



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ARIVAIPA (2618), ESTADO DE SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación Administrativa del acuífero	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	5
3.1	Provincia fisiográfica.....	5
3.2	Clima.....	6
3.3	Hidrografía	8
3.4	Geomorfología.....	10
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1	Estratigrafía	11
4.2	Geología estructural	12
4.3	Geología del subsuelo	13
5	HIDROGEOLOGÍA.....	13
5.1	Tipo de acuífero	13
5.2	Piezometría	13
5.3	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	14
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	16
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	17
7.1	Entradas	18
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	18
7.2	Salidas.....	19
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	19
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	19
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	19
8	DISPONIBILIDAD	20
8.1	Recarga total media anual (R).....	21
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	21
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	21
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	22
9	BIBLIOGRAFÍA	23

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 Arivaipa con la clave 2618 por la Comisión Nacional del Agua. El área administrativa del acuífero Arivaipa, se localiza en la Región Hidrológica 8, Sonora Norte, en la porción oeste del estado de Sonora, limita al norte con los acuíferos Puerto Libertad y Caborca, al este y sur con el acuífero Costa de Hermosillo y al oeste con el Océano Pacífico (figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

El acuífero se encuentra en el municipio de Pitiquito, cuya cabecera municipal la constituye la población de Pitiquito, Sonora.

Según datos del censo de población y vivienda del INEGI (2000), el municipio de Pitiquito cuenta con una población de 7,743 habitantes, (4,022 en la cabecera municipal y 3,721 en el resto del municipio). Destacan por el número de habitantes, las poblaciones de Puerto Libertad y El Desemboque.

La poligonal simplificada que delimita al acuífero se encuentra definida por 19 vértices, cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 2618 ARIVAIPA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	112	14	113	29	24	30.6	
2	112	3	48.0	29	5	29.9	
3	111	59	32.6	28	53	46.9	
4	112	2	27.5	28	52	55.5	DEL 4 AL 5 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
5	112	25	57.1	29	33	20.4	
6	112	25	17.6	29	34	44.5	
7	112	28	55.9	29	38	51.0	
8	112	32	7.6	29	45	41.6	
9	112	23	27.8	29	52	7.3	
10	112	5	58.1	29	56	5.4	
11	112	0	14.0	30	4	17.7	
12	111	50	35.6	29	59	29.1	
13	111	39	40.1	29	59	45.5	
14	111	42	7.3	29	53	37.2	
15	111	49	10.9	29	52	27.9	
16	111	50	56.4	29	49	2.1	
17	111	51	24.5	29	43	40.9	
18	112	1	52.7	29	28	26.8	
19	112	6	44.2	29	28	59.8	
1	112	14	113	29	24	30.6	

1.2 Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Arivaipa se encuentra en zona de veda denominada Meridiano 110°, publicada en el Diario Oficial de la Federación de fecha 19 de septiembre de 1978, y puesta en vigor el día siguiente de su publicación.

Donde 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 aguas del subsuelo en dicha zona. Se establece por causa de interés público veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo.

Excepto cuando se trate de extracciones para uso doméstico y abrevadero que se realicen por medios manuales, desde la vigencia de este decreto, nadie podrá ejecutar obras de alumbramiento de aguas del subsuelo, dentro de la zona vedada, sin contar previamente con el correspondiente permiso de construcción otorgado por la autoridad correspondiente, ni extraer o aprovechar las mencionadas aguas sin la concesión o asignación que expida también, según el caso, la propia autoridad. No existen decretos de reserva o reglamentos dentro de los límites del acuífero.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

El 19 de marzo de 1999 se instaló el Consejo de Cuenca Alto Noroeste.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

I. En el año 1978, la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH, contrató a la compañía Geocalli, S. A. de C. V. la realización de un estudio geohidrológico, en el cual se concluye que únicamente el 2.6% de la precipitación se infiltra al acuífero; con esta información, y tomando en cuenta que el volumen llovido es de 583.903 hm³, se obtiene un volumen de infiltración de 15.181 Millones de metros cúbicos anuales por año (hm³/año) en la cuenca, la cual tiene un área de 2,849 km².

Se estima un volumen de evapotranspiración de 563.733 Millones de metros cúbicos anuales por año (hm³/año), lo que representa el 96.5% de la precipitación, el cual se considera un resultado apropiado a las condiciones climatológicas de la región.

II. En 1978 se llevó a cabo un estudio geohidrológico del valle del Río San Ignacio, en el cual se presentan resultados de exploraciones directas e indirectas (sondeos eléctricos). Mediante los sondeos eléctricos pudieron distinguirse en el subsuelo del área cubierta por las exploraciones cinco unidades y conjuntos formacionales. En algunos casos, los valores de resistividades calculados para las diferentes capas o estratos, fueron identificados con la litología conocida de los cortes geológicos existentes.

III. Estudio Geohidrológico Preliminar en la Región del Arivaipa, elaborado por Estudios Básicos de Ingeniería, S.A. de C. V., en junio de 2001. Con el propósito de tener un marco geohidrológico regional en el área de la cuenca del río San Ignacio y zona del Arivaipa, se llevaron a cabo una serie de recorridos de campo, donde se localizaron en cartas topográficas escala 1:50,000 editadas por el INEGI, los aprovechamientos subterráneos actualmente en operación, así como aquellos que han dejado de bombear, pero que cuentan con el ademado del pozo y su base de concreto, para en un futuro lograr su equipamiento.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

La cuenca del arroyo Arivaipa se encuentra comprendida dentro de la Provincia Fisiográfica de la Zona Desértica de Sonora, según la clasificación del Ing. Manuel Álvarez.

Los límites naturales de la cuenca, están representados al oeste por las sierras Los Cirios y Tordilla y por los cerros Pelón y Las Cortinas, constituidos por rocas ígneas intrusivas de composición ácida a intermedia y por derrames volcánicos que en ocasiones se les encuentra coronando las partes altas de las sierras mencionadas.

El límite sur de la cuenca lo forman las sierras Lobo y el cerro Víbora Negra, ambos representados por intrusiones ígneas de composición granítica.

La porción oriental del área queda limitada por algunas elevaciones aisladas como son Las Lomas y La Bandera, formadas por un complejo de rocas volcánicas terciarias; los cerros Metatitos, El Orégano y Las Guijas, constituidos por rocas intrusivas, y los cerros San Jorge, Divisadero, La Yori, Martínez y Cerro Prieto, los cuales consisten en rocas sedimentarias.

Hacia el norte, la cuenca está limitada por lomas suavemente onduladas constituidas por conglomerados terciarios y algunos afloramientos aislados de rocas volcánicas e intrusivas de composición ácida, que constituyen lomas de unos 200 m de elevación sobre la planicie.

3.2 Clima

El clima en esta región es extremoso, de acuerdo a los reportes de las estaciones climatológicas Pitiquito y Puerto Libertad. Para la clasificación de Köppen adaptada por García (1964) para la República Mexicana, el clima de la zona se caracteriza por ser muy seco o desértico, semicálido con invierno fresco; en los que la evaporación excede a la precipitación, por lo que ésta no es suficiente para alimentar corrientes de agua permanentes. Con el 60% de lluvias en el verano.

La vegetación es característica de las regiones desérticas, con humedad deficiente en todas las estaciones.

Los datos de temperatura corresponden a las estaciones climatológicas Puerto Libertad y Félix Gómez. Con el registro de datos, se tiene una temperatura media anual de 20.0° C.

La temperatura media máxima se registra durante el mes de agosto y alcanza los 28.5° C, mientras que la temporada más fría se presenta durante los meses de diciembre y enero, en los que la temperatura media varía de 12.1° C a 13.1° C.

Se cuenta con datos de precipitaciones de las estaciones climatológicas localizadas en las poblaciones de Puerto Libertad y Félix Gómez, Sonora. Con la información disponible, se obtuvo la precipitación media anual utilizando el método de los Polígonos de Thiessen.

El método de Thiessen, consiste en asignar a cada estación una zona de influencia limitada por rectas que bisectan a las líneas que unen las estaciones más próximas entre sí y que son normales a dichas líneas, y por el parteaguas de la cuenca; de este modo se forman los llamados Polígonos de Thiessen. La lluvia media se calcula entonces como un promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente; esto se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$\overline{h_p} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{p_i}$$

Donde:

$\overline{h_p}$ = Lluvia media buscada (mm)

A_T = Área total de la cuenca (km²)

n = Número de estaciones

A_i = Área de influencia de la estación i (%)

h_{p_i} = Precipitación de la estación i (mm)

El método de los Polígonos de Thiessen toma en cuenta la distribución espacial de las estaciones, pero no los factores topográficos y de otro tipo que afectan a la distribución de la lluvia; sin embargo, este método es conveniente en esta zona, debido a las condiciones topográficas de la cuenca, la cual tiene una pendiente suave.

Con la información disponible, se obtuvo una precipitación media anual de 204.9 mm. La mayor cantidad de precipitación se registra durante el período de lluvias de verano, en los meses de julio a septiembre, en el cual se presenta el 57% de su media anual; se observa un segundo período lluvioso durante los meses de diciembre y enero, en los que se registra el 15% de la precipitación total.

Multiplicando el área de la cuenca de 2,849 km² por la lámina de precipitación, el volumen medio anual precipitado es de 583.9 Millones de metros cúbicos anuales por año (hm³/año).

3.3 Hidrografía

El río San Ignacio y su afluente arroyo Arivaipa son las únicas corrientes con cuenca de extensión importante en el extremo sur de la Región Hidrológica 8; descarga directamente en el Golfo de California, a la altura de la población El Desemboque, Sonora.

Colinda al este y sur con las cuencas de los ríos Bacoachi y Laguna San Bartolo de la Región Hidrológica 9; al norte con la cuenca del arroyo Tesota, afluente del río Asunción, y al noroeste con algunos arroyos que descargan directamente en el Golfo de California.

Su cuenca es árida, carente de vegetación y prácticamente no existen aprovechamientos de aguas superficiales; existen en el sitio pequeños bordos de almacenamiento, los cuales son utilizados primordialmente para el desarrollo de actividades pecuarias. La corriente del Río San Ignacio tiene sus orígenes en el cerro El Tordillo, en el extremo noroeste de la cuenca, a una altitud de 1,120 m.

Su curso inicial es norponiente siendo desviada hacia el sur por las estribaciones del cerro Jojoba y otras formaciones montañosas menores del parteaguas occidental. A 23 km al noreste de su desembocadura recibe por su margen izquierda, a una altitud de 170 m, las aportaciones del arroyo Arivaipa que drena la porción suroeste del cerro El Tordillo; cambia su curso al poniente y por su margen derecha recibe al Arroyo Gallestamos y otros menores; cambia nuevamente su curso al suroeste para pasar entre las Sierras Bacha y Seris, y finalmente descarga en el Golfo de California.

Debido a las condiciones topográficas y los escasos escurrimientos superficiales de la cuenca, el río Arivaipa no cuenta con control hidrométrico. Por ello, se hizo necesario estimar el volumen medio anual de escurrimiento natural con un método indirecto; en este sentido, se consideró apropiado aplicar el método de Langbein. El cual consiste en una relación basada en información de precipitaciones y temperaturas medias anuales en la cuenca.

En 1962 Langbein propuso un método que está basado en una relación entre P/F_t y V'/F_t , donde P es la precipitación media anual, V' el escurrimiento específico anual y F_t es un factor de temperatura. Cuando P y V' se toman en milímetros y T , la temperatura media del año se expresa en ° C, la expresión de F_t es la siguiente: $F_t = 10^{(0.027 T + 1.886)}$
 La relación entre P/F_t y V'/F_t está dada en la tabla 2.

Tabla 2. Relación entre P/F_t y V'/F_t

P/F_t	V'/F_t	P/F_t	V'/F_t	P/F_t	V'/F_t	P/F_t	V'/F_t
0	0.009	3	0.200	6	1.9	10	5.0
1	0.026	4	0.475	7	2.7	12	7.0
2	0.075	5	1.000	8	3.4	14	9.0

Aunque la relación propuesta por Langbein está basada en datos de Los Estados Unidos de América. La Organización Meteorológica Mundial considera que las relaciones tienen probablemente una aplicación mundial, sobre todo cuando se trabaja con el método a nivel anual; además, este método se considera más confiable en zonas secas que en regiones cálidas húmedas, y la cuenca del río Arivaipa conserva características similares a las del sureste de Los Estados Unidos de América. En la tabla 3, se muestran los resultados obtenidos. Con este análisis se obtuvo un escurrimiento medio anual de 18.6 Millones de metros cúbicos anuales por año ($hm^3/año$); con ello, el escurrimiento superficial representa el 3.2% de la precipitación.

Tabla 3. Escurrimiento anual en la cuenca del río Arivaipa, Método de Langbein

Año	P Media (mm)	T Media (° C)	F_t	P/F_t	V'/F_t	V' (mm)	Escurrimiento (m^3)
1966	188.2	20.2	270.6	0.688	0.021	5.7	16,189,913
1967	181.4	20.3	271.2	0.689	0.020	5.4	15,455,401
1968	140.1	19.7	261.3	0.536	0.018	4.7	13,400,942
1969	112.0	19.7	261.1	0.429	0.016	4.2	11,903,119
1970	159.5	19.5	258.1	0.618	0.020	5.2	14,708,715
1971	134.0	18.9	249.6	0.537	0.018	4.5	12,799,961
1972	213.8	19.5	259.0	0.825	0.023	6.0	16,973,602
1973	134.3	19.0	250.8	0.536	0.018	4.5	12,859,636
1974	158.7	18.8	247.9	0.640	0.020	5.0	14,125,666
1975	136.6	19.2	253.2	0.539	0.018	4.6	12,984,134
1976	187.3	19.8	263.9	0.710	0.021	5.5	15,786,804
1977	137.6	19.9	265.7	0.518	0.018	4.8	13,625,649
1978	356.5	20.1	267.8	1.332	0.042	11.2	32,038,696
1979	158.0	20.1	268.8	0.588	0.020	5.4	15,314,310
1980	147.0	20.5	274.3	0.536	0.018	4.9	14,064,953
1981	269.6	20.6	277.4	0.972	0.026	7.2	20,548,953
1982	347.6	20.0	266.3	1.306	0.043	11.4	32,619,123
1983	420.5	20.5	274.6	1.531	0.052	14.3	40,683,408
1984	420.3	20.4	272.6	1.542	0.053	14.4	41,162,843
1985	189.7	20.4	272.8	0.695	0.021	5.7	16,323,895
1986	220.9	21.4	290.4	0.761	0.022	6.4	18,201,169
1987	100.1	20.5	275.1	0.364	0.015	4.1	11,757,887
1988	164.3	20.6	276.0	0.595	0.019	5.2	14,942,596
1989	243.0	20.8	280.2	0.867	0.024	6.7	19,161,850
Promedio	204.9	20.0	267.0	0.8	0.0	6.5	18,651,384

3.4 Geomorfología

La topografía de la cuenca es suave, con pendiente general uniforme hacia el suroeste. Las principales formaciones montañosas dentro de la cuenca tienen altitudes comprendidas entre 500 y 1,000 m. El área que abarca el acuífero está caracterizada en su porción oriental por la presencia de valles altos en formación con pendientes de fuertes a moderadas. Las pendientes fuertes se presentan en las cercanías a los afloramientos de las rocas intrusivas, decreciendo éstas conforme se aleja de ellas. En la porción occidental los rasgos morfológicos son más accidentados, consistiendo en sierras orientadas con una dirección preferencial NW-SE los cuales constituyen el límite occidental del área.

4 GEOLOGÍA

Como en la mayoría de las zonas áridas, la naturaleza fisiográfica y morfológica de la región está directamente relacionada a la estructura geológica y la composición litológica de las formaciones expuestas en la zona, figura 2.

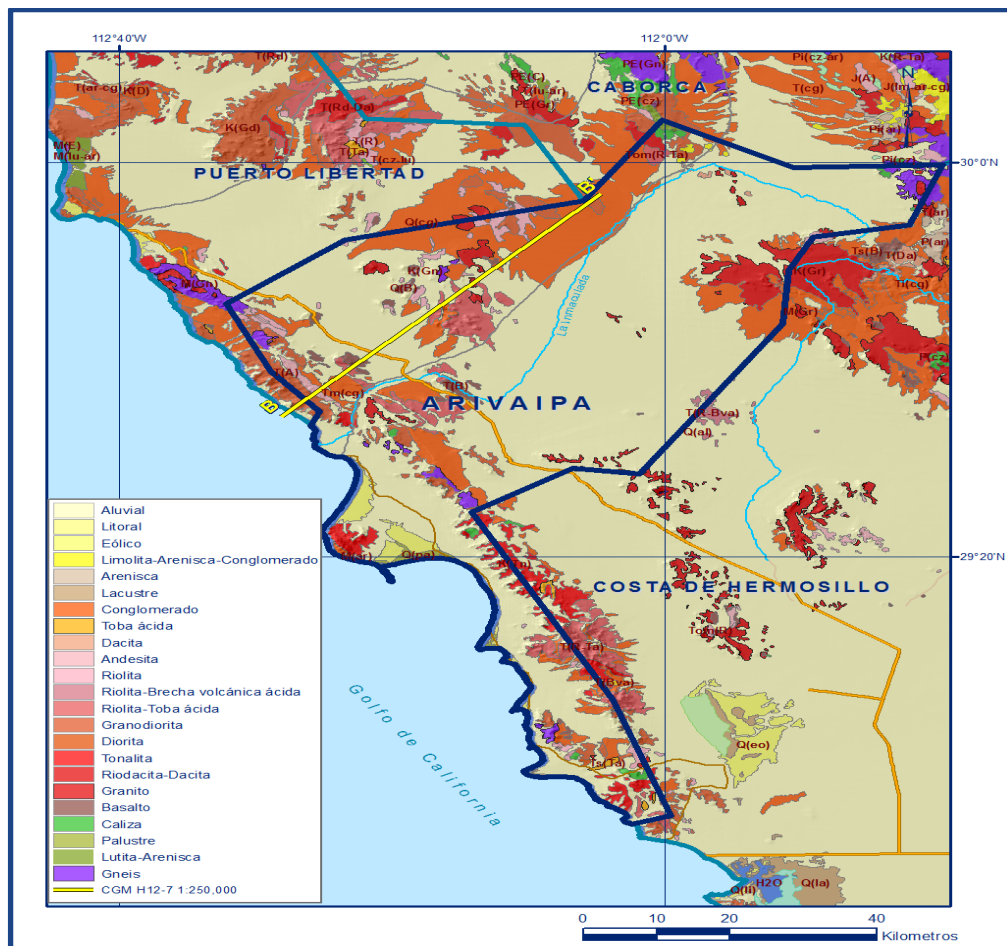


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

PRECÁMBRICO

Material de edad precámbrica aflora en la parte noreste de la región que está en el límite de la cuenca del río San Ignacio. Se trata de rocas calizas y sedimentos metamorfoseados como la cuarcita, esquistos y gneises, las cuales constituyen el cerro Tordillo.

PALEOZOICO

Las unidades litológicas representativas de esta era se localizan en la formación Cerro Prieto, en la que la composición litológica está constituida por calizas indiferenciadas y escarpadas, que por sus características físicas dan la impresión de ser rocas metamórficas como esquistos y gneises.

MESOZOICO

La era del Mesozoico está caracterizada en la cuenca por una intensa actividad volcánica y tectónica evidenciada por los afloramientos de rocas graníticas y granodioríticas de textura media y gruesa. Estas constituyen las cadenas montañosas de la Sierra Bacha, la cual colinda con la costa del Golfo de California.

Las intrusiones graníticas de la cuenca también se localizan en masas de roca del área, donde estos intrusivos fueron seguidos por bastas erupciones con derrames de lava que penetraron a través de los cuerpos intrusivos, formando una red de diques como se observa en la masa expuesta al oeste del origen del arroyo Gallestamos y otros afloramientos distribuidos en la superficie de la cuenca.

CENOZOICO

Esta era se caracteriza también por una actividad volcánica que se comprende por la presencia de derrames lávicos de tipo ácido, representado por riolitas distribuidas en la cuenca. A este tipo de rocas se le atribuye una edad del Terciario Superior (Mioceno-Plioceno), y constituyen la litología de los cerros Pico, Prieto y Tordillo del Compartidero, y de otras masas expuestas.

Dentro de la misma zona hay un pequeño afloramiento de material conglomerático de edad Terciaria, localizado aproximadamente a 6 km al este del desemboque del río San Ignacio, que está poco consolidado.

Otra de las unidades litológicas que afloran en el área es la formación Baucarit, cuyos estratos están formados por gravas, conglomerados y areniscas probablemente de origen marino, y uno de los afloramientos de esta formación se localiza a unos 3 km al sureste del rancho San Jorge.

CUATERNARIO

El relieve prevaleciente y el sistema de drenaje de la cuenca fueron formados durante el período Cuaternario, rasgos que continúan modificándose, ya que a la cuenca se le designa un ciclo morfológico de juventud avanzada.

Durante este período y a través de la región, prevalecieron condiciones continentales; es así como el Cuaternario está representado por el relleno del valle aluvial, compuesto de grava, arena y arcilla, que tienen un espesor considerable. Estos depósitos cuaternarios son las formaciones con propiedades acuíferas más importantes en la cuenca del arroyo Arivaipa. Dentro de la superficie abundan rocas de origen ígneo, lo que indica que durante el Cuaternario se efectuó la última actividad volcánica de lavas basálticas y riolíticas, que cubrieron parte del área de la cuenca y parte de los sedimentos que ya existían.

4.2 Geología estructural

El complejo conjunto de rocas desde el Precámbrico y Paleozoico fueron afectadas por la orogenia permotriásica (Apalachiana), lo que ocasionó un levantamiento y plegamiento en la porción central de Sonora, que fue cubierta por sedimentos Triásicos y Jurásicos, los que a su vez fueron plegados y afectados por grandes fallas casi todas ellas con rumbo NW – SE.

A principios del Cretácico se realizó una gran actividad plutónica al W de Sonora que dio origen a la emersión de batolitos y troncos ácidos. Gran parte de los mares transgredientes desde el Neocomiano en grandes áreas al N y NE de Sonora que dieron como resultado la gran cuenca de Cabullona con más de 4,000 m, de sedimentos del Cretácico Superior, que traslaparon a la topografía paleozoica erosionada.

A principios del Terciario y en tiempo de la Revolución Laramide, se inicia otro periodo orogénico que afectó tanto a la Sierra Madre Occidental, como al oriente de Sonora, plegando las rocas preexistentes con movimientos de este a oeste, encontrándose napas y fallas inversas al oeste en la región de Cabullona.

4.3 Geología del subsuelo

Las rocas que predominan son sedimentarias, metamórficas e ígneas; éstas últimas ocupan una gran área y suprayacen a antiguas superficies de erosión de rocas sedimentarias y plutónicas; en general éstas son bordeadas por los sedimentos aluviales que, junto a los derrames volcánicos del Cenozoico, constituyen los mejores acuíferos.

Los principales acuíferos están asociados a deltas cercanos a las costas; al oriente, hacia las partes altas, se encuentran en los abanicos aluviales formados por materiales gruesos provenientes de las montañas; son de poco espesor y niveles profundos. Los espesores más potentes de la planicie costera se encuentran en sedimentos continentales y marinos intercalados por derrames basálticos.

La formación Baucari, constituida por conglomerados, subyace a los mejores acuíferos en depósitos aluviales; esta formación, de origen sedimentario continental, presenta una permeabilidad de media a baja, ya que en ella prevalece el contenido de arcillas compactas.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Tomando como base la información geológica local y regional recopilada, se puede establecer que dentro de la zona, el acuífero está conformado por un medio granular de tipo libre, constituido por sedimentos arenosos aluviales con buena porosidad y permeabilidad.

5.2 Piezometría

De acuerdo con el Estudio Geohidrológico de la Cuenca del Río San Ignacio-Arivaipa elaborado por la SARH en el año 1984, se cuenta con información de evolución de niveles del período 1983-1984, en los que se tienen los siguientes promedios por región:

Región Arivaipa: -0.27 m

Región La Bandera: -0.17 m

Región San Ignacio-Pozo Coyote: -0.52 m

Región Puerto Libertad: +0.42 m

Región La Inmaculada: +1.58 m

Por otra parte, se cuenta con información del monitoreo realizado en marzo de 2001 y marzo de 2005 de algunos pozos de la región del río Arivaipa. En la tabla No. 4, se muestra la profundidad a los niveles estáticos obtenidos en cada uno de los trabajos de piezometría, así como la evolución en el período.

Tabla 4. Profundidad a los niveles estáticos en la región del Arivaipa

Pozo CNA	Propietario	n. e. 2001 (m)	n. e. 2005 (m)	Evolución (m)
69	Ganadera Apaches	42.00	44.87	-2.87
75	Ganadera Apaches	46.00	45.40	0.60
7	Arturo Bonilla Z.	40.00	38.09	1.91
7BIS	Arturo Bonilla Z.	34.00	32.32	1.68
74	Arturo Bonilla Z.	30.00	28.78	1.22
76	Arturo Bonilla Z.	28.00	27.66	0.34
7BIS1	Arturo Bonilla Z.	26.00	26.66	-0.66
70	Arturo Bonilla Z.	34.00	33.25	0.75
72BIS	INVERNATECH	82.00	78.82	3.18
72	INVERNATECH	84.00	No se pudo sondear	
87	Ganadera Seris	114.00	110.93	3.07
41	Ganadera Seris	116.00	No se pudo sondear	
79BIS	Ganadera Seris	128.00	129.70	-1.70
79	Ganadera Seris	134.00	130.34	3.66

5.3 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

El volumen de agua disponible en un acuífero está condicionado, entre otros factores, por la calidad del agua, en relación con el uso o usos a los que se pretenda destinar.

Al circular de las zonas de recarga a las de descarga, el agua mantiene contacto con las formaciones a través de las cuales circula, incrementando por este contacto su contenido de sales. Los principales factores que gobiernan la magnitud del incremento de sales son: la composición química previa del agua, el tipo de roca, la superficie de contacto, la temperatura del medio y la velocidad de circulación.

De acuerdo con el estudio realizado en el sitio del Arivaipa por la compañía Estudios Básicos de Ingeniería, S. A. de C. V., el análisis químico llevado a cabo en el área del acuífero, muestra que en la zona de La Inmaculada, el agua de las norias es del tipo bicarbonatada-cálcica, cambiando a bicarbonatada-sódica a medida que circula a profundidad o hacia las subcuencas de Arivaipa y Los Arenales.

En el área de Arivaipa se presenta una porción con agua bicarbonatada-sódica, que cambia paulatinamente a clorurada-sódica; situación que permite afirmar la existencia de un gradiente geoquímico, que debe coincidir de forma aproximada en dirección, con el gradiente hidráulico.

La calidad del agua se determina a partir de un análisis físico, químico y bacteriológico, el cual puede variar desde sencillo hasta complejo, que incluye una gran variedad de especies en el agua dependiendo del uso al que se destine, ya sea: agua potable, riego agrícola, abrevadero en ganadería o uso industrial. También se toman en cuenta las características observadas en la zona, como por ejemplo: en una zona minera, es conveniente determinar las concentraciones de algunos metales que puedan ser nocivos a la salud; en lugares próximos a poblados o establos, debe analizarse el contenido de nitratos y organismos coliformes, etc. En el presente estudio solamente se contempla el uso agrícola del agua.

En el sitio del Arivaipa, de acuerdo con el estudio realizado por la compañía Estudios Básicos de Ingeniería, S. A. de C. V., se analizaron las muestras de agua tomadas en 14 pozos, cuyos resultados se resumen en la tabla 5.

Tabla No. 5. Resultados del muestreo de agua en pozos del acuífero Arivaipa

No.	Localización	Na+	Ca++	Mg++	RAS
1	Águila Casas	219.1	15.3	2.9	72.63
2	Águila 2	125.7	11.8	5.9	42.25
3	San Fco. Tanque	202.1	13.4	2.7	71.23
4	San Fco. Ramiro	234.5	2.7	4.8	121.10
5	Samurai	184.1	7.6	4.8	73.94
6	El Seri	212.1	12.3	5.2	71.70
7	Opuntia Ageo	372.0	32.0	8.3	82.87
8	Opuntia Ajos	390.0	34.0	13.5	80.50
9	Opuntia Casas	418.4	50.5	29.3	66.24
10	Opuntia Ranchito	427.2	51.2	12.1	75.94
11	Opuntia Zinfandel	461.0	25.0	10.0	110.20
12	Opuntia 2	409.2	36.0	21.2	76.52
13	Opuntia 5	340.2	9.3	5.4	125.48
14	Opuntia 6	363.2	36.5	22.8	66.70

El análisis físico-químico señala en general un 64% de las muestras con agua de calidad aceptable para riego. El resto de las muestras resultó con alto contenido de sodio en el agua analizada, en porcentajes que sobrepasan los valores límites permitidos por las normas para el uso agrícola.

Sin embargo, con mejoramiento de suelos es factible en otras condiciones su uso para el riego.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con información del Estudio Geohidrológico Preliminar en la Región del Arivaipa, elaborado por Estudios Básicos de Ingeniería, S. A. de C. V en junio de 2001, con el propósito de tener un marco geohidrológico regional en el área de la cuenca del río San Ignacio y zona del Arivaipa, se llevaron a cabo una serie de recorridos de campo, donde se localizaron en cartas topográficas escala 1:50,000 editadas por el INEGI, los aprovechamientos subterráneos actualmente en operación, así como aquellos que han dejado de bombear, pero que cuentan con el ademado del pozo y su base de concreto, para en un futuro lograr su equipamiento.

A continuación, se presenta una relación con el nombre, registro y coordenadas geográficas para cada obra censada (tabla 6).

Tabla 6. Relación de pozos censados en el acuífero Arivaipa

No	NOMBRE	REGISTRO	COORDENADAS	
1	Centenario	CNA 50 PAC	12R0396211	3278104
2	Centenario	CNA 86 PAC	12R0401954	3275033
3	Centenario	CNA 73 PAC	12R0400158	3276032
4	Centenario	CNA 49 PAC	12R0397547	3277479
5	Ejido I. M. Altamirano	CNA 52 PAC	12R0396637	3276622
6	Ejido I. M. Altamirano	CNA 53 PAC	12R0398260	3275667
7	El Samurai	CNA 87 PAC	12R0399982	3274750
8	El Seri	CNA 41 PAC	12R0401332	3273991
9	Laureles	PENDIENTE	12R0398016	3277700
10	Ejido San Ignacio	CFE 43 PAC	12R0370801	3285612
11	Ejido San Ignacio	CNA 12 PAC	12R0371661	3283189
12	Ejido San Ignacio	CNA 15 PAC	12R0372415	3280302
13	Opuntia Méndez	CNA 10 PAC	12R0371511	3279587
14	Opuntia Méndez	CNA 8 PAC	12R370190	3279089
15	Opuntia Ageo	CNA 69 PAC	12R0370830	3281951
16	Opuntia Los Ajos	CNA 74 PAC	12R0368490	3280526
17	Opuntia Rodríguez	CNA 68 BIS PAC	12R0368617	3281354
18	Opuntia Rodríguez	CNA 75 PAC	12R0369489	3282557
19	Opuntia 1	CNA 7 PAC	12R0369748	3281643
20	Opuntia 2	CNA 11 PAC	12R0370648	3282810
21	Opuntia 3	CNA 7 PAC	12R0369813	3280856
22	Opuntia 4	CNA 9 PAC	12R0371133	3281201
23	Opuntia 5	CNA 7 BIS 1	12R0370155	3280011
24	Opuntia 6	CNA 70 PAC	12R0371365	3280415
25	Trabajadores Campo	CNA 56 PAC	12R0394285	3275763
26	Trabajadores Campo	CNA 55 PAC	12R0394522	3277121
27	Trabajadores Campo	CNA 57 PAC	12R0393474	3274725
28	Trabajadores Campo	CNA 59 PAC	12R0386652	3273332
29	Trabajadores Campo	CNA 59 BIS PAC	12R0388511	3273550
30	El Batuco	CNA 82 PAC	12R0392754	3280045
31	Pozo Quemado	CNA 51 PAC	12R0394949	3278286
32	Lizárraga	CNA 71 PAC	12R0391965	3271808
33	Lizárraga	CNA 72 PAC	12R0392278	3272954
34	Lizárraga	CNA 85 BIS PAC	12R0390742	3272273
35	BMX SPR Sonora	CNA 90 PAC	12R0393660	3272564
36	BMX SPR Sonora	CNA 65 PAC	12R0384192	3270997
37	Arivaipa II	CNA 66 PAC	12R0381502	3275106
38	Represo Méndez	CNA G99	12R0383602	3281541
39	El Águila	CNA 79 BIS PAC	12R0403725	3275550
40	El Águila	CNA 79 PAC	12R0403447	3276413
41	El Águila	CNA 80 PAC	12R0402585	3276981
42	El Águila	CNA 80 BIS PAC	12R0402459	3278812
43	Opuntia Méndez	CNA 67 PAC	12R0368252	3278691
44	San Fco. Ramiro	CNA 72 BIS PAC	12R0390727	3273429
45	La Tortuga	CFE71	12R0397645	3280603

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 definido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

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

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

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$
$$R_v - B - Sh = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal

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

Las entradas se calcularon a través de un balance hidrometeorológico, por lo que sólo se cuantificaron las entradas verticales. Para el caso particular de este acuífero, dado que no existen salidas por flujo base, tampoco descarga a través de manantiales, ni evapotranspiración, por lo que la ecuación se simplifica:

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

Se realizó un balance de aguas subterráneas con los valores obtenidos en el análisis hidroclimatológico, y de acuerdo con la metodología propuesta por 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;

La recarga total que recibe un acuífero en un intervalo de tiempo dado, se determina por medio del balance de agua subterránea, que en su forma más simple está representado por la siguiente expresión:

$$\begin{array}{rcccl} \text{Recarga Total} & = & \text{Cambio de} & + & \text{Descarga total} \\ \text{(Suma de entradas)} & & \text{almacenamiento del} & & \text{(Suma de salidas)} \\ & & \text{acuífero} & & \end{array}$$

De acuerdo con la Norma, para deducir una recarga media representativa, se planteará el balance a un intervalo de tiempo de varios años en que se disponga de los datos básicos para cuantificar sus términos y que incluya tanto años secos como años lluviosos.

En su defecto, el balance se planteará para un intervalo mínimo de un año.

7.1 Entradas

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

En el año 1978, la entonces Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH, contrató a la compañía Geocalli, S. A. de C. V. la realización de un estudio geohidrológico, en el cual se concluye que únicamente el 2.6% de la precipitación se infiltra al acuífero; con esta información, y tomando en cuenta que el volumen llovido es de 583.903 hm³, se obtiene un volumen de infiltración de **15.2 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales) en la cuenca, la cual tiene un área de 2,849 km².

Utilizando la ecuación de balance, se tiene:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} - V_{UC}$$

Donde:

V_{INF} = Lluvia infiltrada

V_{LL} = Volumen de precipitación

V_{ETR} = Volumen de evapotranspiración

V_{ESC} = Escurrimiento

V_{UC} = Uso consuntivo de aguas superficiales

Entonces, el resumen del balance superficial, se presenta en la tabla No. 7:

Tabla 7. Balance superficial

Volumen llovido:	583'902,550	m ³
Escorrimento medio anual:	18'651,384	m ³
Volumen de uso superficial:	0	m ³
Volumen de infiltración:	15'181,466	m ³
Volumen de Evapotranspiración real:	563'732,700	m ³

Se estima un volumen de evapotranspiración de 563.7 hm³/año (Millones de metros cúbicos anuales), lo que representa el 96.5% de la precipitación, el cual se considera un resultado apropiado a las condiciones climatológicas de la región.

Por lo tanto la recarga vertical es de **15.2 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales) y las entradas horizontales se consideran inexistentes.

7.2 Salidas

El volumen total de salidas del acuífero Arivaipa es de 1.47 hm³ (Millones de metros cúbicos anuales), distribuido en la forma siguiente:

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

De acuerdo con la información del volumen anual de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA al 31 de mayo de 2005, se considera una extracción de **1.2 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

De acuerdo con el Estudio Geohidrológico Preliminar en la Región del Arivaipa, Sonora, elaborado por la empresa Estudios Básicos de Ingeniería, S. A. de C. V. en junio de 2001, se obtienen salidas horizontales por **0.2 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

Este flujo subterráneo se obtiene multiplicando la transmisividad en el acuífero, el espesor de la sección geológica y el gradiente hidráulico.

El resultado proviene de aplicar una transmisividad $T = 0.036 \text{ m}^2/\text{s}$, el ancho de cada celda $b = 200 \text{ m}$, y un gradiente $i = 0.001$.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Considerando las entradas totales al acuífero y las salidas totales del sistema, aplicando la ecuación de balance se tiene:

Cambio de Almacenamiento = Entradas – Salidas

$$\Delta V = E - S$$

$$\Delta V = 15.2 \text{ hm}^3 - 1.4 \text{ hm}^3 =$$

$$13.8 \text{ hm}^3$$

En el acuífero Arivaipa, Sonora, el cambio de almacenamiento es igual a **13.8 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

Cambio de almacenamiento positivo lo que significa que para el área del acuífero existe una elevación del nivel estático de 5 cm/año. En la tabla 8 se resume el balance de aguas subterráneas

Tabla No. 8. Balance de aguas subterráneas

RECARGA			
Entradas Totales		hm ³ /año	15.2
RECARGA TOTAL	Rt	hm ³ /año	15.2
DESCARGA			
Salidas horizontales		hm ³ /año	0.2
Manantiales		hm ³ /año	0.0
Evapotranspiración		hm ³ /año	0.0
Extracción total		hm ³ /año	1.2
DESCARGA TOTAL	St	hm ³ /año	1.4
Cambio de Almacenamiento	ΔV	hm ³ /año	13.8

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
R = Recarga total media anual
DNC = Descarga natural comprometida
VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **15.2 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso, su valor es de **DNC = 0.2 hm³/anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (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 **15,000,310m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 15.2 - 0.2 - 15.000310 \\ \text{DMA} &= -0.000310 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **310 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Diario Oficial de la Federación. 17 de abril del 2002. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.