estado de Sonora, escala 1:500,000* y *Carta Geológica-Minera y Geoquímica Nacozari, Cananea y Madera, escala 1:250,000*.

### 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.

La zona está formada principalmente por sierras entre las cuales se localiza el amplio valle intermontano de cumpas, con orientación preferente norte-sur.

La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur, en donde las zonas serranas predominan rocas volcánicas ácidas, mientras que en los valles están rellenos materiales sedimentarios continentales.

#### 3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de climas del INEGI (2007), el acuífero presenta dos 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 que se presentan durante 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 22° C, con una temperatura del mes frío de entre -3 a 10° C. La temperatura del mes más cálido es menor a los 25° C; con lluvias de verano y porcentaje de lluvias invernales mayor al 18% del total anual.

El análisis climatológico se realizó con base en los datos de cuatro estaciones climatológicas ubicadas al interior de los límites del acuífero, en las comunidades El Tapiro, Banámichi, Nacozeni y Arizpe, las cuales presentan un periodo de registro de datos de 1966 a 2007.

El valor de la temperatura media anual es de 22° C. Los meses más cálidos son julio, agosto y septiembre, mientras que los más fríos son diciembre y enero. El valor de la precipitación media anual registrada en el área es de 465.0 mm.

De acuerdo a la información disponible en las estaciones climatológicas con influencia en el área, se estima que la evaporación potencial es de unos 2090 mm/año.

### **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%), se extiende en la porción oriental desde Agua Prieta hasta Yávaros, 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 queda enmarcado en la Cuenca del Río Yaqui.

La principal corriente superficial de la zona es el Río Moctezuma, de tipo perene, con una longitud de 125 km, fluye de norte a sur pasando por Cumpas, hasta su confluencia con el Río Yaqui, manteniendo una pendiente media de 0.32%. Con un patrón de drenaje predominantemente dendrítico. A lo largo de su cauce se confluyen varios tributarios de régimen intermitente, los más importantes son los arroyos Jurahui, Los Chirriones, Los Álamos, El Aljibar, entre otros.

### **3.4 Geomorfología**

El Valle de Cumpas, donde se localiza la principal zona acuífera en explotación, es un graben tectónico delimitado por dos fallas de tipo normal. Geomorfológicamente la zona oriente del acuífero se encuentra en etapa de juventud, debido a la presencia de regiones predominantemente montañosas, de grandes desniveles y vertientes escarpadas, mientras que los valles son estrechos en forma de gargantas.

A diferencia de lo anterior, la zona de valle tiene una geomorfología madura, de vertientes poco inclinadas, en donde se desarrolló un lecho de inundación amplio y plano en el que las principales corrientes superficiales no presentan cambios abruptos de topografía.

## **4 GEOLOGÍA**

El área se caracteriza por presentar un contexto geológico variado; las unidades litológicas que afloran en la comprenden un registro estratigráfico del Proterozoico al Reciente.

A continuación, se hace una breve descripción de ellas, en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente, cuya distribución se observa en la Figura 2, cuya fuente de información fueron las cartas geológico mineras Nacozari, Cananea y Madera, escala 1:250,000 y elaboradas por el Servicio Geológico Mexicano.

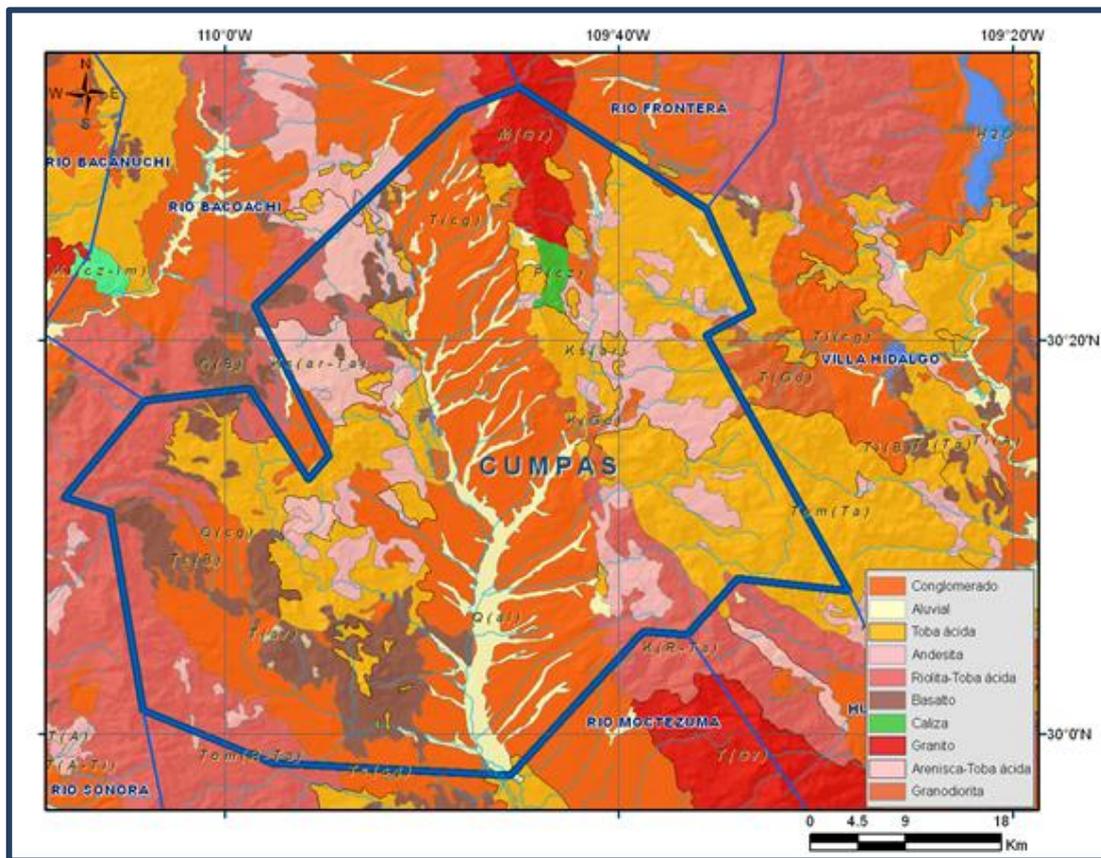


Figura 2. Geología general del acuífero

#### 4.1 Estratigrafía

##### Proterozóico Medio

Esquisto Pinal (PTmEGn). Potente formación de rocas metamórficas, representadas por esquistos de color gris oscuro y verdoso, constituidas de cuarzo y sericita, con ocasionales turmalinas y anfíboles. Aflora al norte del acuífero con un espesor estimado entre 50 y 150 m. Estratigráficamente se encuentra subyaciendo a areniscas y calizas de Cámbrico (que afloran fuera del área del acuífero). Se trata de una unidad con permeabilidad de baja a nula que funciona como barrera natural al flujo subterráneo y que puede llegar a constituir condiciones de confinamiento en el acuífero.

El basamento **Precámbrico** (Esquistos Pinal-Granito Mesteñas) está cubierto discordantemente por una secuencia marina paleozoica, representada por rocas sedimentarias indiferenciadas que afloran en el límite suroeste y sureste del área. Esta unidad es correlacionable con las formaciones Martín, Caliza Escabrosa y Caliza Naco. Esta unidad (PdP Cz-Ar) constituye una secuencia sedimentaria calcárea de calizas arrecifales y arcillosas, depositadas en un ambiente marino de plataforma, que afloran formando gran parte del Cerro La Negrita, donde Rangin Claude (1977) y González L.C. (1995), identifican a esta unidad cabalgando al Conglomerado Glance y a la secuencia vulcanosedimentaria cretácica del Grupo Cabullona.

### **Jurásico superior – Cretácico Neocomiano**

Conglomerado Glance (JsKn Cgp-Ar). Conglomerado color gris, morado y café rosado, con clastos que varían en diámetro de 2 a 30 cm, constituidos por fragmentos derivados de esquistos, rocas graníticas y volcánicas.

En algunas áreas presenta intercalaciones de rocas volcánicas en su parte inferior. La matriz está compuesta de lodos arenosos y limosos de color café rojizo. Su espesor varía desde 25 a más de 1000 m.

Sobreyace discordantemente a esquistos precámbricos y es sobreyacido por la Formación Mural. Representa depósitos subaéreos proximales de abanicos aluviales comúnmente asociados a fallas normales. Por su grado de compactación a la unidad se le asigna una permeabilidad predominantemente baja, aunque localmente puede presentar permeabilidad secundaria por fracturamiento.

### **Cretácico Superior**

Caliza Mural (KaCz-Lu).- En su parte inferior se encuentra compuesta por calizas y areniscas dispuestas en estratos delgados, con abundantes ostreas e intercaladas con limolitas calcáreas y lodolitas; su espesor aproximado es de 100 a 160 metros. La parte superior está constituida por capas gruesas de calizas fosilíferas de 50 a 80 m de espesor, con abundantes fragmentos de moluscos, corales, rudistas y orbitolinas.

Estratigráficamente, sobreyace discordantemente a rocas paleozoicas, y subyace de manera discordante a rocas riolíticas y tobas del paleógeno-neógeno. Por sus componentes de grano fino, esta unidad es de permeabilidad baja, aunque sus horizontes arenosos presentan permeabilidad media.

Grupo Cabullona (KsAr-Cgp).- Potente secuencia de rocas detríticas con cantidades pequeñas de ceniza volcánica que descansan discordantemente sobre rocas del Cretácico Inferior, en el área de Cabullona, ubicada al sur de Agua Prieta.

El Grupo Cabullona se compone por cinco formaciones, que de la base a la cima son: Formación Corral de En Medio, Arenisca Camas, Lutita Packard, Formación Lomas Coloradas, y Conglomerado El Cemento.

De manera general, el grupo está constituido por intercalaciones de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerado, con intercalaciones de rocas volcánicas; principalmente tobas riolíticas soldadas, con un espesor máximo de 2,500 m en la zona de Cabullona (fuera de los límites del acuífero).

Hidrogeológicamente tiene comportamientos variables, dado su espesor y amplia variación litológica, presenta permeabilidades que varían de alta a baja, funcionando algunas unidades como acuíferos y otras como fronteras y barreras al flujo subterráneo.

Secuencia Volcánica Cretácica (KsTpgR-Tr; KsTpgA-TA, KsTpaA-Ar). Los afloramientos de esta unidad se encuentran distribuidos ampliamente en la zona, se trata de tres asociaciones de rocas; andesitas, tobas andesíticas y aglomerados, riolitas y tobas riolíticas, y por último andesitas y areniscas. Generalmente se encuentra cubierta por la secuencia volcánica de la Sierra Madre Occidental.

Hidrogeológicamente tiene una permeabilidad media, debido a su fracturamiento moderado, donde las fracturas se encuentran abiertas y comunicadas entre si.

### **Cretácico superior - Neógeno**

Granito –Granodiorita - Diorita (KsTpg Gr-Gd, Te Gd-D). De color crema claro, estructura compacta y textura fanerítica, compuesta principalmente de cristales subhedrales y anhedrales de cuarzo, feldespatos y minerales ferromagnesianos (biotita); presenta ligera oxidación. Petrográficamente se observa con textura holocristalina, hipidiomórfica y compuesto principalmente de cristales de cuarzo, microclina, andesina y oligoclasa, como minerales accesorios biotita y magnetita. Se encuentra aflorando en la porción oriental del acuífero.

La unidad granodiorita–diorita es de color gris claro, estructura compacta y textura porfirítica, su mineralogía predominante son fenocristales de cuarzo, feldespatos alterados y micas.

Los cristales son de grano medio y la matriz equigranular. Las unidades plutónicas se encuentran intrusionando a granitos precámbricos y rocas paleozoicas. Son cubiertas discordantemente por la secuencia de rocas volcánicas del paleógeno-neógeno. Desde el punto de vista hidrogeológico, presenta permeabilidad baja a nula, funcionando como basamento hidrogeológico.

Pórfido monzonítico (KsTpgPMz). Unidad formada por cuarzomonzonita porfídica color gris verdoso, estructura compacta y textura porfirítica.

Se caracteriza por abundante presencia de cristales euedrales de feldespatos potásicos y plagioclasas, así como cristales de cuarzo y biotita, agrupados en una matriz fanerítica compuesta mayormente de cristales finos de cuarzo y en menor proporción por plagioclasas.

Esta unidad se encuentra discordantemente cubierta por la secuencia de rocas volcánicas del paleógeno-neógeno. Hidrogeológicamente tiene características de permeabilidad baja a nula, operando hidráulicamente como basamento hidrogeológico.

### **Oligoceno - Mioceno**

Unidad Sierra Madre Occidental (ToA-TTq, ToA-TA, ToR-TR, ToB, ToR-Ig). Corresponde a la cubierta volcánica de la porción noroccidental de la Sierra madre Occidental y se encuentra ampliamente distribuida en el área. Constituida predominantemente por ignimbritas y riolitas, y en menor proporción rocas basálticas e intermedias. En el área se describe a esta unidad, constituida por dos partes: una parte inferior compuesta de tobas riolíticas e ignimbritas, y otra superior constituida por andesitas y tobas andesíticas. Su espesor máximo alcanza 1600 m, se encuentra en discordancia erosional sobre varias unidades más antiguas y es sobreyacida por la Formación Báucarit.

Esta unidad aporta agua al acuífero a través de flujos intermedios, donde el agua se infiltra en zonas topográficamente altas. Al ser una unidad sobreyacida por la Formación Báucarit, constituye un acuífero confinado con potencial medio. Formación Báucarit (TmCgp-Ar, TmAr-B, TmB). Secuencia de areniscas, conglomerados y arcillas bien estratificadas y consolidadas, en su base contiene flujos de basalto intercalados con aglomerados basálticos. Está distribuida por toda el área principalmente en los flancos orientales de los valles.

En campo se observa de tres formas; estratos gruesos de areniscas y conglomerados bien consolidados con clastos de rocas intrusivas, volcánicas y calizas, en una matriz arenosa, la estratificación cruzada y estructuras de canal son comunes, presenta flujos basálticos y en ocasiones capas de brechas volcánicas con tobas interestratificadas. De igual forma se observa formando estratos delgados de conglomerados con horizontes de areniscas, por último, se observa en zonas donde predominan los flujos basálticos.

Descansa discordantemente sobre rocas terciarias y es cubierta de manera discordante por sedimentos terrígenos y eventualmente basaltos cuaternarios.

En muchos de los casos la Formación Báucarit se encuentra en contacto por falla con unidades más antiguas, especialmente con intrusivos cretácico-paleógeno. También se considera producto de una sedimentación continental, principalmente de ambientes fluviales y lacustres con rocas volcánicas interestratificadas.

Hidrogeológicamente funciona como barrera natural (confinante) entre las rocas sedimentarias (acuífero en explotación) y rocas fracturadas que posiblemente forman un acuífero a profundidad.

Conglomerado del Pleistoceno (QPtCgp). Conglomerado polimíctico, intercalado con areniscas y limos que varían de consolidadas a poco consolidadas. Los clastos son bien redondeados, corresponden a sedimentos que forman terrazas continentales. Su permeabilidad es alta y forma parte del paquete sedimentario del cual se extrae agua en el acuífero.

Basalto (QB). Basalto que yace discordantemente sobre sedimentos pleistocénicos, la Formación Báucarit, así como rocas volcánicas del Oligoceno. Esta unidad es producto de volcanismo toleítico-alcalino, anorogénico y de volumen reducido. Hidrogeológicamente tiene potencial medio debido a la comunicación de sus amígdalas.

Arenas y Limos (QAr-Im).- Se encuentran expuestos principalmente a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales, así como en pequeños afloramientos en las laderas de las sierras.

Constituida por sedimentos semiconsolidados y no consolidados de arenas de grano fino y limos, corresponde a clásticos que conformaron antiguas terrazas continentales. Sobre esta unidad se localiza un buen número de aprovechamientos hidráulicos, generalmente norias.

Aluvión (QAl). Materiales producto del intemperismo de rocas antiguas, depositadas como abanicos aluviales y fluviales a lo largo de ríos, arroyos y planicies de inundación. Se caracteriza por la abundante presencia de material conglomerático con clastos de diferentes litologías y tamaños, así como arenas y limos. Su permeabilidad es media a alta y constituye la principal unidad de explotación.

#### **4.2 Geología estructural**

El comportamiento estructural de la zona es producto de diversos eventos tectónicos; Orogenia Laramide (Cretácico tardío - Paleógeno); posteriormente sobrevino un evento distensivo del Neógeno – 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 juegos de fallas normales y fracturas de distensión en varias direcciones.

Estructuralmente el área se encuentra delimitada por una cordillera al oeste, una segunda cordillera en la zona noreste, así como el valle del Río Moctezuma (Fosa Moctezuma) en la porción central, con orientación preferente noroeste – sureste.

La Fosa Moctezuma, donde se localiza el cauce del Río Moctezuma, está delimitada por las fallas Los Hoyos y Tebisco, de rumbo preferente norte 50° oeste. La fosa tiene más de 15 km de ancho con una profundidad variable entre 100 y 200 m (Figura 3).

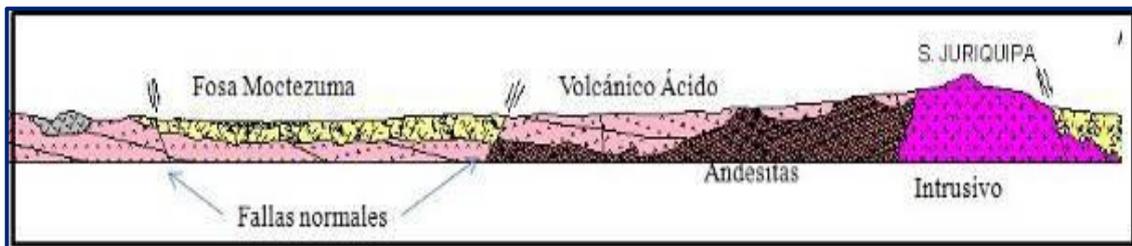


Figura 3. Modelo conceptual de funcionamiento acuífero

#### 4.3 Geología del subsuelo

Con base en las unidades litoestratigráficas reconocidas en campo es posible definir que el acuífero que actualmente se explota se aloja en un medio aluvial, constituido por gravas, arenas y limos que afloran que constituyen el cauce del río Moctezuma y arroyos, y los conglomerados polimícticos que se depositaron hacia los piedemonte de las sierras que limitan el acuífero. La parte inferior del acuífero está alojada en rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

El basamento y las fronteras al flujo subterráneo del acuífero están constituidos por el Conglomerado Glance que subyace al conglomerado polimíctico del Cuaternario, las unidades de baja permeabilidad de la secuencia de areniscas de grano fino y lutitas y, a mayor profundidad, los granitos. Las elevaciones y estructuras que limitan el valle son las que a profundidad constituyen el medio donde tiene lugar el movimiento del agua subterránea. En el subsuelo están depositados rellenos fluviales recientes; conglomerados, gravas, arenas, arcillas y limos, con espesor entre 50 y 100 m.

Subyaciendo a estos materiales se encuentran los depósitos conglomeráticos consolidados (Formación Báucarit), de amplio espesor (200 m) y distribución en la zona; esta unidad constituye una frontera, aunque no continua, entre los depósitos recientes y el material fracturado. Bajo los depósitos sedimentarios se encuentra una gran variedad de rocas volcánicas, desde andesitas, riolitas, tobas, etc., que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, cuyo espesor total puede alcanzar hasta 2500 m.

## 5 HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de **tipo libre** y está conformado, en su parte superior, por un medio granular caracterizado por la presencia de depósitos clásticos no consolidados y poco consolidados cuyas edades varían del Cenozoico al Cuaternario, que se encuentran rellenando la fosa tectónica sobre la cual labró su cauce el Río Moctezuma. En su porción inferior el acuífero está alojado en rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

La parte potencial del acuífero, es decir, la zona de la cual se extrae la mayor parte del agua subterránea, es el acuífero granular alojado en la Fosa Moctezuma, cuya orientación preferente es norte-sur, donde las fronteras laterales las constituyen fallas de tipo normal. De manera general, su comportamiento es de tipo libre, con excepción de aquellas zonas con predominio de los depósitos de la Formación Báucarit, cuyas unidades de material arcilloso y rocas volcánicas compactas crean condiciones de semiconfinamiento. Las zonas de recarga se encuentran en las porciones topográficamente elevadas, las cuales forman parte de un medio fracturado, formado principalmente por materiales de origen volcánico; riolitas, tobas riolíticas, basaltos y andesitas, que posiblemente constituyan un acuífero potencial a mayor profundidad.

### 5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades de campo que contempló el estudio realizado en el 2008, se ejecutaron 2 pruebas de bombeo de larga duración, tanto en su etapa de abatimiento como recuperación. La interpretación se realizó por diferentes métodos: Neuman, Jacob y Hantush.

De acuerdo con los resultados de la interpretación, los valores de transmisividad obtenidos varían de 254 hasta 427 m<sup>2</sup>/día ( **$2.9 \times 10^{-3}$  a  $4.9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** ); en tanto que para la conductividad hidráulica se reportan valores que oscilan entre 0.012 y 6.13 m/día ( **$1.4 \times 10^{-7}$  a  $7.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$** ). Los valores más altos de estos parámetros hidráulicos se registran en los aprovechamientos ubicados en las inmediaciones del Río Moctezuma. Los valores promedio que se consideran son: transmisividad de  **$3.70 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$**  y una conductividad hidráulica del orden  **$8.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$**

### 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 137 aprovechamientos, de los cuales 116 corresponden a norias y 21 a pozos.

### 5.4 Comportamiento hidráulico

El acuífero presenta un comportamiento hidráulico dinámico, debido a que el agua subterránea se infiltra en las porciones altas de la cuenca, constituidas por rocas volcánicas fracturadas, y muestran rápida circulación hacia la zona de explotación. En las planicies también tiene lugar recarga vertical producto de precipitaciones y de retorno de riego agrícola. La descarga artificial del acuífero se lleva a cabo mediante bombeo, mientras que la descarga natural se realiza en forma del flujo horizontal al sur del acuífero, por el cauce y zona de influencia del Río Moctezuma. De igual forma mediante el proceso de evapotranspiración en zonas con niveles piezométricos someros con presencia de abundante vegetación. Debido a que no se dispone de información piezométrica histórica, únicamente se describirá la configuración del nivel estático mostrado en el 2008.

#### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad del nivel estático varía desde poco menos de 1 metro hasta 18 m, registrándose los menores valores en los aprovechamientos localizados en el subálveo del río Río Moctezuma y sus tributarios, aumentando hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, reflejando el efecto de la topografía. Aunque no existe una tendencia clara en relación al comportamiento del nivel estático, de manera general el acuífero refleja niveles someros en la porción sur, en las márgenes del Río Moctezuma, mientras que hacia las porciones central y norte se registran profundidades de 10 a 18 m (Figura 4). Niveles variables se observan en aprovechamientos sobre las márgenes de los arroyos tributarios del Río Moctezuma, con variaciones de pocos centímetros hasta 16 m.

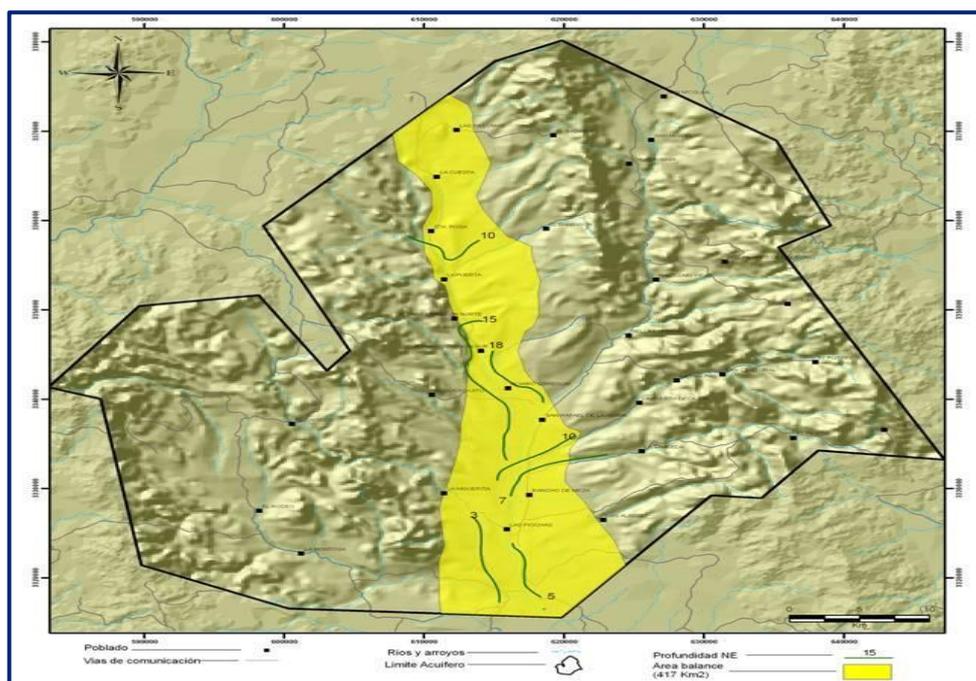


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para el año 2008 (Figura 5) presenta elevaciones que varían desde 710 hasta 1200 msnm, los valores más altos se registran en la porción norte del acuífero, mientras que las menores se ubican en la zona centro-sur, evidenciando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur, paralela a la dirección del escurrimiento del río Moctezuma, con alimentaciones provenientes de sus tributarios y de los piedemonte de las sierras que delimitan los estrechos valles.

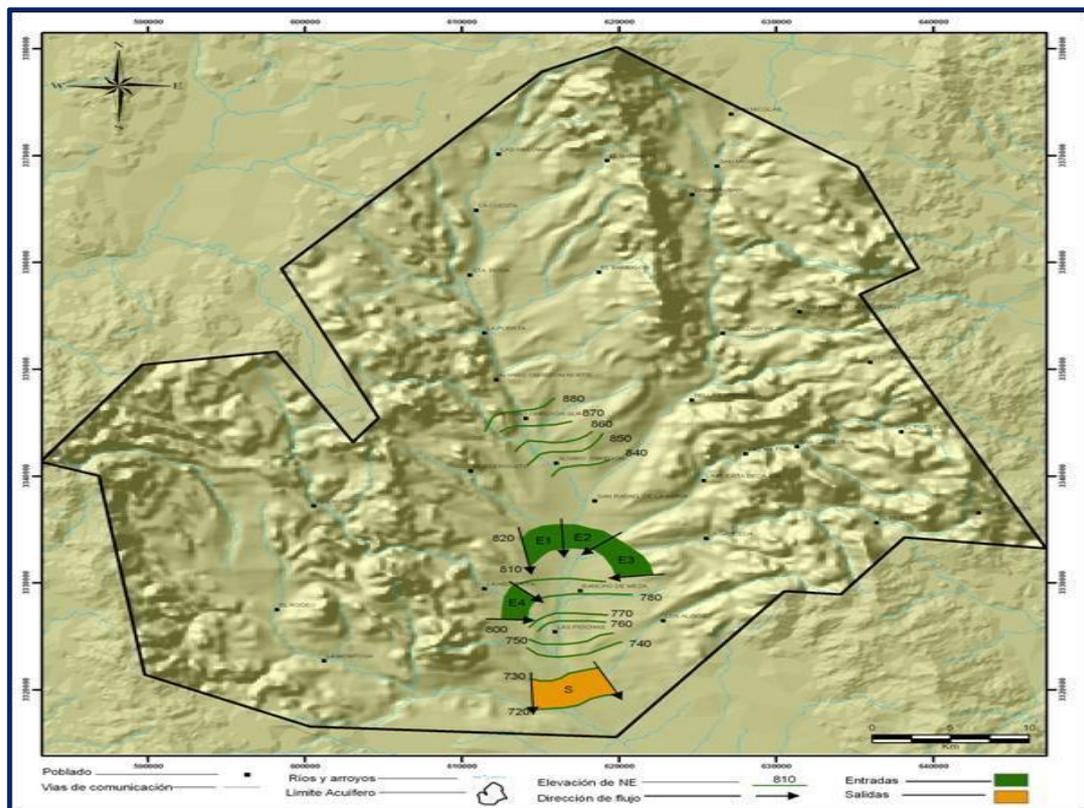


Figura 5. Elevación de nivel estático en msnm (2008) y celdas de flujo

### 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.

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.

Dado que la mayor parte de los parámetros físicos y químicos medidos en 2008 presentan valores de pH cercanos a la neutralidad, así como valores bajos de Sólidos Totales Disueltos (STD), la mayor parte del agua subterránea está asociada a agua de reciente infiltración.

De igual forma existen concentraciones elevadas de STD, sin embargo, se ubican en zonas puntuales donde la geología y sus procesos mineralógicos cambian la calidad del agua, la cual está asociada a un tiempo mayor de residencia y tránsito en el acuífero.

## **6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

En el acuífero se censaron 137 aprovechamientos, de los cuales 116 corresponden a norias y 21 a pozos, de estos 25 se encuentran en estado inactivo ya sea abandonados o enterrados, el resto se mantienen activos.

En conjunto, el volumen de extracción asciende a 18.7 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 16.2 hm<sup>3</sup> (86.6%) se utilizan en la agricultura, 2.3 (12.3%) para el abastecimiento de agua potable a los centros de población y los 0.2 hm<sup>3</sup> restantes (1.1%) se destinan a satisfacer las necesidades de los usos industrial y pecuario.

## **7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de 417 km<sup>2</sup>, 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:

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

De esta manera la ecuación de balance propuesta es la siguiente:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo horizontal
- Ri:** Recarga inducida
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración real
- $\Delta V(S)$ : Cambio en el volumen almacenado

## 7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero ( $R_t$ ) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos del Río Moctezuma y arroyos tributarios, que en conjunto se consideran como recarga vertical ( $R_v$ ) y por flujo subterráneo horizontal ( $E_h$ ).

De manera inducida, se produce recarga debido a la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola ( $R_r$ ), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela.

### 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 ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión.

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo horizontal
- Ri:** Recarga inducida
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración real
- $\Delta V(S)$ :** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

### 7.1.2 Recarga inducida (Ri)

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero ( $R_t$ ) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos del Río Moctezuma y arroyos tributarios, que en conjunto se consideran como recarga vertical ( $R_v$ ) y por flujo subterráneo horizontal ( $E_h$ ).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida ( $R_i$ ). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, sólo se consideran los retornos de riego.

No existe información de superficies y tipo de cultivo para estimar los retornos de riego en las áreas agrícolas. Sin embargo, debido a que no existen sistemas de uso eficiente del agua, se considera que un 20% del volumen destinado al uso agrícola es el excedente de riego que retorna al acuífero. De esta manera, tomando en cuenta que el volumen para uso agrícola es de  $16.2 \text{ hm}^3$  anuales, la recarga inducida es del orden de los  **$3.2 \text{ hm}^3$  anuales**.

### 7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy (tabla 2), partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 5). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

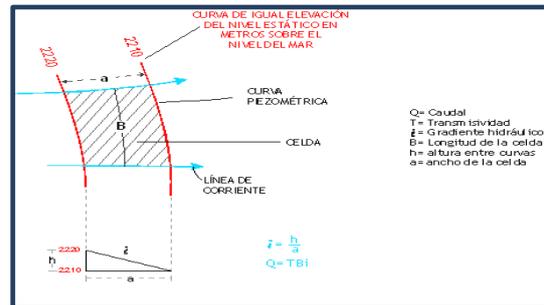
$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de ( $\Delta h$ ). 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 ( $\Delta h / \Delta L$ )  $\Delta h$  y  $\Delta L$  son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

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

Ya que la transmisividad  $T = K \cdot a$ , la ecuación queda reducida a:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

**T** = Transmisividad en  $m^2 / s$

**B**= Longitud de la celda en m

**i** = Gradiente Hidráulico, en m

Para el cálculo de la recarga subterránea en el acuífero, se analizaron las curvas de elevación del nivel estático y se identificaron un total de seis celdas, dos de ellas en la porción norte del área, una en la porción occidental y dos más en la zona oriental.

Para la estimación se utilizó un valor promedio de transmisividad de  $3.7 \times 10^{-3} m^2/s$ . Las celdas utilizadas se muestran en la Figura 5, mientras que el cálculo de volúmenes de entrada se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales

| CANAL                 | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | $h_2-h_1$ | Gradiente i | T                   | CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año) |
|-----------------------|----------------|-------------|-----------|-------------|---------------------|------------------------------|--------------------------------|
|                       |                |             | (m)       |             | (m <sup>2</sup> /s) |                              |                                |
| E1                    | 2916           | 2526        | 10        | 0.0040      | 0.0030              | 0.0346                       | 1.1                            |
| E2                    | 2587           | 2232        | 10        | 0.0045      | 0.0030              | 0.0348                       | 1.1                            |
| E3                    | 2331           | 1575        | 10        | 0.0063      | 0.0030              | 0.0444                       | 1.4                            |
| E4                    | 3505           | 1551        | 20        | 0.0129      | 0.0030              | 0.1356                       | 4.3                            |
| <b>Total entradas</b> |                |             |           |             |                     |                              | <b>7.9</b>                     |

Como resultado del análisis de celdas de flujo se obtuvo un valor de **7.9 hm<sup>3</sup>/año** que representa las entradas horizontales a la zona de influencia del balance de aguas subterráneas.

### 7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh), evapotranspiración (ETR) y descargas naturales por flujo base del Río Moctezuma. No existen manantiales perenes en la zona.

#### 7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

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

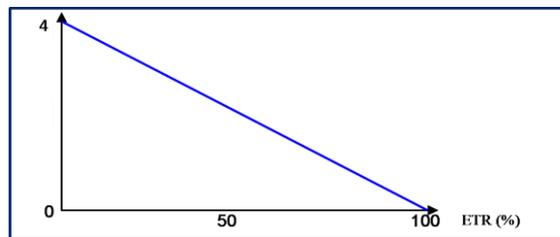
Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

Existe una zona del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 4 m de profundidad, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas. Se aplicó la fórmula de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 462 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 22° C y precipitación de 465 mm.

|                  |   |        |                             |
|------------------|---|--------|-----------------------------|
| Fórmula de Turc: | $ETR (mm) = \frac{P (mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2 (mm)}{L^2}\right)}}$ |        | $L = 300 + 2.5T + 0.05T^3$  |
|                  | T (°C) =  | 22     |                             |
|                  | P (mm) =  | 465    | P <sup>2</sup> = 216225     |
|                  | L =   | 1382.4 | L <sup>2</sup> = 1911029.76 |
|                  | ETR (mm)  | 462.0  |                             |

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 4 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 4 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 4 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 4 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 2 m el 50%, etc.



Considerando esto se elaboró la tabla 3, en la que se puede observar que el valor de la evapotranspiración asciende a 3.7 hm<sup>3</sup> anuales.

**ETR = 3.7 hm<sup>3</sup>/año**

Tabla 3. Estimación de la evapotranspiración

| Intervalo curvas (m) | Profundidad (m) | Area (km <sup>2</sup> ) | %    | ETR (m) | Vol ETR (hm <sup>3</sup> /año) |
|----------------------|-----------------|-------------------------|------|---------|--------------------------------|
| 1 a 2                | 1.5             | 8.5                     | 0.62 | 0.462   | 2.4                            |
| 2 a 3                | 2               | 3.2                     | 0.5  | 0.462   | 0.7                            |
| 3                    | 2               | 1.7                     | 0.5  | 0.462   | 0.4                            |
| 3 a 4                | 3               | 1.4                     | 0.25 | 0.462   | 0.2                            |
| <b>Total</b>         |                 |                         |      |         | <b>3.7</b>                     |

### 7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen total anual de extracción de agua subterránea asciende a **18.7 hm<sup>3</sup>**.

### 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 5). El Valor estimado es de **1.9 hm<sup>3</sup>/año**, calculado en una sección próxima al extremo sur del área de balance, hacia el acuífero Río Moctezuma. Las celdas de flujo utilizadas para estimar la salida horizontal se observan en la Figura 7, mientras que el cálculo del caudal se anota en la Tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas horizontales

| CANAL                | LONGITUD B<br>(m) | ANCHO a<br>(m) | $h_2-h_1$ | Gradiente i | T           | CAUDAL Q    | VOLUMEN        |
|----------------------|-------------------|----------------|-----------|-------------|-------------|-------------|----------------|
|                      |                   |                | (m)       |             | ( $m^2/s$ ) | ( $m^3/s$ ) | ( $hm^3/año$ ) |
| S1                   | 4629              | 3038           | 10        | 0.0033      | 0.0040      | 0.0609      | 1.9            |
| <b>Total salidas</b> |                   |                |           |             |             |             | <b>1.9</b>     |

### 7.3 Cambio de almacenamiento

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 de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, la configuración de elevación del nivel estático no muestra aún la presencia de conos de abatimiento o deformaciones de la dirección natural del flujo subterráneo, que sean ocasionados por la concentración del bombeo o de aprovechamientos.

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

$$R_v = Sh + B + ETR - \Delta V(S) - Eh - Ri \quad \text{--- (2)}$$

$$R_v = 1.9 + 18.7 + 3.7 - 0.0 - 7.9 - 3.2$$

$$R_v = 13.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El valor de la recarga vertical es alto debido, por una parte al volumen que se infiltra a lo largo del cauce del Río Moctezuma debido a la circulación de aguas residuales, además que al no existir apoyo piezométrico para la configuración en los piedemonte, el valor de la recarga por entradas subterráneas está incluido implícitamente en la recarga vertical.

Tomando en cuenta lo anterior la recarga total es igual a:

$$\begin{aligned} R_t &= R_v + E_h + R_i \\ R_t &= 13.2 + 7.9 + 3.2 \\ R_t &= 24.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

## 8 DISPONIBILIDAD

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

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

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 **24.3 hm<sup>3</sup>/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 **3.7 hm<sup>3</sup> anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

### 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **10,590,296 m<sup>3</sup> 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 24.3 - 3.7 - 10.590296 \\ \text{DMA} &= 10.009704 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **10,009,704 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9 BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 1994. Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos, México, D.F.

Geólogos Consultores, S.A.1983. Informe preliminar de los servicios de Prospección Geohidrológica en la Zona de San Bernardino en el Estado de Sonora.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1980. Informe de Estudio Geohidrológico preliminar en el área de Nogales-Agua Prieta, en el Estado de Sonora