



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

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO CABORCA (2605), 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.....	5
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....</b>	<b>5</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA .....</b>	<b>7</b>
3.1. Provincia fisiográfica .....	7
3.2. Clima .....	8
3.3. Hidrografía.....	9
3.4. Geomorfología.....	10
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
4.1. Estratigrafía .....	14
4.2. Geología estructural .....	17
4.3. Geología del subsuelo.....	18
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>20</b>
5.1. Tipo de acuífero .....	20
5.2. Parámetros hidráulicos.....	21
5.3. Piezometría .....	21
5.4. Comportamiento hidráulico.....	21
5.4.1. Profundidad al nivel estático .....	21
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	22
5.4.3. Evolución del nivel estático .....	23
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	24
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>26</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....</b>	<b>26</b>
7.1. Entradas.....	27
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	27
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce (Ed).....	28
7.1.3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Es).....	29
7.1.4. Recarga incidental(Rr) .....	30
7.2. Salidas .....	30
7.2.1. Bombeo (B) .....	30
7.2.2. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb) .....	31
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....	31
<b>8. DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>32</b>
8.1. Recarga total media anual (R).....	32
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) .....	33
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....	33
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	33
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>35</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 de extracción de aguas subterráneas.

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

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

### **1.1. Localización**

El acuífero Caborca, definido con la clave 2605 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroccidental del estado de Sonora, entre los paralelos 29°56'06" y 31°22'01" de latitud norte y 111°29'17" y 113°07'40" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 13,242 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con los acuíferos Arroyo Sahuaro y Los Chirriones; al este con Arroyo Seco, Río Altar, Busani; al sureste con Magdalena y Costa de Hermosillo; al sur con

Puerto Libertad y Arivaipa; todos ellos pertenecientes al estado de Sonora. Al oeste su límite natural es el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende la mayor casi la totalidad del municipio de Caborca; parcialmente Pitiquito, Trincheras, Altar y Oquitoa; así como una pequeña porción de Atil.

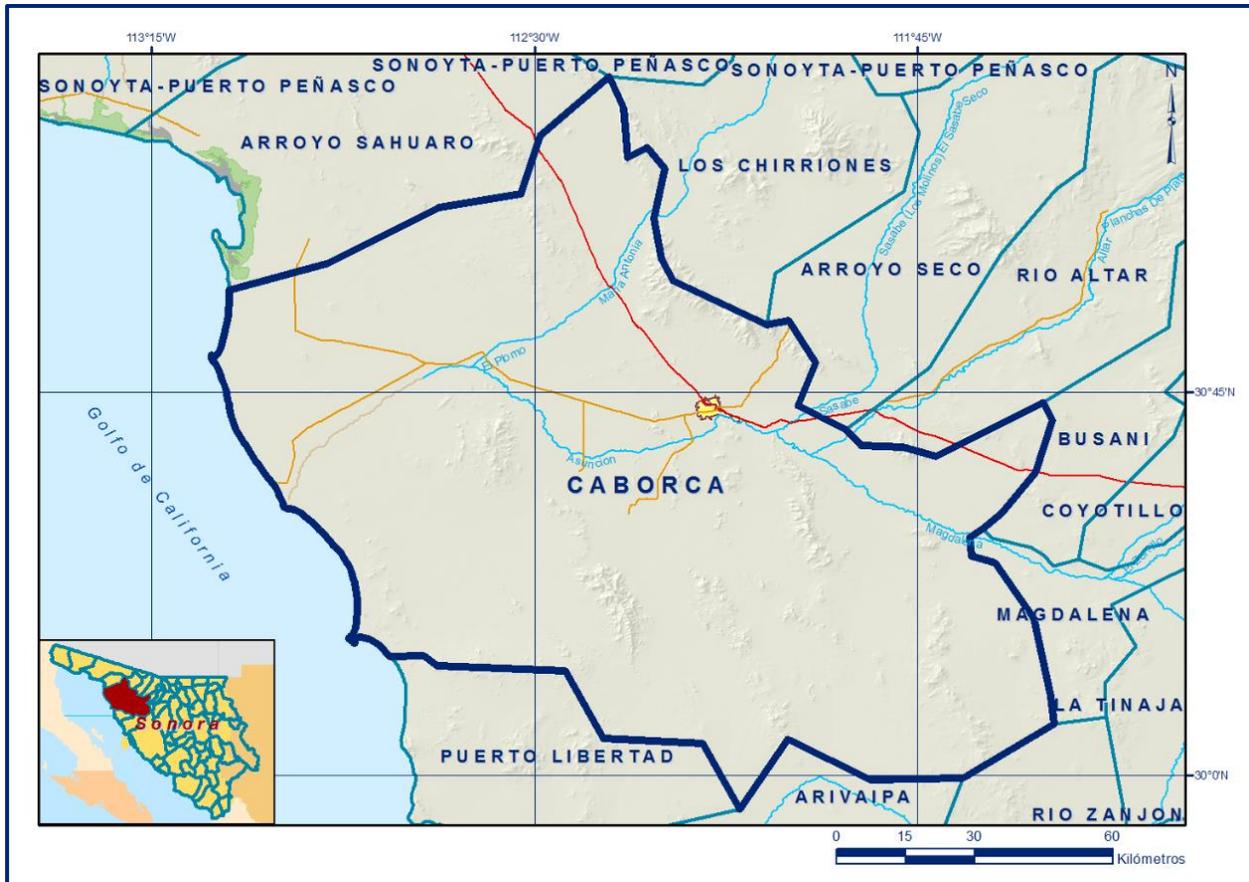


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

ACUIFERO 2605 CABORCA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	111	53	28.2	30	40	36.1	
2	111	51	40.6	30	38	41.8	
3	111	46	46.0	30	38	32.1	
4	111	42	51.7	30	37	23.2	
5	111	30	20.4	30	43	46.1	
6	111	29	14.9	30	41	42.9	
7	111	31	10.3	30	35	35.0	
8	111	35	8.9	30	30	46.9	
9	111	37	26.1	30	28	52.6	
10	111	38	54.3	30	27	56.0	
11	111	38	44.0	30	25	46.8	
12	111	36	0.0	30	24	55.1	
13	111	31	25.8	30	18	28.2	
14	111	29	22.7	30	9	17.5	
15	111	29	0.9	30	6	5.7	
16	111	39	40.1	29	59	45.5	
17	111	50	35.6	29	59	29.1	
18	112	0	14.0	30	4	17.7	
19	112	5	58.1	29	56	5.4	
20	112	10	17.8	30	3	46.5	
21	112	21	58.2	30	4	25.7	
22	112	26	24.5	30	12	15.8	
23	112	41	27.8	30	12	52.1	
24	112	43	0.5	30	14	7.3	
25	112	47	0.2	30	14	0.9	DEL 25 AL 26 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
26	113	5	52.3	30	56	57.9	
27	112	54	11.8	31	0	6.9	
28	112	41	15.1	31	6	38.6	
29	112	31	37.6	31	8	13.4	
30	112	29	24.8	31	15	3.0	
31	112	21	15.8	31	22	0.0	
32	112	19	35.1	31	18	19.7	
33	112	19	4.9	31	12	26.4	
34	112	16	51.1	31	13	41.7	
35	112	14	44.6	31	11	12.4	
36	112	15	58.4	31	5	21.8	
37	112	15	7.2	31	0	35.1	
38	112	13	42.4	30	57	58.6	
39	112	2	46.1	30	52	53.2	
40	112	0	9.9	30	53	20.0	
41	111	57	1.5	30	48	23.6	
42	111	59	4.3	30	43	24.1	
1	111	53	28.2	30	40	36.1	

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y al Consejo de Cuenca Alto Noroeste, instalado el 19 de marzo de 1999. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. En la mayor parte rige *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende la región de Altar, Pitiquito y Caborca, Estado de Sonora”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 18 de octubre de 1962. Esta veda es tipo III en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La superficie restante, que comprende los extremos norte, sur y sureste está vigente el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona”* conocido como Meridiano 110, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978. Esta veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En toda la porción central de su territorio, de este a oeste, se localiza el Distrito de Riego 037 “Altar-Pitiquito-Caborca”, y no se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En una pequeña área del extremo noroccidental de la zona costera se localiza el sitio RAMSAR “Humedales de Bahía San Jorge”, decretado el 2 de febrero de 2010.

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie cubierta por el acuífero se han realizado varios estudios hidrogeológicos, entre los más importantes están los siguientes:

**INTERPRETACIÓN DE DATOS Y DETERMINACIÓN POTENCIAL ACTUAL DEL ACUÍFERO EN LA COSTA DE CABORCA, SONORA, elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., para la Secretaria de Recursos Hidráulicos, en 1975.** De este estudio se obtuvo información de la interpretación de sondeos eléctricos verticales y de pruebas de bombeo.

**ELABORACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAR EL AVANCE DE INTRUSIÓN SALINA DE LA COSTA DE CABORCA, SONORA, elaborado por la empresa Ingenieros Civiles, Geólogos y Asociados, S.A. Consultores, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1977.**

Sus objetivos principales fueron determinar el espesor y resistividad de las capas del subsuelo en sitios de interés para correlacionarlas con las unidades acuíferas identificadas; identificar la distribución de las formaciones cortadas por los pozos exploratorios y de explotación, así como definir la zona afectada por la intrusión marina en la porción norte y centro del valle, reubicar los sitios de perforación y áreas de explotación en la porción norte del valle. Aporta información valiosa de pruebas de bombeo.

**ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN EN EL ACUÍFERO CABORCA, SONORA. Realizado en 1996 por Hidrosistemas Universales, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua.**

Sus objetivos fueron construir un modelo de simulación del flujo subterráneo para analizar el comportamiento de los niveles del agua subterránea ante diferentes escenarios de extracción y diseñar una red óptima de pozos de observación para el monitoreo del nivel estático y la calidad del agua.

**ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DEL ESTADO DE SONORA, elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en 2005.**

El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración del Organismo de Cuenca Noroeste, que incluye la totalidad del Estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua. Además de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de profundidad y elevación. Representa un estudio de consulta general de los acuíferos.

**ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA Y PIEZOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS DE LA REGIÓN NOROESTE, elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en 2006.**

Contiene información de la calidad del agua subterránea relacionada con las concentraciones de los iones mayores y de parámetros físicos (conductividad eléctrica, pH y temperatura), con sus respectivos planos de isovalores.

**ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA FACTIBILIDAD DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA SALOBRE PARA SU DESALACIÓN, EN LOS ACUÍFEROS DE CABORCA, PUERTO LIBERTAD, ARIVAIPA Y FUERTE – MAYO, SONORA, elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en 2007.**

En este estudio se planteó el balance hidrometeorológico y con los resultados de las actividades de campo fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para determinar la recarga media anual que recibe el acuífero.

Con esta información y la hidrogeoquímica, se definió el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero. Finalmente se determina la disponibilidad de aguas subterráneas.

**SITUACIÓN ACTUAL DE LA INTRUSIÓN MARINA EN EL ACUÍFERO CABORCA, SONORA. Informe interno elaborado en 2012 por la Gerencia de Aguas Subterráneas, SGT, CONAGUA.**

Es un documento que forma parte de una serie de 18, elaborados para los acuíferos costeros que presentan intrusión marina, con el propósito de atender el Programa Nacional Hídrico 2007-2012, que en su Objetivo 7 establece la necesidad de evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico y en la estrategia 3 de dicho objetivo menciona que se deberá promover y apoyar la investigación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, en materia de medidas de adaptación ante el cambio climático y específicamente la elaboración de estudios sobre vulnerabilidad, escenarios y posibles impactos y opciones de solución a la intrusión salina en acuíferos. Presenta información hidrogeológica general del acuífero que permite el análisis de los factores de vulnerabilidad a la intrusión marina, de acuerdo con una metodología de evaluación cuantitativa desarrollada por la misma Gerencia, definir las condiciones actuales y su posición. Adicionalmente, evalúa de manera conservadora el impacto económico de la intrusión marina.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA, HIDROMÉTRICA Y DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO CABORCA, SONORA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019.**

Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1. Provincia fisiográfica**

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre la totalidad del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica “Sierras y Llanuras Sonorenses”. Según la regionalización fisiográfica del Instituto

Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Desierto o Llanura Sonorense, Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses.

La Provincia Llanura Sonorense se extiende de sur a norte desde Arizona, EUA hasta el sur del estado de Sonora, abarcando gran parte de las regiones costeras. Gran parte de su extensión consta de sierras bajas paralelas de bloques fallados, orientadas burdamente nornoroeste-sursureste, y separadas unas de otras por llanuras cada vez más amplias y bajas hacia el Golfo de California.

Presenta amplias superficies planas con suave pendiente hacia el mar, frente a las que destacan cerros profundamente erosionados, colinas y sierras bajas, rodeados de conos aluviales muy tendidos.

La Subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses es una de las dos que integran la provincia, está formada de sierras bajas separadas por llanuras. Las sierras son más elevadas varían de 700 a 1 400 msnm y son más estrechas (rara vez más de 6 km de ancho) en el oriente; y más bajas (de 700 msnm o menos) y más amplias (de 13 a 24 km) en el occidente. En ellas predominan las rocas intrusivas ácidas y en menor proporción, en la región central, rocas volcánicas, metamórficas y calizas. Las llanuras representan alrededor de 80% de la subprovincia; están cubiertas en la mayor parte o en toda su extensión de amplios abanicos aluviales (bajadas) que descienden con pendientes suaves desde las sierras colindantes.

### **3.2. Clima**

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1981), se determina que el clima que predomina en la mayor parte de la superficie que cubre el acuífero es BWh(x') muy árido, semicálido, con temperatura media anual entre 18 y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Las lluvias se encuentran repartidas todo el año y el porcentaje de lluvia invernal mayor de 22°C al 18% del total anual. En los extremos norte y suroriental el clima es BSoh(x') árido, semicálido con temperatura entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más cálido mayor de 22°C. Las lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2%. El clima extremadamente árido, con escasas lluvias, muy alta temperatura en verano, baja humedad y elevada evaporación.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 10 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Rancho Bahía, San Isidro de Caborca Altar, Félix Gómez, P. Cuauhtémoc, Pitiquito, Puerto Libertad, Puerto Peñasco, Santa Rosa y Trincheras, cuyo registro comprende el periodo 1986-2016. Con base en esta información, se determina que los valores promedio anual de temperatura y precipitación son 20.5 °C y 235 mm, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio para este mismo periodo es de 2586 mm anuales.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero Caborca se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 8 “Sonora Norte”, Subregión Hidrológica Río Concepción, dentro de las cuencas Río Concepción-Arroyo Cocospera, Desierto de Altar-Río Bámori y Río San Ignacio y Otros, subcuencas Río Concepción, Río Magdalena, Río Coyote, Arroyo Tesota, Puerto Libertad, Costa Rica y San Ignacio. Destacan los ríos Magdalena, Altar y Seco que se unen a la altura de Pitiquito; prosigue el escurrimiento con rumbo al poniente con el nombre de río Magdalena hasta su confluencia con el río Asunción, y poco después de recibir aportaciones del Arroyo Coyote cambia nombre a río Concepción, el cual conserva hasta su desembocadura en el Golfo de California

El río Asunción es la corriente más importante; drena una superficie de 25,757 km<sup>2</sup> de los cuales 310 km<sup>2</sup> corresponden a territorio de Estados Unidos de Norteamérica. Limita al oriente con la cuenca del río Sonora; al sur con la del río San Ignacio; al norte con la cuenca del río Sonoyta y las de los ríos San Pedro y Santa Cruz; al noroeste con las cuencas de las corrientes poco definidas que descargan directamente en el Golfo de California. La topografía de la cuenca se caracteriza por grandes extensiones de terrenos planos en las zonas media y baja; tiene una altitud media de 700 msnm aproximadamente y una máxima de 2,530 msnm al norte de Cananea, Sonora. La formación montañosa más importante de la cuenca se extiende desde Magdalena, hasta los orígenes del colector general, abarcando además las cuencas de los ríos Babasac, Los Alisos, Coyotillo, Busani y Altar, afluentes del río Concepción.

El río Concepción nace con el nombre de río Casa de Piedra en el cerro Vereda, a 9 km al sureste de Santa Cruz, en el parteaguas con el río Santa Cruz. Su cauce sigue un rumbo suroeste, recibe por su margen derecha al arroyo San Antonio a una altitud de 1,100 msnm y cambia su nombre al de arroyo Cocospera; por su margen izquierda confluye el río Babasac a una altitud de 930 msnm. El arroyo Cocospera recibe las

aportaciones de su primer afluente importante, el arroyo Los Alisos, inmediatamente aguas abajo de Ímuris, por su margen derecha, y toma el nombre de río Los Alisos hasta las inmediaciones de Magdalena, donde el colector general fluye por zonas de topografía más suave y se inicia el aprovechamiento de sus escurrimientos. A partir de Magdalena, el colector general toma el nombre de esta población y continúa con curso hacia el suroeste; pasa por la población Santa Ana donde cruza la carretera Hermosillo-Nogales y aguas abajo, a la altura del ejido la Tinaja, recibe por su margen derecha el arroyo El Coyotillo. Desde la confluencia anterior hasta Caborca, el río Magdalena sigue un curso poniente- norponiente, penetra a zonas de topografía suave donde su cauce se hace divagante y sus escurrimientos se aprovechan parcialmente por derivación. En este tramo los principales aportadores provienen de la margen derecha, como son el arroyo Busani y los ríos Altar y Seco.

A partir de la confluencia del río Altar, el Río Magdalena cambia su nombre por el de Asunción y a él confluye el río Seco, a una altitud de 300 msnm, ligeramente aguas arriba de la estación hidrométrica Pitiquito. Aguas abajo de Caborca, el río Asunción sigue con rumbo oriente hasta llegar a la sierra El Álamo, bordeándola por el norte para después tomar un curso surponiente y finalmente descargar sus aguas en el Golfo de California. En este tramo el arroyo Tesota confluye al río Asunción por la margen izquierda al oriente de la sierra El Álamo, a una altitud de 180 msnm. Aguas abajo recibe al arroyo Coyote por la margen derecha, al norte de la misma sierra, a una altitud de 130 msnm.

El acuífero recibe aportaciones importantes provenientes del río Asunción, así como sus efluentes El Muchachito y El Coyote. Otra fuente de abastecimiento para el sector agrícola, aunque de mínima aportación, es la Unidad por Gravedad de la Presa Cuauhtémoc, localizada en el municipio de Atil, la cual capta las aguas provenientes del río Altar; tiene una capacidad de almacenamiento de 60 Mm<sup>3</sup>, de los cuales solo 40 Mm<sup>3</sup> son disponibles. Cuando su capacidad alcanza de 60 a 70% se riega una superficie de 2,380 ha en tres municipios pequeños que son Atil, Oquitoa y Altar.

### **3.4. Geomorfología**

De acuerdo a la clasificación de Lugo Hubp (1990) el acuífero se localiza en la Provincia de Sonora. Se trata de una región que fue afectada por orogenias en el Precámbrico, el Paleozoico y el Mesozoico. En ella predomina una planicie aluvial y de pie de monte, sobre la que se asientan montañas, las cuales son de menores dimensiones, en área y altura, hacia la costa y aumentan hacia el oriente; producto de la deposición de los

sedimentos acumulados por los ríos hasta la costa. La región se caracteriza por presentar sierras alargadas en sentido norte-noroeste, separadas por extensas llanuras aluviales que parecen sepultar a las sierras. Las unidades geomorfológicas presentes son las siguientes:

Montañas: cuya elevación relativa es mayor a 200 m y su origen se debe a procesos endógenos de plegamiento, magmatismo, vulcanismo y también pueden ser originadas por la disección de una estructura de formación endógena modelada. Lomeríos: de elevación menos a 200 m, producto de procesos endógenos de modelado; Pie de monte: que constituyen las zonas de transición entre la planicie y las montañas; y las llanuras o planicies que presentan poca inclinación en las que se han acumulado depósitos aluviales, fluviales, eólicos y costeros.

La topografía más importante es la planicie aluvial y fluvial, ubicada en la porción central de la subcuenca, con elevaciones promedio entre 50 y 150 msnm. En el área de Caborca-Coyote se encuentra limitada hacia el norte y sur por suaves bajadas asociadas con lomeríos. La llanura se extiende ampliamente a partir del poblado El Coyote, tanto al norte como al sur y al oeste. Hacia el sur se extiende hasta el sitio conocido como "Desemboque".

Los sistemas orográficos más importantes en la región son: Al norte las sierras La Espuma, Durazno y El Cobre cuya altura alcanza 1100 msnm; al noroeste las sierras La Pinta, San Francisco y La Silla, cuyas elevaciones promedio son de 700 msnm; en la porción este las sierras El Humo y San Juan Mezquital, que constituyen elevaciones entre 1000 y 1500 msnm; al suroeste el borde está formado por la Sierra de Santa Rosa, en tanto que al sureste su límite natural es una cadena montañosa de 1000 metros de elevación.

Generalmente las sierras presentan flancos muy escarpados, que normalmente corresponden con fallas regionales; dejando a las sierras como "horst" que sobresalen notablemente de las extensas llanuras aluviales, las cuales son surcadas por las corrientes efímeras tributarias del Río Asunción-Magdalena que cruza al acuífero prácticamente de este a oeste.

La geomorfología es producto de patrones geológicos estructurales resultante de la tectónica que han sufrido las rocas a través del tiempo geológico. Las grandes estructuras geológicas (fallas y estructuras) son las que controlan la mayoría de los cambios en la dirección de las principales corrientes de las cuencas, ya que los ríos

siguen estas zonas de debilidad. Estructuralmente, se patrón regional un sistema de fallas paralelas en dirección general NW-SE, el cual corresponde al tipo Basin and Range Sonorense.

#### **4. GEOLOGÍA**

La geología regional está constituida por un basamento ígneo-metamórfico del Proterozoico Inferior-Medio, denominado Complejo Metamórfico Bámori (Longoria et al., 1978) constituido por gneises y esquistos afectados por un granito micrográfico denominado Granito Aibó, fechado en 1,100 Ma por Anderson y Silver (1979); ambas unidades afloran en la porción sureste del área de estudio (figura 2).

Sobreyaciendo discordantemente, se presentan sedimentos de edad proterozoica, representados por dolomías y areniscas, denominadas Capas Gamuza, que afloran en la porción oriental.

En relación concordante y transicionalmente a dichas capas, se encuentran paquetes de calizas y areniscas; en la porción central, norte y este, sobreyaciendo a estas rocas se encuentran discordantemente (hiato en el Cámbrico Superior) calizas y lutitas de facies de cuenca profunda de edad Ordovícico-Devónico (Carta Geológica-Minera H12-4 "Caborca". Escala 1:250,000). Al norte de la Sierra El Álamo, en la porción centro-sur del acuífero, afloran calizas y limolitas de la Formación Monos (Cooper, 1965) del Pérmico Superior, sobreyacidas discordantemente por calizas y lutitas del Pérmico Superior-Triásico Superior.

Discordantemente sobre ellas, existe una unidad de meta-areniscas y meta-lutitas de edad Triásico Superior, que a su vez son cubiertas discordantemente por un paquete de areniscas y limolitas, calizas y areniscas, areniscas y conglomerados polimícticos del Jurásico, correlacionables con la Formación San Antonio (González, L.C. 1980). Estas unidades afloran principalmente en la Sierra El Antimonio.

En manera aislada afloran en la parte norte del acuífero rocas graníticas y granodioríticas de edad Jurásico Superior (Stewart T.H, 1986). Cabalgando a rocas jurásicas, afloran rocas metavolcánicas y metasedimentarias del Jurásico Medio, consistentes en riolitas, andesitas, areniscas y conglomerados deformados, que conforman casi la totalidad de Sierra La Gloria, en esta localidad cabalga sobre rocas sedimentarias del Jurásico Inferior y del Cretácico-Terciario. En contacto por falla normal con esta unidad, se encuentra la unidad metasedimentaria de la misma edad, constituida por conglomerados polimícticos y areniscas deformadas expuestas en el

Cerro El Álamo. En esta misma porción cabalga a la Formación Morita, constituida por lutitas y areniscas, de edad Aptiano y a su vez está en contacto por falla normal con una secuencia de riolitas y andesitas del Complejo Volcánico El Charro.

Cubriendo discordantemente a las rocas triásicas y jurásicas, aflora una secuencia vulcanosedimentaria constituida por andesitas y areniscas del Cretácico Superior correspondientes a la Formación Tarahumara, que aflora en la Sierra El Álamo. Sobreyaciendo discordantemente y en contacto tectónico con las unidades del Jurásico Inferior, afloran en el flanco suroccidental de la Sierra La Gloria y Cerro El Álamo, los conglomerados polimícticos rojos y areniscas de edad Cretácico Superior-Terciario Paleoceno.

Afectando a las unidades anteriores, se presentan rocas intrusivas representadas por gabros, granitos, granodioritas y dioritas que se encuentran distribuidas en la mayor parte del área; estas unidades han sido fechadas por el método K-Ar, obteniendo edades que varían de  $64.3 \pm 2$  Ma (Damon et al., 1983) a  $80.9 \pm 1.8$  Ma (De Jong, 1988). Del terciario afloran secuencias de rocas volcánicas, representadas por andesitas, toba andesíticas, riolitas, riodacitas y basaltos. El Pleistoceno está representado por depósitos semiconsolidados y no consolidados de piedemonte, constituidos por conglomerados polimícticos, gravas y arenas; el Holoceno por materiales aluviales, depósitos eólicos, lacustres y palustres (figura 2).

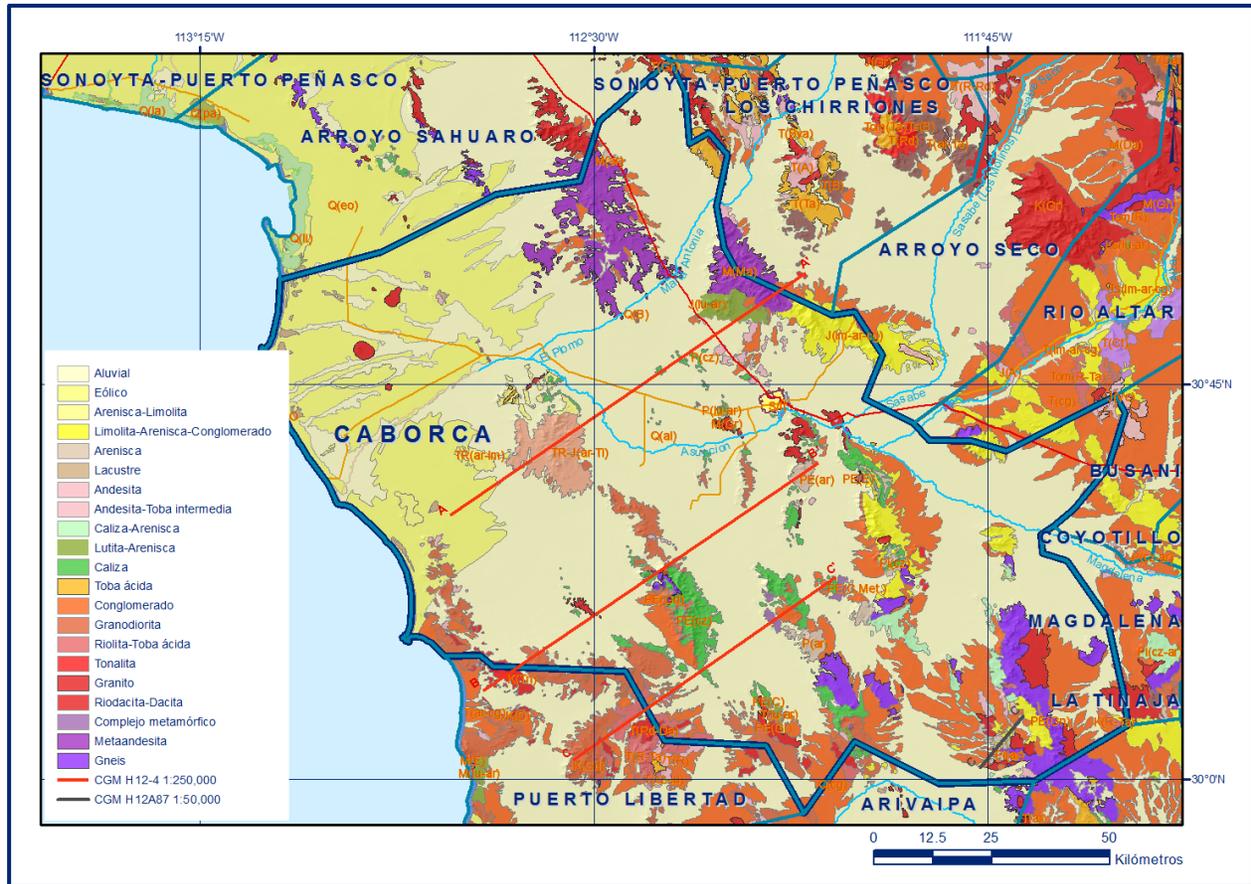


Figura 2. Geología general del acuífero

#### 4.1. Estratigrafía

En esta extensa cuenca se depositaron sedimentos marinos desde el Precámbrico hasta principio del Mesozoico, época en la que fueron intrusionado por grandes cuerpos plutónicos que metamorfizaron a las secuencias anteriores, ocasionando la formación de grandes depósitos de sedimentos de origen tectónico por el levantamiento de enormes sierras. El tectonismo continuó durante todo el Mesozoico, dando lugar a la formación de materiales clásticos que se depositaron sobre las rocas metamórficas, antes de las emisiones volcánicas del Terciario. El relleno de las depresiones fue propiciado por la intensa erosión desde el Terciario hasta el Reciente, las cuales tienen su representación actual en los valles de Pitiquito, Caborca, Bizani y Coyote Costa.

En la porción sur existen espesores mayores de depósitos granulares y en la norte solo existen pequeños valles labrados por corrientes secundarias, en los que se han acumulado delgadas cubiertas de materiales cuaternarios y terciarios.

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende rocas con edades que varían del Precámbrico al Holoceno y están constituidas por rocas sedimentarias, ígneas intrusivas y volcánicas.

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas que se encuentran en el área de la más antigua a la más reciente:

### **PRECÁMBRICO**

Dentro del área de estudio afloran rocas precámbricas metamórficas, las más antiguas de México, constituidas principalmente por esquistos micáceos, cuarcitas, gneis y un complejo metamórfico. Sus afloramientos se encuentran concentrados en la porción sur del acuífero. Rocas graníticas y granodioríticas se presentan de manera aislada al suroeste y este de Bámori, respectivamente. El Precámbrico Superior está representado por secuencias de areniscas y calizas correlacionables, que afloran al sur de la ciudad de Caborca.

### **PALEOZOICO**

Está representado por una secuencia detrítico-carbonatada que fue depositada en un ambiente de plataforma somera, cuyas edades varían del Cámbrico al Pérmico, que cubre concordantemente los sedimentos del Precámbrico Tardío. Estas secuencias están constituidas de calizas, areniscas y lutitas principalmente, que han sido subdivididas por diversos autores en numerosas formaciones, no diferenciadas en el área de estudio. Entre estas formaciones están Puerto Blanco, La Proveedora, Buelna, Cerro Prieto, Los Arrojos y El Tren y constan de secuencias principalmente calcáreo-detríticas. Las secuencias calcáreas conforman las formaciones Murciélagos, Represo (o Bisani), Monos afloran extensamente al norte de Caborca y Altar, y al oriente de esta última, principalmente en las sierras La Gloria-El Álamo, El Chanate, El Puerto y Cerro Carnero.

### **MESOZOICO**

Representado por una secuencia marina, con depósitos calcáreos, arcillo-calcáreos y arcillo-arenosos. Afloran también rocas ígneas intrusivas y extrusivas de composición ácida a intermedia, así como un complejo metamórfico. Al suroeste de Caborca aflora una asociación de arenisca-toba intermedia de edad Triásico-Jurásico.

Respecto a rocas jurásicas, aflora una secuencia vulcanoclástica al sureste de Pitiquito, así como dioritas, tonalitas y una asociación de riolita-toba ácida.

Las rocas graníticas, granodioritas e intrusivos indiferenciados afloran en la mitad sur del área; al suroeste de Caborca, constituyen la Sierra de Lista Blanca y Cerro Calera. Afloran también al noroeste de la Sierra del Viejo en el Cerro Pozo Prieto y en algunos afloramientos menores en la porción oriental de los Cerros el Álamo y Colorado. Los intrusivos más antiguos reportados corresponden al del Cerro El Sahuaro, ubicado cerca de la costa.

Las rocas sedimentarias marinas afloran principalmente en la Sierra del Álamo y están constituidas por areniscas calcáreas, limolitas arenosas, lutitas y areniscas, que afloran al norte de Caborca; todas del Triásico-Jurásico. En la Sierra del Álamo también se encuentran ampliamente expuestas areniscas, tobas y derrames andesíticos de esta misma edad.

## **CENOZOICO**

Las rocas cenozoicas en el área están representadas por afloramientos de andesitas y basaltos, así como extensos afloramientos de conglomerados. Las rocas terciarias están representadas por rocas ígneas intrusivas y extrusivas. Al suroeste del área existen afloramientos de riolitas-tobas ácidas y riolitas-tobas ácidas. En el extremo norte del acuífero afloran rocas graníticas.

En el Eoceno-Mioceno se desarrolló el último evento volcánico de la región, depositando discordantemente andesitas y tobas andesíticas, sobreyacidas concordantemente por otro paquete de la misma litología y otros de flujos riolíticos y riolíticos. De esta misma edad afloran andesitas y basaltos de edad Mioceno superior. Afectando a las rocas anteriores, se presentan cuerpos de tipo pórfido andesítico y riolítico en las regiones noreste y sureste. Respecto a rocas sedimentarias terciarias, afloran secuencias de areniscas-limolitas.

A fines del Terciario y principio del Cuaternario tuvo lugar una importante actividad volcánica de naturaleza basáltico-alcalina, que ha sido relacionada; junto con la tectónica distensiva de fallas normales, con los episodios de apertura del Golfo de California (Rangin, 1978). Este volcanismo tiene su más claro ejemplo en las serranías del Pinacate situada en el Desierto de Altar. En el área de estudio se encuentran escasos afloramientos al oeste de Coyote, y en el Arroyo El Coyote. Están constituidos por basaltos de olivino de textura afanítica y estructura vesicular.

## **CUATERNARIO**

Está representado por depósitos aluviales y fluviales que representan la unidad geológica de mayor importancia. Su granulometría se compone de arenas, gravas y limos, se encuentran distribuidas en dos grandes grupos: depósitos aluviales que ocupan las áreas planas de los valles, y los depósitos fluviales que forman las terrazas excavadas por las corrientes superficiales que descienden hacia la planicie aluvial. Hacia la zona costera se presentan depósitos eólicos, lacustres y palustres.

### **4.2. Geología estructural**

La estructura regional más sobresaliente en Sonora es la hipotética Megacizalla Mojave-Sonora (Anderson y Silver, 1979), que corresponde a una estructura sinistral con un desplazamiento lateral de 700 a 800 km con orientación NW-SE, la cual fue interpretada como falla activa durante el Jurásico Temprano a Medio. El estilo de deformación de las rocas sobre la traza de la Megacizalla se manifiesta como fracturamientos, fallamientos y zonas de esquistosidad afectando a rocas del Jurásico Inferior y Medio.

Superpuestas a este estilo de deformación, se tienen cabalgaduras, plegamientos y esquistosidad que afectan tanto a las rocas jurásicas como a las del Cretácico Inferior, atribuibles a la Orogenia Laramide. El terreno Caborca ha sido afectado al menos por dos eventos tectónicos precámbricos: la Orogenia Mazatzal y Greenville, esta última refleja el plutonismo de la actividad tectónica de la fase “Greenville” de América del Norte.

Durante el Cretácico Superior-Terciario Inferior se presentó una etapa de intenso tectonismo, cuyas estructuras mayores son cabalgaduras y plegamientos en los que las rocas del basamento proterozoico cristalino y rocas sedimentarias del Proterozoico Superior y Cámbrico cabalgan sobre rocas sedimentarias del Jurásico Inferior, como ocurre en las sierras La Víbora y La Joroba, donde el Precámbrico sedimentario se encuentra fuertemente plegado. También existen fallas inversas como en el Cerro El Álamo, donde metaconglomerados cabalgan a rocas de la Formación Morita, que atestiguan la tectónica compresiva que los afectó. De Jong (1988), concluye que el cabalgamiento en el área de Caborca tuvo lugar durante el Cretácico Tardío entre 98 y 80 Ma, que corresponde a la Orogenia Laramide. La mayor parte de la configuración actual de la región se debe al fallamiento normal del Terciario Medio. La tectónica producida durante esta fase, trunca las estructuras preexistentes y las anteriores quedan en ocasiones completamente enmascaradas por este fallamiento regional de

tipo normal, atribuido a la distensión de cuencas y sierras ("Basin and Range") (Carta Geológica-Minera H12-4 "Caborca". Escala 1:250,000).

El sistema estructural de fosas y pilares es característico de esta región y está definido fisiográficamente por sierras y valles paralelos, que en superficie conforman grandes planicies y en el subsuelo forman depresiones o paleocanales rellenos de sedimentos detríticos no consolidados. En la zona costera, los antiguos cauces de descarga de los ríos y arroyos constituyen conductos preferenciales para los frentes de intrusión marina.

Por otro lado, los pilares constituyen altos gravimétricos de rocas graníticas o metamórficas que forman lomeríos de baja altura y en el subsuelo actúan como barreras a la penetración de agua marina.

### **4.3. Geología del subsuelo**

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica, geológica superficial, cortes litológicos de pozos y geofísica, recabada en el acuífero en diversos estudios previos (TMI, 1975; ICG, 1977, CONAGUA 2007), es posible definir que el acuífero está conformado por dos unidades que presentan conexión hidráulica entre ellas. La porción superior está constituida por materiales clásticos de diferente granulometría y origen: gravas y arenas intercaladas con materiales finos, que conforman depósitos aluviales, de piedemonte, fluviales, eólicos, lacustres, de playa y de barra; en general de buena permeabilidad, que recargan a las unidades más profundas. Su espesor promedio es de 300 m y es la unidad que se explota intensivamente y que ha mostrado los mayores abatimientos. La unidad inferior se aloja en los sedimentos clásticos de tipo conglomerático de la Formación Báucarit, compuesta por clásticos de rocas volcánicas (andesitas, riolitas y granitos), así como arenas gruesas y limos, dispuestos en capas delgadas que presentan estructura laminar. Estos depósitos se encuentran alternando con derrames volcánicos de composición basáltica y riolítica.

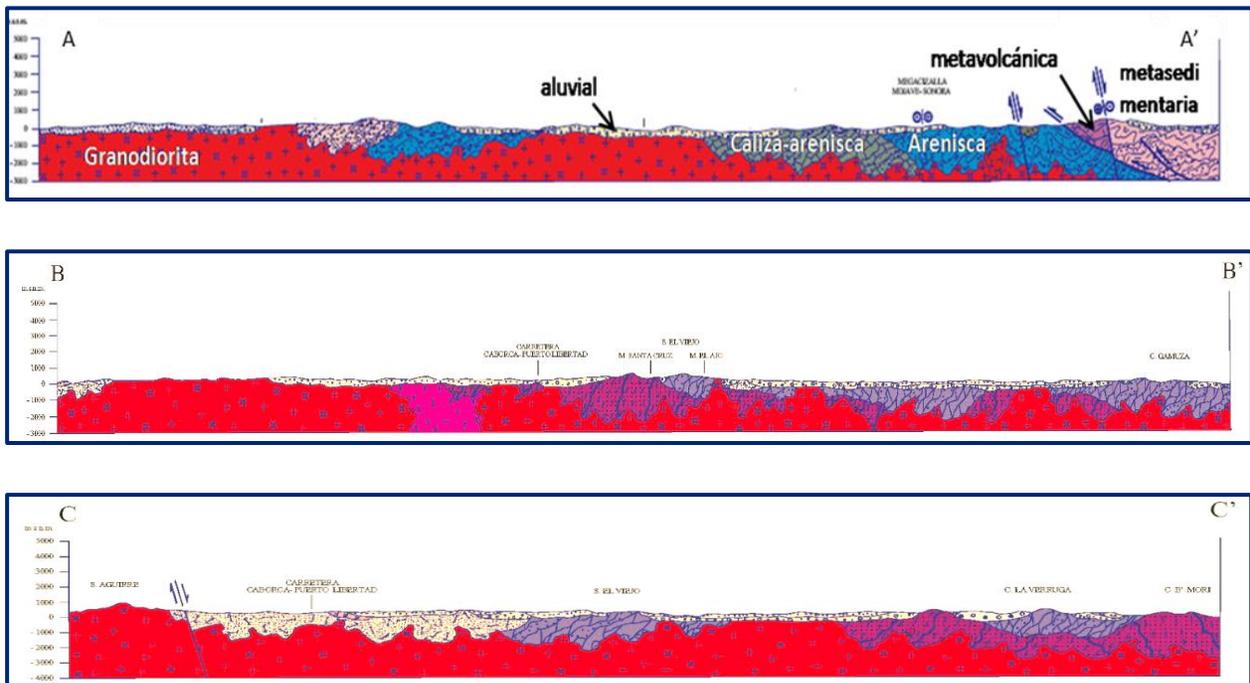
Estas dos unidades se encuentran divididas por capas, lentes y estratos de arcilla de color gris-azul, que contiene fósiles marinos, prácticamente impermeables, conocida regionalmente como "arcilla azul" cuyo espesor promedio varía de 180 a 340 (Monreal *et al.* 2000), aumentando gradualmente hacia la costa.

El basamento geohidrológico, así como las fronteras y barreras al flujo subterráneo, se encuentran constituidos por rocas intrusivas y extrusivas, así como metamórficas. Los sondeos geofísicos permitieron identificar 6 litologías diferentes (figura 3), que de la

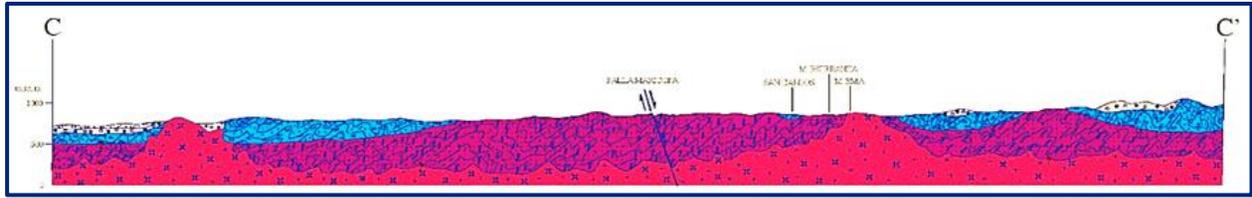
más antigua a la más joven son: caliza-arenisca de edad paleozoica por su posición estratigráfica, arenisca del Triásico Inferior, metasedimentarias y metavolcánicas del Triásico Superior, granodiorita del Cretácico-Terciario y depósitos aluviales del Cuaternario.

De manera local, es posible identificar diferencias en la conformación del acuífero. Hacia la zona de El Desemboque se presentan horizontes de distinta composición y granulometría. La capa más somera corresponde con gravas, arenas y arcillas, en la cual el contenido de arcillas disminuye hacia la zona costera, esta capa tiene un espesor que varía, de sureste a noroeste, de 50 a 150 m aproximadamente; debajo de esta capa se encuentra una capa de arcillas de color azul con un espesor mayor a 150 m, el cual se incrementa hacia el noroeste de El Desemboque. Subyaciendo a la arcilla azul se presenta una arcilla de color marrón con gravillas, con un espesor aproximado de 100 m; y finalmente, a una profundidad aproximada de 250 m se encuentra la capa de cuarcita alterada.

Hacia el noreste del poblado El Coyote se ha reportado una capa de gravas y arenas con un espesor aproximado de 200 m, que se acuña hacia el noreste, subyacida por una capa arcillosa de la cual de espesor desconocido. En la porción norte de la zona costera se presenta una capa superficial de gravas y arenas de espesor variable, que subyace a una capa de arcillas de color azul de espesor desconocido.



Fuente: Carta Geológica H12-4 Caborca 1:250,000 (2002)



Fuente: Carta Geológica H12A87 La Ciénega 1:50,000 (2006)

Figura 3. Sección Geológica Esquemática

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

La información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos y la información de la geología superficial, permiten establecer que el acuífero es de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos a mayor profundidad, conformando un medio heterogéneo y anisotrópico. El acuífero está integrado por dos unidades que presentan conexión hidráulica:

La primera unidad está constituida por depósitos clásticos aluviales y fluviales de diferente granulometría y origen, intercalados con depósitos eólicos, litorales y sedimentos finos, que en general presentan permeabilidad alta y porosidad para almacenar el agua de la subcuenca del Río Asunción en el tramo comprendido entre Pitiquito y Caborca, que funciona regionalmente como acuífero libre y constituyendo la unidad geohidrológica más importante que actualmente se explota.

El espesor de estos depósitos es de aproximadamente de 60 m en el área de Pitiquito, 170 m en Caborca, 100 m en el área de El Coyote-Zona Costera y hasta 400 m en la región de Bizani.

La segunda unidad se encuentra constituida por una capa de materiales clásticos (gravas y arenas) terciarios, empacados en una arcilla de color rojo, con un espesor reducido de tan solo 50 m, por lo que no representa una unidad acuífera importante, debido a la presencia de dicha arcilla que reduce considerablemente su permeabilidad.

Estas unidades se encuentran divididas por una capa de arcilla de color gris-azul, que contiene fósiles marinos, prácticamente impermeable, conocida regionalmente como "arcilla azul", cuyo espesor es de 230 m en la zona costera. Debido a su baja permeabilidad se encuentra confinando parcialmente a la segunda unidad. El

basamento hidrogeológico o piso del acuífero, está conformado por rocas intrusivas y metamórficas, de extensión reducida y espesor del orden de 30 a 50 m.

## **5.2. Parámetros hidráulicos**

Para la estimación de los parámetros hidráulicos de las unidades geológicas que conforman el acuífero, se analizó la información de pruebas de bombeo, la mayoría de ellas de corta duración, que se han realizado como parte de estudios previos a lo largo de varias décadas (SARH, CONAGUA, UNISON).

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se determina que los valores de transmisividad varían de  **$5.0 \times 10^{-4}$  a  $7.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$** , los valores más altos corresponden a los depósitos del cauce del Río Asunción o Magdalena y se registran entre las localidades El Coyote y Bizani, disminuyendo hacia el este y oeste. En la región de El Coyote-Costa, los valores varían entre  $5.0 \times 10^{-3}$  y  $7.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ , mientras que en la región de Pitiquito-Caborca los valores son menores a  $2.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ; finalmente, en la región de Bizani, los valores se encuentran en un rango de  $5.0 \times 10^{-3}$  a  $4.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . En la planicie costera los valores de transmisividad son bajos, debido al incremento en los materiales finos.

Los caudales específicos tienen una variación muy semejante a la transmisividad y presentan valores entre 2 y 40 lps/m. Los coeficientes de almacenamiento obtenidos mediante la interpretación de pruebas de bombeo varían de  $8 \times 10^{-5}$  a  $1 \times 10^{-1}$ , en tanto que los valores de rendimiento específico varían de 12.6% en el área Pitiquito-Caborca, 14% en el Bizani y 12.9 % en la zona Coyote-Costa.

## **5.3. Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en el año 2000, 2006 y 2007, además de registros históricos durante el periodo 1970-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Noroeste, durante los paros de bombeo que realiza expreso para ello. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial.

## **5.4. Comportamiento hidráulico**

### **5.4.1. Profundidad al nivel estático**

De acuerdo con la profundidad al nivel del agua subterránea, el año 2019 presentó valores que variaron de 15 a 120 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera y del cauce del río Magdalena o Asunción hacia las

estribaciones de las sierras que limitan la planicie. Los niveles estáticos más someros, de 15 a 30 m, se registran en la zona costera, a la altura de los poblados El Desemboque y Ejido Álvaro Obregón, desde donde se incrementan gradualmente hacia el este, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 110 a 120 m, se presentan en la porción central de la zona de explotación, entre Ejido El Coyote y Caborca (figura 5).

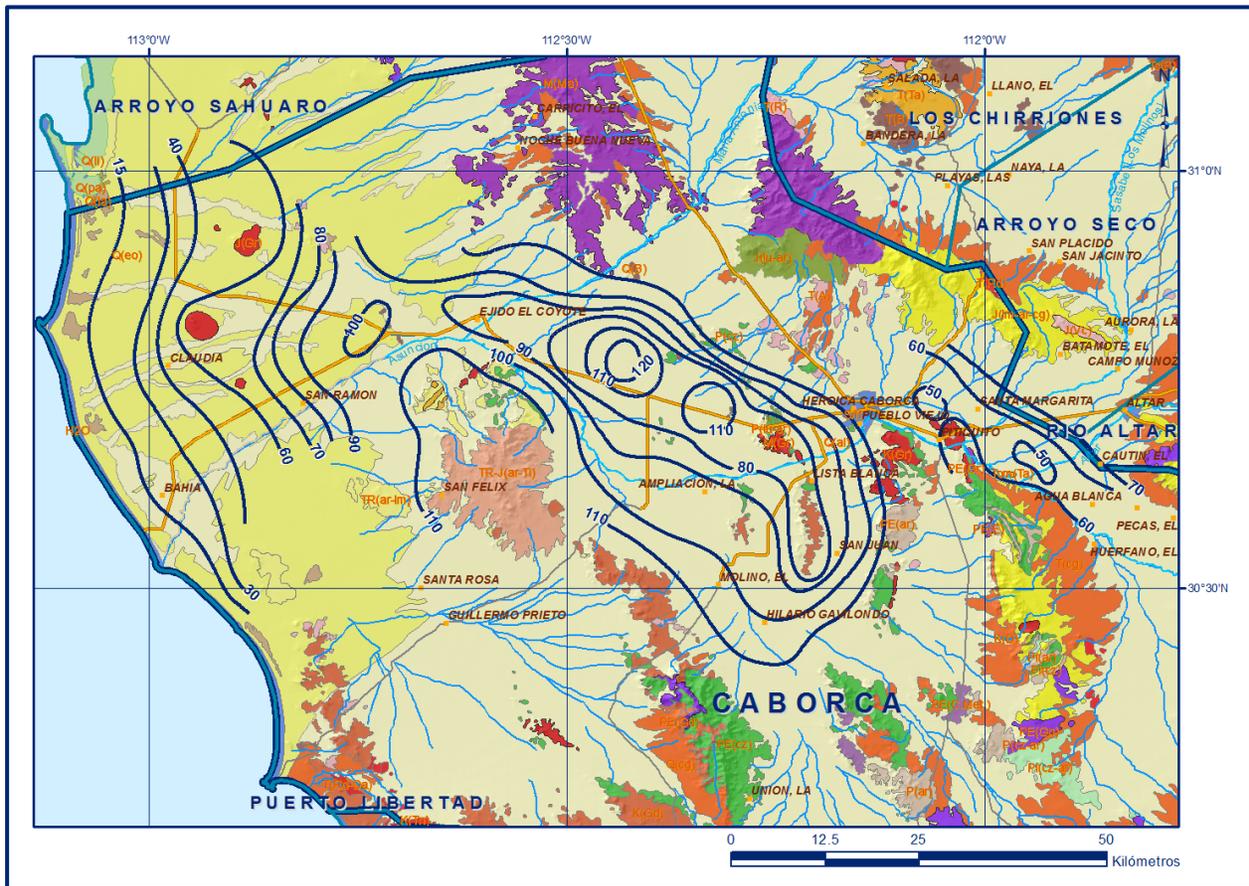


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2019)

#### 5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2019 registró valores que variaron de 320 a -30 msnm. Debido al gradiente topográfico entre la porción oriental y occidental, solo en la superficie costera de la zona de explotación se presentan elevaciones por debajo del nivel medio del mar debido al avance de la intrusión marina.

De la zona de confluencia de los ríos El Coyote y Asunción, los valores de elevación se incrementan hacia el este y sureste, en dirección a Caborca, Pitiquito y Altar. Los valores más altos se presentan en el extremo oriental y en la porción suroriental de la

zona de explotación, con 320 y 180 msnm, respectivamente, desde donde descienden gradualmente al oeste y noroeste. La dirección preferencial del flujo subterráneo es este oeste, desde la zona del límite con los acuíferos Arroyo Seco y Río Altar, y sureste-noroeste, desde la porción suroriental del acuífero. Ambas direcciones convergen en la zona de confluencia de los ríos Asunción y El Coyote, para después adoptar una dirección franca al oeste, hacia la costa del Golfo de California (figura 6).

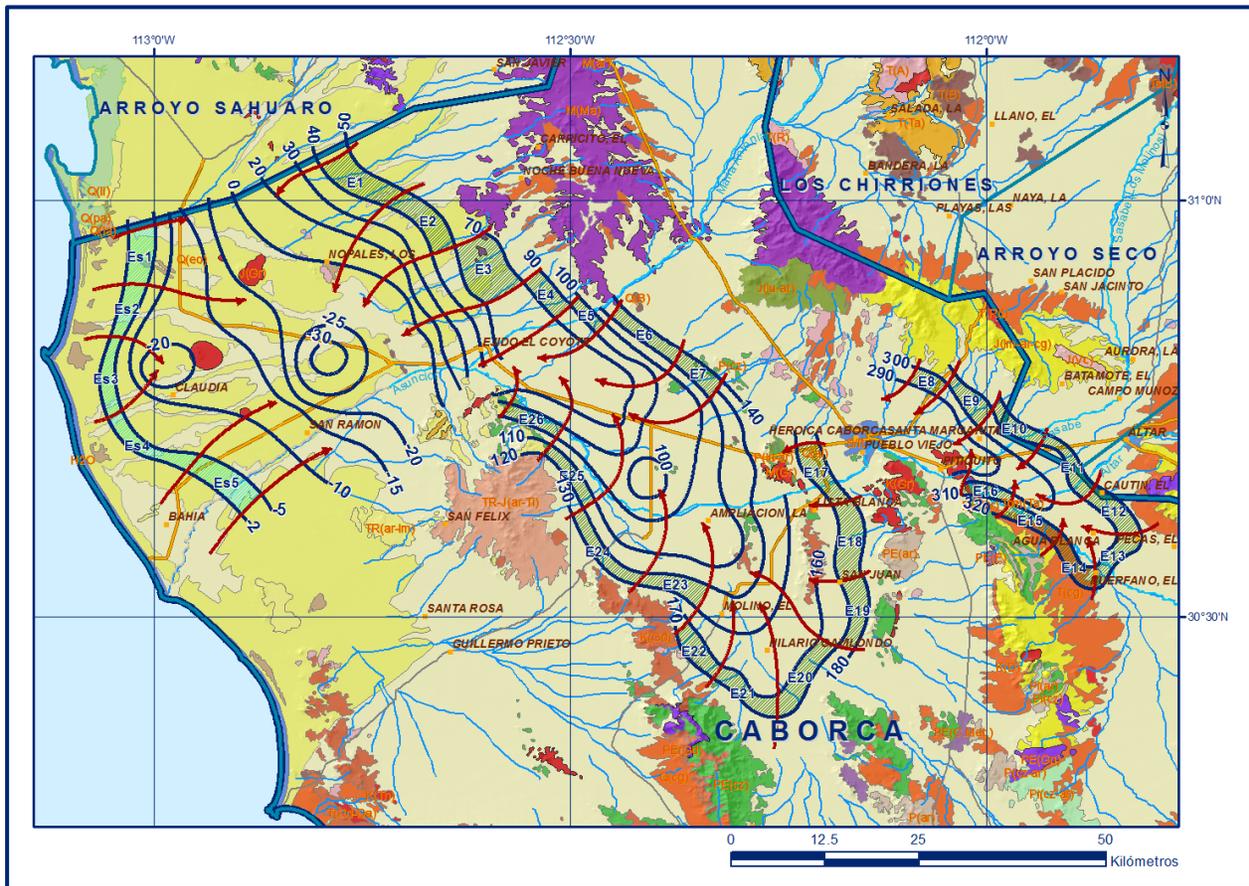


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 registró valores de abatimiento que varían desde algunos centímetros, en toda la zona cercana a las estribaciones de las sierras, hasta 10 y 20 m que se observaron en las zonas de mayor concentración de la extracción, localizadas en el centro de los valles y en la zona costera.

Los mayores abatimientos de 10 a 20 m para el periodo analizado, que representan un ritmo anual de 1.0a2.0 m, se registran en la región cercana a la costa ubicada en el Ejido

Álvaro Obregón. A lo largo del cauce del río Asunción o Magdalena y del arroyo El Bámuri se registra conos de abatimiento de 10 m, es decir 1.0 m anuales. En el extremo occidental, a lo largo de la zona costera, el ingreso de agua salada genera recuperaciones del nivel del agua subterránea de hasta 1.5 m, que representan 0.15 m anuales (figura 7).

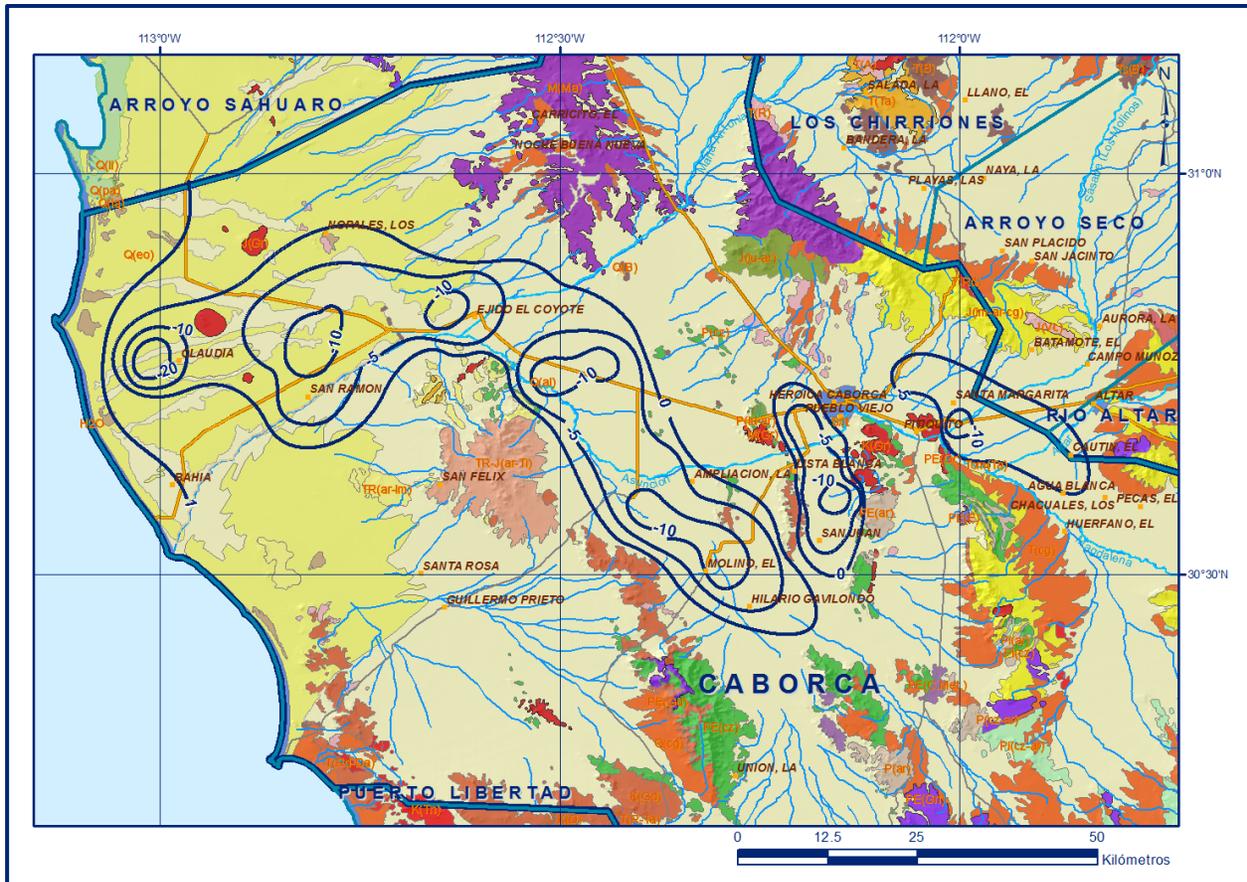


Figura 7. Evolución del nivel estático en m (2009-2019)

### 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo de los estudios realizados en el año 2007, se tomaron 24 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones de laboratorio incluyeron temperatura, conductividad eléctrica, Eh, pH, iones mayoritarios, salinidad, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos y elementos traza, para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero. Aunque de manera general las concentraciones de los diferentes iones y elementos sobrepasaron los límites máximos permisibles (LMP) que

establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos, la concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores extremos que varían de 700 a 4,100 mg/l. Las mayores concentraciones de STD se registran en la zona costera y las menores en la porción oriental y suroriental del acuífero, confirmando de esta manera las direcciones preferenciales del flujo subterráneo.

Según la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995) el agua varía de dulce a marina, ya que los valores oscilan entre 830 y 5030  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores de temperatura varían de 22 a 35.5 °C y los de pH entre 6.5 y 8.5. En la porción costera es donde se presenta la temperatura más alta, con un valor de 35.5 °C la cual se presenta en el Ejido Último Esfuerzo. La zona central presenta temperatura promedio de 27.7 °C y las temperaturas mínimas más bajas en las zonas aledañas a la Sierra El Álamo.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las muestras analizadas se clasifican como  $\text{C}_2\text{-S}_1$  y  $\text{C}_3\text{-S}_1$ , que representan agua de salinidad media a alta y contenido bajo de sodio intercambiable, que en general no es apta para la agricultura, salvo algunos cultivos resistentes a la salinidad en suelos con buen drenaje que requieren lavados periódicos.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias sódico-clorurada y cálcica-clorurada, típicas de la franja costera influenciada por la intrusión marina. Hacia las zonas de recarga ubicadas en las regiones suroriental y oriental, a lo largo del cauce del río Asunción o Magdalena y de los arroyos El Coyote y El Bámuri, el agua es cálcica-bicarbonatada y sódica-bicarbonatada, que representan agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que fluyen a través de rocas volcánicas y calcáreas.

En la zona costera se presentan concentraciones de Ca, Na, Cl,  $\text{SO}_4$  y dureza total que superan los LMP que establece la norma mexicana para el agua destinada al consumo humano. En las zonas central y Caborca-Pitiquito, se detectaron altas concentraciones de bromuro, posiblemente debido a la utilización de insecticidas agrícolas a base de bromuro de metilo.

## 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2007, complementada con información 2022 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) y volúmenes de extracción 2010-2022 del Distrito de Riego, proporcionada por el Organismo de Cuenca Noroeste, se registró la existencia de 842 aprovechamientos del agua subterránea, de cuales 523 son pozos y 319 norias. Del total de obras, 88 se utilizan para la agricultura, 396 para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 338 para uso doméstico-pecuario, 14 para uso industrial y 6 para servicios. Falta conocer el No. de pozos del DR.

Folio 1 842 aprovechamientos: 88 para uso agrícola, 34 doméstico, 304 pecuario, 396 P-U, 14 industrial y 6 para servicios

El volumen total de extracción calculado es de **316.0 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 297.6 hm<sup>3</sup>(94.2%) son para uso agrícola, 8.4 hm<sup>3</sup>(2.7%) para uso público-urbano, 1.1 hm<sup>3</sup>(0.3%) para satisfacer las necesidades del uso pecuario-doméstico, 3.8 hm<sup>3</sup>(1.2%) para uso industrial y 5.1 hm<sup>3</sup>(1.6%) para servicios.

## 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2009-2019, en una superficie de **4,330 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

## 7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). Adicionalmente, debido a la intrusión marina, existe ingreso de agua salobre (Es) procedente de la franja costera.

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri).

Para este caso, debido a que el volumen destinado al uso público-urbano es pequeño, para fines del balance de aguas subterráneas solo se considera la recarga incidental debida a los retornos del riego agrícola.

### 7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V(S)$ ) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

$$Rv + Ed + Ri + Es - B - Ssb = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

**Rv:** Recarga vertical

**Ed:** Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)

**Es:** Entradas por flujo subterráneo horizontal salobre (agua salobre)

**Ri:** Recarga incidental

**B:** Bombeo

**Ssb:** Extracción de agua salobre

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

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

$$Rv = B + Ssb \pm \Delta V(S) - Ed - Ri - Es \quad (2)$$

### 7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce (Ed)

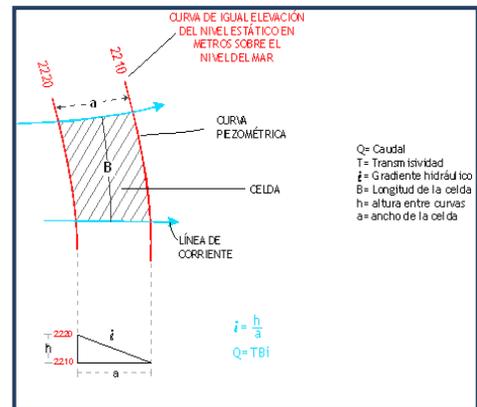
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 6. Con base en ella 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:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

- Q:** Caudal ( $m^3/s$ )
- T:** Transmisividad ( $m^2/s$ )
- B:** Longitud de la celda (m)
- i:** Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce es de **118.5 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
Ed1	8900	3600	10	0.0028	0.003	0.0742	2.3
Ed2	9350	3000	10	0.0033	0.003	0.0935	2.9
Ed3	8300	5600	20	0.0036	0.003	0.0889	2.8
Ed4	6000	2600	20	0.0077	0.005	0.2308	7.3
Ed5	4750	1560	10	0.0064	0.008	0.2436	7.7
Ed6	9550	1780	30	0.0169	0.002	0.3219	10.2
Ed7	6200	2330	30	0.0129	0.003	0.2395	7.6
Ed8	4000	2350	10	0.0043	0.002	0.0340	1.1
Ed9	6570	2620	10	0.0038	0.003	0.0752	2.4
Ed10	7750	2000	10	0.0050	0.005	0.1938	6.1
Ed11	9580	2100	10	0.0048	0.005	0.2281	7.2
Ed12	7250	2800	10	0.0036	0.003	0.0777	2.4
Ed13	7500	2000	10	0.0050	0.007	0.2625	8.3
Ed14	7300	2500	10	0.0040	0.002	0.0584	1.8
Ed15	7200	1800	10	0.0056	0.002	0.0800	2.5
Ed16	6100	1850	10	0.0054	0.003	0.0989	3.1
Ed17	9000	2200	10	0.0045	0.008	0.3273	10.3
Ed18	10400	3100	10	0.0032	0.003	0.1006	3.2
Ed19	9700	2200	10	0.0045	0.002	0.0882	2.8
Ed20	10600	2800	10	0.0036	0.005	0.1893	6.0
Ed21	8900	2100	10	0.0048	0.003	0.1271	4.0
Ed22	7300	3100	10	0.0032	0.003	0.0706	2.2
Ed23	7800	2450	10	0.0041	0.003	0.0955	3.0
Ed24	12300	1800	10	0.0056	0.002	0.1367	4.3
Ed25	8950	1750	10	0.0057	0.003	0.1534	4.8
Ed26	7000	2000	10	0.0050	0.002	0.0700	2.2
<b>TOTAL</b>						<b>118.5</b>	

### 7.1.3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (Es)

Las entradas de agua salobre, por flujo subterráneo horizontal, fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas de agua dulce, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 6. El volumen total de entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal es de **14.5 hm<sup>3</sup>/año** (tabla 3).

Tabla 3. Entradas por flujo subterráneo horizontal de agua salobre (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	Gradiente i	T ( $m^2/s$ )	CAUDAL Q ( $m^3/s$ )	VOLUMEN ( $hm^3/año$ )
Es1	7500	3100	3	0.0010	0.0050	0.0363	1.1
Es2	7350	2500	3	0.0012	0.0050	0.0441	1.4
Es3	10500	2000	3	0.0015	0.0050	0.0788	2.5
Es4	11900	1850	3	0.0016	0.0100	0.1930	6.1
Es5	8800	3700	3	0.0008	0.0150	0.1070	3.4
<b>TOTAL</b>							<b>14.5</b>

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

#### 7.1.4. Recarga incidental(Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 5% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga efectiva, tomando en cuenta la profundidad promedio al nivel del agua subterránea entre 60 y 90 m en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera, considerando que para el uso agrícola se utilizan 297.8  $hm^3$  anuales y que un 5% de éste recarga de manera efectiva al acuífero en las zonas que no tienen riego tecnificado, se obtiene una recarga incidental por los retornos del riego agrícola de 14.9  $hm^3$  anuales. Por lo tanto, **Rr = 14.9 $hm^3$  anuales.**

## 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo de agua dulce y salobre.

### 7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **316.0  $hm^3$  anuales.**

### 7.2.2. Salidas de agua salobre por bombeo (Ssb)

No existe información de la extracción de agua salobre; sin embargo, se considera que su volumen es al menos de la misma magnitud que el volumen de las entradas por flujo subterráneo de agua salobre procedente de la franja costera. Por lo tanto, **Ssb = 14.5 hm<sup>3</sup> anuales.**

### 7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 que se muestra en la figura 7. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico **Sy = 0.1**, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 4,330 km<sup>2</sup>, mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

**ΔVS:** Cambio de almacenamiento en el período analizado

**S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

**A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

**h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 4, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -1182.2 hm<sup>3</sup>, es decir, un promedio anual de -118.2 hm<sup>3</sup>. Por lo tanto, **ΔV(S) = -118.2 hm<sup>3</sup> anuales.**

Tabla 4. Cálculo de cambio de almacenamiento (2009-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Sy	ΔV(S) (hm <sup>3</sup> /año)
-20	-20.0	18.6	0.1	-37.2
-10 a -20	-15.0	32.9	0.1	-49.4
-10	-10.0	210.0	0.1	-210.0
-5 a -10	-7.5	963.0	0.1	-722.3
0 a -5	-2.5	767.5	0.1	-191.9
0 a 1	0.5	571.0	0.1	28.6
	<b>TOTAL</b>	<b>1992.0</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-1182.2</b>
	<b>Promedio anual</b>			<b>-118.2</b>

### 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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + S_{sb} \pm \Delta V(S) - E_d - R_r - E_s \\ R_v &= 316.0 + 14.5 - 118.2 - 118.5 - 14.9 - 14.5 \\ R_v &= 64.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_d + R_r \\ R &= 64.4 + 118.5 + 14.9 \\ R &= 197.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

**R** = Recarga total media anual

**DNC** = Descarga natural comprometida

**VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

### 8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como

incidental. Para este caso su valor es **197.8 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 182.9 hm<sup>3</sup> son recarga natural y 14.9 hm<sup>3</sup> recarga incidental.

## **8.2. Descarga natural comprometida (DNC)**

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero Caborca, no existen descargas naturales comprometidas. Por lo tanto, **DNC = 0.0 hm<sup>3</sup> anuales.**

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

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), 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 **334,320,085 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 197.8 - 0.0 - 334.320085 \\ \text{DMA} &= -136.520085 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su **déficit** es de **136'520,085 m<sup>3</sup>**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 1996. Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación en el acuífero Caborca. Realizado por Hidrosistemas Universales, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua. 2006. Estudio de caracterización fisicoquímica y piezometría de los acuíferos costeros de la región noroeste. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, 2007. Estudio técnico para determinar la factibilidad de extracción de agua subterránea salobre para su desalación, en los acuíferos de Caborca, Puerto Libertad, Arivaipa y Fuerte-Mayo, Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Caborca, estado de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019. Información piezométrica del acuífero Caborca, estado de Sonora.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1975. Interpretación de datos y determinación del potencial actual del acuífero en la Costa de Caborca, Sonora. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1977. Elaboración del modelo matemático para simular el avance de intrusión salina de la Costa de Caborca, Sonora. Realizado por Ingenieros Civiles Geólogos y Asociados, S.A. Consultores.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológica-Minera H12-4Canorca. Escala 1:250,000

Servicio Geológico Mexicano, 2006. Carta Geológica H12A87 La Ciénega 1:50,000 (2006).