



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SOYOPA (2648) 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	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1 Provincia fisiográfica.....	5
3.2 Clima.....	5
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	9
4.2 Geología Estructural.....	13
4.3 Geología del subsuelo.....	13
5. HIDROGEOLOGÍA.....	15
5.1 Tipo de acuífero.....	15
5.2 Parámetros hidráulicos.....	16
5.3 Piezometría.....	16
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	19
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	19
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	20
7.1 Entradas.....	21
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	21
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	21
7.2 Salidas.....	24
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	25
7.2.2 Descargas naturales manantiales, caudal base ríos (Dn).....	26
7.2.3 Extracción por bombeo (B).....	26
7.2.4 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	26
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	27
8. DISPONIBILIDAD	28
8.1 Recarga total media anual (R).....	28
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	29
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	29
9. BIBLIOGRAFÍA	30

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 Soyopa, definido con la clave 2648 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-oriental del Estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 28° 30' y 29° 10' de latitud, y 109° 30' y 109° 55' de longitud, cubriendo una superficie de 1140 km². Limita al norte con el acuífero Moctezuma, al noroeste con el acuífero Río Mátape, al oeste con el acuífero Río Tecoripa, al sur-sureste con Ónavas y finalmente al este con el acuífero Río Bacanora (figura 1).

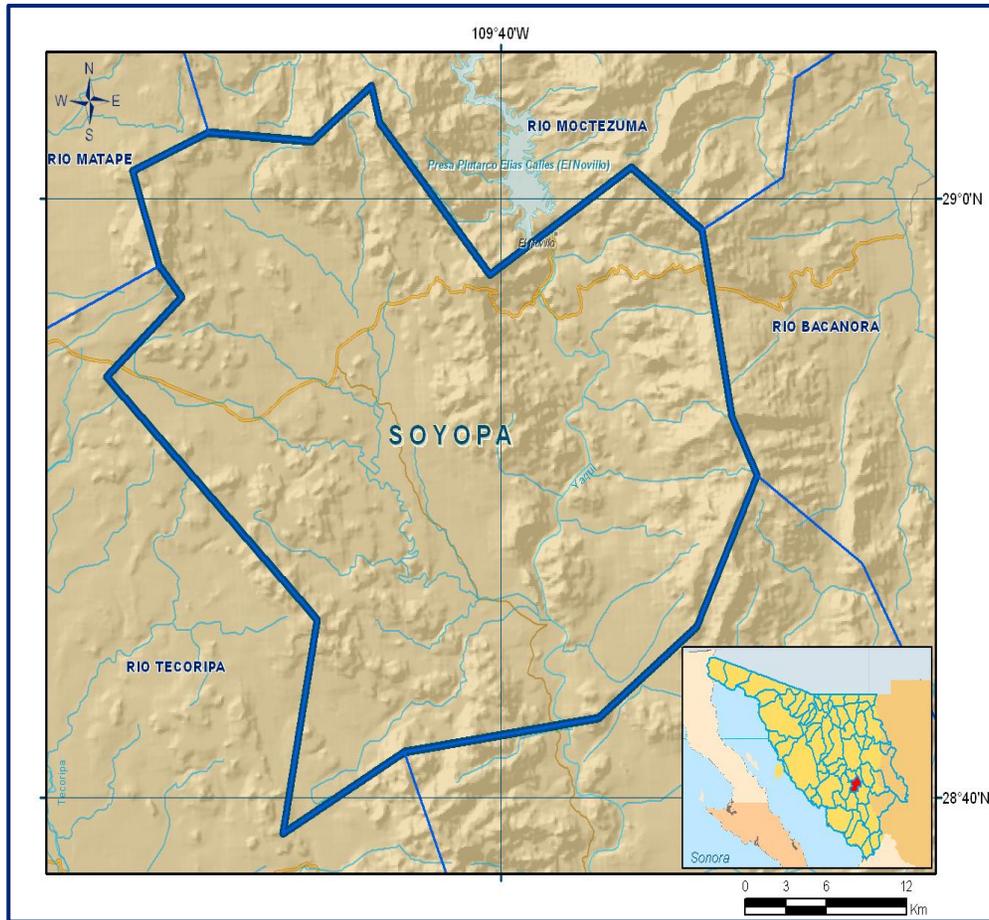


Figura 1. Localización del Acuífero

Geopolíticamente cubre parcialmente territorio de los municipios Villa Pesqueira, San Javier, Bacanora, La Colorada y San Pedro de la Cueva. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero Soyopa

ACUIFERO 2648 SOYOPA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	109	36	5.4	28	42	39.3
2	109	43	53.6	28	41	31.9
3	109	48	44.4	28	38	48.8
4	109	47	22.8	28	45	57.9
5	109	55	50.0	28	54	3.8
6	109	52	49.1	28	56	43.4
7	109	53	43.3	28	57	45.5
8	109	54	47.9	29	0	54.8
9	109	51	44.1	29	2	13.7
10	109	47	34.3	29	1	55.4
11	109	45	11.4	29	3	45.1
12	109	44	52.4	29	2	32.0
13	109	40	27.1	28	57	28.0
14	109	34	45.1	29	1	2.6
15	109	31	54.9	28	58	57.8
16	109	30	43.1	28	52	44.4
17	109	29	42.4	28	50	45.2
18	109	32	7.8	28	45	43.7
1	109	36	5.4	28	42	39.3

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Soyopa pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste. Su territorio no se encuentra regido por ningún decreto de veda para aguas subterráneas.

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

Aunque el volumen de extracción es incipiente, el segundo uso principal del agua es el sector agrícola. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

No existen estudios de evaluación geohidrológica realizados en la superficie que cubre el acuífero, ni en la región, ya que se trata de acuíferos intermontanos en los que la extracción del agua subterránea es incipiente y donde no existe competencia por su uso. Los únicos realizados son con fines de exploración minera.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA.

Realizado por el Servicio Geológico Mexicano, en convenio con Comisión Nacional del Agua, 2008. Este estudio realiza una evaluación preliminar de algunos acuíferos serranos del estado de Sonora, entre ellos Villa Hidalgo, incluyendo actividades de campo para el planteamiento del balance de aguas subterráneas: censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría y pruebas de bombeo.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas propuesta por E. Raisz (1964), el área que comprende el acuífero Soyopa se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, en la subprovincia de sierras y valles del norte y en menor proporción por la subprovincia sierras y cañadas del norte.

Esta provincia está limitada al oeste por la provincia del Desierto Sonorense, al norte desaparece antes de la frontera con EUA y hacia el sur con la Meseta Central. Se caracteriza por ser una región de sierras alargadas y angostas, a las que pertenecen las sierras El Batamote, La Campanería, El Maviro, Martínez, Santa Bárbara, Agua Dulce y El Aliso, orientadas en dirección noroeste-sureste, separadas por amplios valles intermontanos destacando el Valle del Río Yaqui.

3.2 Clima

De acuerdo a la clasificación de INEGI (2003), en el acuífero Soyopa se pueden diferenciar nueve tipos de climas, los cuales se describen a continuación en orden de predominancia.

BS1h(x'), (Semiárido, semicálido), temperatura media anual mayor de 18° C, temperatura del mes más frío menor de 18° C, temperatura del mes más cálido mayor de 22° C. Lluvias distribuidas en todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

BSo(h')(x'), (Árido, cálido), temperatura media anual mayor de 22° C, temperatura del mes más frío mayor de 18° C. Lluvias distribuidas en todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

BSIhw, (Semiárido, semicálido), temperatura media anual mayor de 18° C, temperatura del mes más frío menor de 18° C, temperatura del mes más cálido mayor de 22° C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

BSI(h')(x'), (Semiárido, cálido), temperatura media anual mayor de 22° C, temperatura del mes más frío mayor de 18° C. Lluvias distribuidas en todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

(A)C(wo), (Semicálido subhúmedo), temperatura media anual mayor de 18° C, temperatura del mes más frío menor de 18° C, temperatura del mes más cálido mayor de 22° C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2, y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

C(wo)x', (Templado, subhúmedo), temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más cálido de 22° C.

Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

BSIk(x'), (Semiárido, templado), temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C, temperatura del mes más cálido menor de 22° C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

BSoh(x'), (Árido, semicálido), 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. Lluvias distribuidas en todo el año y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

C(wl)x', (Templado, subhúmedo), temperatura media anual entre 12° C y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3° C y 18° C y temperatura del mes más cálido inferior a 22° C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

El análisis climatológico se realizó con la información de tres estaciones con influencia en el área, localizadas dentro de los límites del acuífero: La Estrella, Rebeiquito y Soyopa.

La temperatura media anual en la zona es de 23.8° C, la precipitación media anual es de 661.07 mm/año. El valor de evaporación potencial para la zona de acuerdo con datos obtenidos de las estaciones es de 2693 mm.

3.3 Hidrografía

En el acuífero Soyopa las corrientes superficiales son efímeras y estacionales. En periodos de estiaje no existe flujo en los arroyos, por lo que la mayoría de éstos son de tipo intermitente, mientras que el Río Yaqui es de tipo perenne debido a la descarga de aguas vertidas por la Presa El Novillo.

En el área los principales afluentes del Río Yaqui son La Higuera, El Jacalón, El Álamo, Noche Buena y El Carrizal. En la zona oeste del acuífero la principal corriente superficial es el Arroyo Los Plátanos, de tipo intermitente y a su vez tiene sus afluentes del mismo tipo: arroyos Sibachicori, La Palma, El Dique, Banco de la Tuna, Maviro, El Mezquitón y El Carrizo.

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 9, Sonora-Sur (RH-9), cuenca (B), integrada a su vez por las cuencas del Río Mayo, Río Mátape, Río Bacoachi y Río Yaqui, siendo este último en donde se ubica el Acuífero Soyopa (INEGI, 2003).

El área queda comprendida en la vertiente del Pacífico, en la que desemboca el Río Yaqui, procedente de San Pedro de la Cueva, pasando por la Presa Plutarco Elías Calles (El Novillo) y prosigue hacia los municipios Ónavas, Suaqui Grande, a los que sirve de límite, para posteriormente internarse en Cajeme.

3.4 Geomorfología

La geomorfología del área está representada por sierras con orientación preferencial noreste – sureste, separadas por valles intermontanos, rellenos por material producto de la erosión de las rocas preexistentes.

En esta región se presentan elevaciones que varían de 200 hasta un poco más de 1600 msnm, entre las que destacan las sierras El Batamote y La Campanería con hasta 1600 msnm, El Maviro con 1300 msnm, Martínez y Santa Bárbara 1100 msnm, La Ciénega 900 msnm.

Estos elementos están surcados por profundas y estrechas barrancas juveniles que denotan la primera etapa de madurez en el ciclo de erosión fluvial.

En general el drenaje que se presenta es subparalelo y en algunas regiones rectangular, característico de rocas ígneas extrusivas, y radial donde afloran rocas ígneas extrusivas e intrusivas.

Se observa en diferentes porciones del acuífero un marcado control estructural del drenaje a través de fallas y fracturas con orientación noroeste-sureste y noreste-suroeste.

En general el drenaje que se presenta es paralelo, proveniente de la parte este del área desarrollándose de las grandes elevaciones y drenando al cauce del Río Yaqui, mientras que en la parte oeste del área se desarrolla de tipo dendrítico, proveniente de las sierras de menor altura.

Donde afloran rocas ígneas extrusivas e intrusivas se observa un marcado control estructural a través de fallas y fracturas con orientación preferente noroeste-sureste y noreste-suroeste.

4. GEOLOGÍA

En el área existe un contexto geológico variado, pues afloran rocas que varían del Paleozoico al Reciente, están representadas por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

La unidad más antigua está representada por cuarcitas y aflora en una pequeña parte dentro de la zona.

Las unidades recientes están compuestas por depósitos conglomeráticos y aluviales, los cuales están restringidos únicamente a los márgenes de los arroyos principales, así como del Río Yaqui. Al norte de la zona las rocas paleozoicas están siendo afectadas por pórfidos de naturaleza riolítica y monzonítica.

Estructuralmente el área presenta una serie de fallas normales de orientación noroeste-sureste, las cuales afectan a toda la secuencia estratigráfica.

La distribución de unidades litológicas se observa en la figura 2.

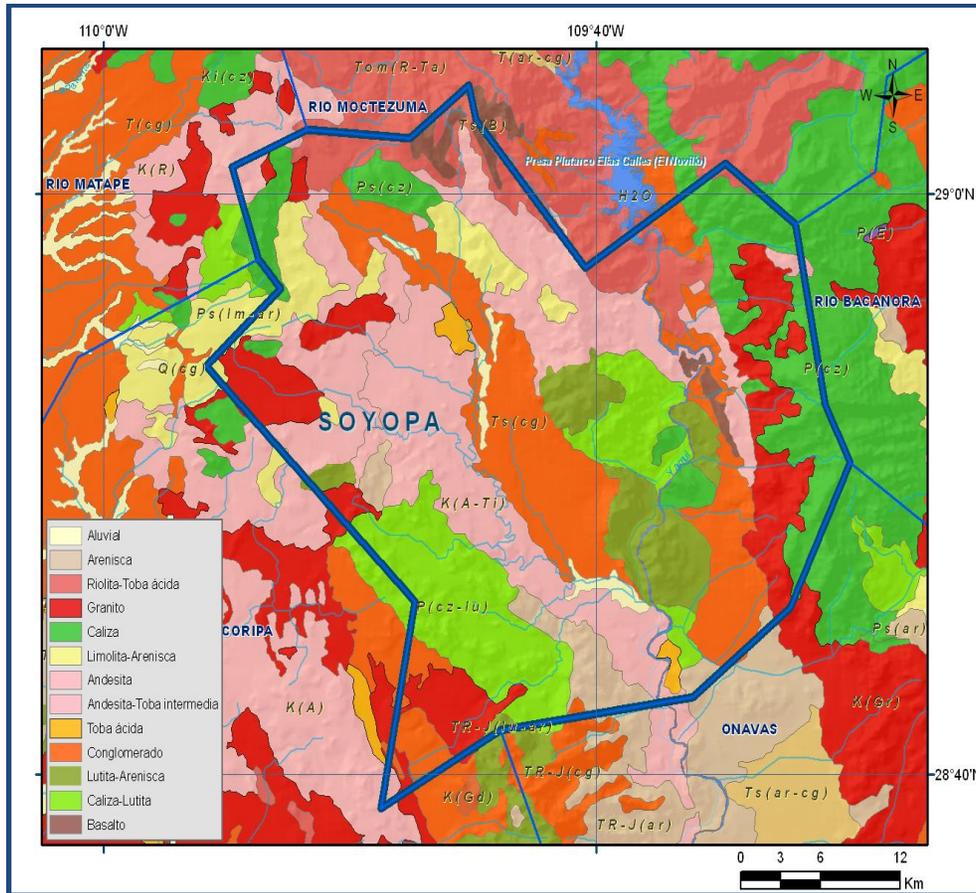


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

A continuación se hace una breve descripción de las unidades litológicas, en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente.

Cuarcitas del Paleozoico Inferior (EiC). Se trata de cuarcitas cámbricas afectadas por metamorfismo regional, que afloran al este de la Presa Álvaro Obregón y se encuentran subyaciendo a rocas marinas del Paleozoico. Dado su bajo fracturamiento y escasos afloramientos su permeabilidad es baja.

Secuencia sedimentaria del Paleozoico Inferior (EmPo Lu-Cz). El Paleozoico Temprano está representado por lutitas, calizas y areniscas con graptolitos y bandas de pedernal con radiolarios. En algunas localidades como en la Sierra La Campanería se presentan en la base de la secuencia, rocas metamórficas constituidas por esquistos, cuarcitas y pizarras, las cuales se consideran dentro de la misma unidad, producto de metamorfismo regional.

Los afloramientos más importantes de esta unidad se localizan al suroeste del área en las Sierras Agua Dulce, Los Alisos, al sureste La Campanería y al noroeste Santa Bárbara, se estima un espesor de hasta 250 m.

Desde el punto de vista geohidrológico, esta unidad presenta un potencial hidrológico medio debido a los múltiples eventos tectónicos que ha sufrido durante el tiempo, que han ocasionado fracturamiento importante, favoreciendo la disolución de rocas calizas y otros procesos químicos.

Secuencia sedimentaria del Paleozoico Superior (Pdp Cz-Ar). Está representada por rocas sedimentarias marinas principalmente de plataforma, compuestas por calizas masivas, areniscas, limolitas y lutitas, con abundante contenido fosilífero de briozoarios, pelecípodos y crinoides. Los principales afloramientos se localizan en las sierras Santo Niño y Batamote, al noreste, mientras que al noroeste de la zona aflora en la Sierra La Campanería.

Araux, S.E. y Vega G.R. (1985) dividen la secuencia en cuatro unidades informales que de la base a la cima son: Formación Las Tierras, constituida por calizas masivas, limolitas y areniscas de cuarzo con crinoides, briozoarios y moluscos de posible edad Missisipico y espesor total 120 m. Formación Chubisco, constituida por una alternancia de areniscas y lutitas con crinoides y corales de posible edad Pensilvánico Superior – Pérmico Inferior con un espesor total 500 m. Formación El Venado, constituida por una alternancia de areniscas, lutitas y calizas con crinoides briozoarios y fusulínidos del género *Parafusilina Sp* del Pérmico Inferior, con un espesor total 480 m. Formación Mina México, constituida por limolitas intercaladas con algunas capas de areniscas y lutitas de posible edad Pérmico Superior- Triásico, con un espesor total de 230 m.

Desde el punto de vista geohidrológico esta secuencia representa posibilidades medias de contener agua, debido a su fracturamiento y a que las calizas pueden sufrir procesos de disolución. En superficie constituyen una excelente zona de recarga.

Secuencia sedimentaria del Triásico Superior (TRs Ar-Lu y TRs Ar-Cgp). Esta unidad representa facies mixtas de ambientes marinos y palustres, constituidas por areniscas y conglomerados con algunos horizontes de calizas arcillosas y arenosas. Stewart y Roldán (1991), midieron un espesor de 3150 m para esta secuencia denominada Grupo Barranca. Wilson y Rocha (1946).

Consideraron a éstas, parte de una serie de cuencas orientadas este-oeste, de 110 km de largo y 40 km de ancho que se extienden hasta el vecino Estado de Chihuahua y se encuentran sobreyaciendo discordantemente a la unidad del Paleozoico Superior.

Aflora en la zona centro sur del área, específicamente en los alrededores del Cerro Los Paredones.

El Grupo Barranca está dividido en tres formaciones, que de la base a la cima son: Formación Arrayanes, Formación Santa Clara y Formación Coyotes. Esta unidad no representa importancia geohidrológica ya que representa una unidad sello, salvo cuando presenta permeabilidad secundaria por fracturamiento. En superficie funciona como zona de recarga.

Complejo Volcánico Inferior (KsA-Ar, KsA-TA). Aflora en prácticamente toda el área, la unidad del Cretácico Superior que está representado por la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1949).

Los afloramientos más importantes se presentan en la porción occidental, en una franja con dirección preferente norte-sur, cubriendo zonas de lomeríos bajos.

La Formación Tarahumara consiste de andesitas, aglomerados, tobas andesíticas, con algunos horizontes de areniscas, lutitas, calizas y rocas netamente lávicas como traquitas, traquiandesitas y dacitas que constituyen secuencias volcánicas y volcanosedimentarias que en conjunto conforman el Complejo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental.

Se presenta fuertemente alterado y tectonizado, por lo que en superficie constituye zonas de recarga al acuífero. Localmente puede constituir acuíferos de bajo rendimiento.

Batolito Laramide, intrusivos porfídicos secundarios (Kstpa GrGd, KsTe Gd-D, To PR,Te PMZ). El trabajo de Damon (1983) definió al Batolito Laramide de Sonora, como todos los plutones de Sonora asociados con la transgresión del arco magmático de la costa hacia el interior, del Cretácico Tardío al Eoceno Tardío (40 a 90 m.a.), el batolito incluye todas las intrusiones calcoalcalinas y granitos de micas.

La forma y distribución de sus afloramientos, está controlado por la erosión y por los eventos tectónicos posteriores a su emplazamiento, principalmente la tectónica de extensión del Terciario medio y tardío. La forma y distribución de sus afloramientos está controlada por la erosión y por eventos tectónicos posteriores a su emplazamiento, principalmente la tectónica de extensión del Terciario medio y tardío. Los afloramientos se encuentran distribuidos por toda el área, mientras que los pórfidos de carácter riolíticos y monzoníticos se restringen a la parte noreste y con pequeños afloramientos. Localmente constituye acuíferos de bajo rendimiento, en su capa superficial alterada y fracturada.

Secuencia Bimodal (ToTR-R, ToB). Se denomina secuencia bimodal a una serie de flujos de rocas volcánicas de composición andesita basáltica, basaltos, andesitas y riolitas del Oligoceno, los afloramientos más importantes de esta unidad se localizan en la porción norte del área en la Sierra El Maviro. Generalmente forman largas mesetas de orientación noroeste-sureste y pseudoestratificación que buza hacia el noreste y suroeste, formando gran parte del evento volcánico del oligo-mioceno que dio lugar a la formación de la Sierra Madre Occidental. Esta unidad constituye zonas de recarga y localmente forma acuíferos de bajo rendimiento.

Formación Baucárit (TmCgP-Ar, Tm Cgp-B, TmB). El Mioceno medio está representado por la Formación Báucarit (King, 1939); estas rocas representan una sedimentación continental ligada a la distensión terciaria del Basin and Range.

Están constituidas por conglomerados polimícticos y areniscas que en algunos afloramientos se presentan intercaladas con basaltos y andesitas basálticas; los afloramientos de estas rocas se localizan principalmente hacia la porción norte, rellenando cuencas terciarias y en las márgenes del Río Yaqui. La unidad es prácticamente impermeable en casi toda la extensión de su afloramiento, se considera roca sello y llega a generar fenómenos de semiconfinamiento.

Conglomerados recientes Limos, Arenas y Gravas (Qpt Cgp). Durante el pleistoceno se depositaron nuevos paquetes detríticos de conglomerados polimícticos mal consolidados constituidos de limos y arenas, representados por la unidad de conglomerados recientes que afloran únicamente en las inmediaciones del Rancho El Taraís. Estos depósitos se formaron en ambientes continentales y son producto de la erosión de las rocas preexistentes, conforman lomeríos de pequeñas dimensiones.

Desde el punto de vista geohidrológico, la unidad granular es importante debido a que llega a formar estructuras de abanicos aluviales donde desembocan los arroyos. Sin embargo, sólo existe una pequeña área dentro del acuífero, por lo que su importancia es mínima.

Aluvión Cuaternario (Qhoal). Depositados sobre las rocas preexistentes materiales de tipo aluvial como gravas, arenas y limos, en forma de abanicos aluviales y fluviales a lo largo del Río Yaqui, así como su planicie de inundación y en otros arroyos existentes. Su espesor y distribución depende del sistema meándrico de los arroyos. Estos depósitos no están consolidados, carecen de cementante y su permeabilidad varía según los porcentajes de arcilla presente, siendo en general de permeabilidad alta y poco espesor en el área.

4.2 Geología Estructural

La principal característica estructural del área es la sucesión de sierras alargadas afectadas por grandes fallas regionales de rumbo preferencial noroeste-sureste y truncados por fallas de orientación noreste-suroeste. El origen de las fallas es debido a fallamiento normal de alto ángulo asociado a deformaciones y vulcanismo basáltico (Figura 3).

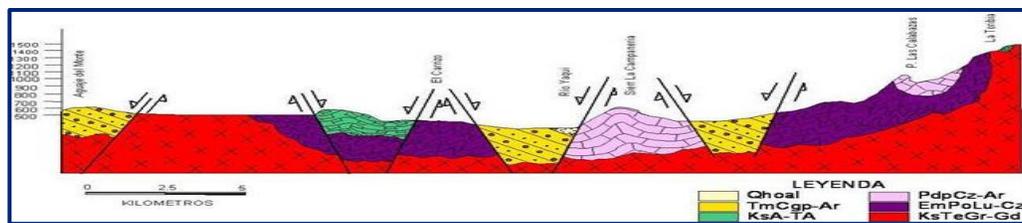


Figura 3. Sección geológica que muestra el comportamiento estructural de la zona

Existe plegamiento de gran radio de curvatura en la secuencia volcanosedimentaria del Cretácico superior, producto de la deformación Laramídica. De igual a manera se presentan cabalgaduras de secuencias paleozoicas sobre rocas sedimentarias del Cretácico, evidenciadas por discordancias.

4.3 Geología del subsuelo

Con base en la geología superficial, la interpretación de secciones geológicas e interpretación de geofísica del Servicio Geológico Mexicano, es posible identificar la presencia de un acuífero que se encuentra alojado en un sistema granular no consolidado de origen aluvial, constituido por depósitos de arenas, intercaladas con limos y arcillas, de espesor y distribución variables que dependen del sistema

meándrico de los arroyos, que no constituye una fuente sustentable para abastecimiento. Durante el ciclo estacional, los niveles se abaten parcialmente e incluso por completo en algunos aprovechamientos, siendo crítico su almacenamiento durante el estiaje.

Debajo de este paquete aluvial, existe una secuencia volcanoclástica (riolitas, tobas, piroclastos), cuyas permeabilidades varían de baja a media, lo cual genera la posibilidad que el acuífero esté conformado por dos medios, granular y fracturado.

Subyaciendo a esta unidad aluvial se encuentra la secuencia del Terciario medio, donde se alojan los depósitos que conforman la Formación Báucarit, rellenando fosas, tales como la de Ónavas y Soyopa. Debajo de ellos se localizan las rocas extrusivas de composición andesítica que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y fallamiento.

Éste representa un acuífero más ampliamente distribuido en la región de estudio, sin embargo el menos conocido y en consecuencia el menos explotado. Su capacidad depende localmente de la permeabilidad secundaria de cada unidad.

Debido a su amplia distribución en el área, representa la mayor superficie de recarga. El basamento y fronteras al flujo subterráneo están constituidos por las rocas graníticas. Sin embargo, su capa superficial alterada constituye acuíferos colgados de bajo rendimiento.

Con base en la geología superficial, la interpretación de secciones geológicas e interpretación de geofísica del Servicio Geológico Mexicano, es posible identificar la presencia de un acuífero que se encuentra alojado en un sistema granular no consolidado de origen aluvial, constituido por depósitos de arenas, intercaladas con limos y arcillas, de espesor y distribución variables que dependen del sistema meándrico de los arroyos, que no constituye una fuente sustentable para abastecimiento.

Durante el ciclo estacional, los niveles se abaten parcialmente e incluso por completo en algunos aprovechamientos, siendo crítico su almacenamiento durante el estiaje. Debajo de este paquete aluvial, existe una secuencia volcanoclástica (riolitas, tobas, piroclastos), cuyas permeabilidades varían de baja a media, lo cual genera la posibilidad que el acuífero esté conformado por dos medios, granular y fracturado.

Subyaciendo a esta unidad aluvial se encuentra la secuencia del Terciario medio, donde se alojan los depósitos que conforman la Formación Báucarit, relleno de fosas, tales como la de Ónavas y Soyopa. Debajo de ellos se localizan las rocas extrusivas de composición andesítica que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y fallamiento.

Éste representa un acuífero más ampliamente distribuido en la región de estudio, sin embargo el menos conocido y en consecuencia el menos explotado. Su capacidad depende localmente de la permeabilidad secundaria de cada unidad. Debido a su amplia distribución en el área, representa la mayor superficie de recarga.

El basamento y fronteras al flujo subterráneo están constituidos por las rocas graníticas. Sin embargo, su capa superficial alterada constituye acuíferos colgados de bajo rendimiento.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero Soyopa es de tipo libre y se encuentra conformado, en su parte superior por depósitos granulares no consolidados de origen aluvial, constituidos por arenas intercaladas con limos y arcillas, así como conglomerados, cuyo espesor varía de 10 a 40 m; en su parte inferior está constituido por rocas volcánicas fracturadas.

La principal fuente de recarga al acuífero es la infiltración fluvial y el agua de lluvia que se infiltra en las zonas topográficamente altas como son las sierras El Batamote, ubicada al noreste, La Campanería, al sureste, El Maviro, al norte, Los Martínez, al noroeste, La Ciénega, en la región centro poniente, y de igual forma las sierras El Aliso y Agua Dulce, al sur.

En menor proporción por infiltración vertical del agua de lluvia que se precipita en el valle, además de pequeños volúmenes producto de retorno de riego agrícola. El flujo subterráneo tiene una dirección preferencial noroeste - sureste, que coincide con el escurrimiento del Arroyo Los Plátanos. La Descarga natural del acuífero es hacia el Río Yaqui. Este acuífero aluvial constituye una de las principales fuentes de abastecimiento para uso público-urbano de las pequeñas comunidades de la zona (Rebeico, Soyopa, entre otras), en una menor proporción se destina el agua subterránea al uso agrícola, que es principalmente para pastizal del ganado.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades de campo se contempló la realización de pruebas de bombeo, sin embargo, dada la escasa infraestructura hidráulica y los reducidos gastos en algunos aprovechamientos, sólo fue posible la ejecución de una prueba en un aprovechamiento perforado en la unidad volcánica cretácica. En aquellos aprovechamientos que contaban con las condiciones de construcción y equipo de bombeo favorable no fue posible realizar las pruebas de bombeo debido a que se localizan dentro del cauce del Río Yaqui.

La prueba de bombeo arrojó una transmisividad de $3.61 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, con gasto de 1.5 lps, y conductividad hidráulica de $4.15 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. De acuerdo con la bibliografía, los valores de transmisividad para un acuífero aluvial son del orden de 100 a 500 $\text{m}^2/\text{día}$, en tanto que para el acuífero en medio fracturado (Formación Báucarit y Complejo Volcánico Inferior) es del orden de 10 a 100 $\text{m}^2/\text{día}$.

De acuerdo a lo anterior se asignan valores promedio de transmisividad y conductividad hidráulica para el acuífero granular: $1.62 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y $5.78 \times 10^{-5} \text{ m/s}$; en tanto que para el medio fracturado son de $6.36 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y $8.68 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Cabe mencionar que estos valores son del orden a los reportados en el Acuífero Ónavas, donde valores máximos se registran en aprovechamientos ubicados en la zona de influencia del Río Yaqui.

Cabe mencionar que para determinar el valor de salidas horizontales fue utilizada una transmisividad de $2.90 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor es mayor a los utilizados para el cálculo de entradas horizontales ya que la celda de salida está ubicada en la planicie de inundación del Río Yaqui, conformada por sedimentos de granulometría más gruesa.

5.3 Piezometría

Durante la campaña del censo de aprovechamientos desarrollada por el Servicio Geológico Mexicano en marzo del año 2008, se llevaron a cabo mediciones de lecturas piezométricas en 78 aprovechamientos, la mayoría de ellos norias.

En la zona del acuífero las lecturas piezométricas muestran dos tipos de comportamiento, por lo que con fines de interpretar correctamente la información, se agruparon los diferentes niveles, tanto norias y pozos con niveles someros, como pozos profundos que captan y reflejan el comportamiento del acuífero "profundo", distinguiéndose así el medio aluvial del medio fracturado.

5.4 Comportamiento hidráulico

En el acuífero Soyopa existen dos principales zonas de recarga, una ubicada al noroeste proveniente de rocas volcánicas y sedimentarias, una segunda zona de recarga al suroeste, donde el agua circula por rocas calizas y volcánicas. Las zonas de recarga reciben agua que se infiltra en las zonas topográficamente altas, donde existen condiciones adecuadas para su infiltración. De manera difusa se produce la infiltración de la lluvia sobre el valle y sobre el cauce del río Yaqui. La descarga natural del acuífero se produce mediante flujo subterráneo hacia el acuífero vecino Ónavas.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático varía de 0.15 a 13 m, los valores más profundos se encuentran hacia las estribaciones de la sierra volcánica, en las inmediaciones del Rancho Las Guasimitas, específicamente en el Rancho Los Bancos (Figura 4).

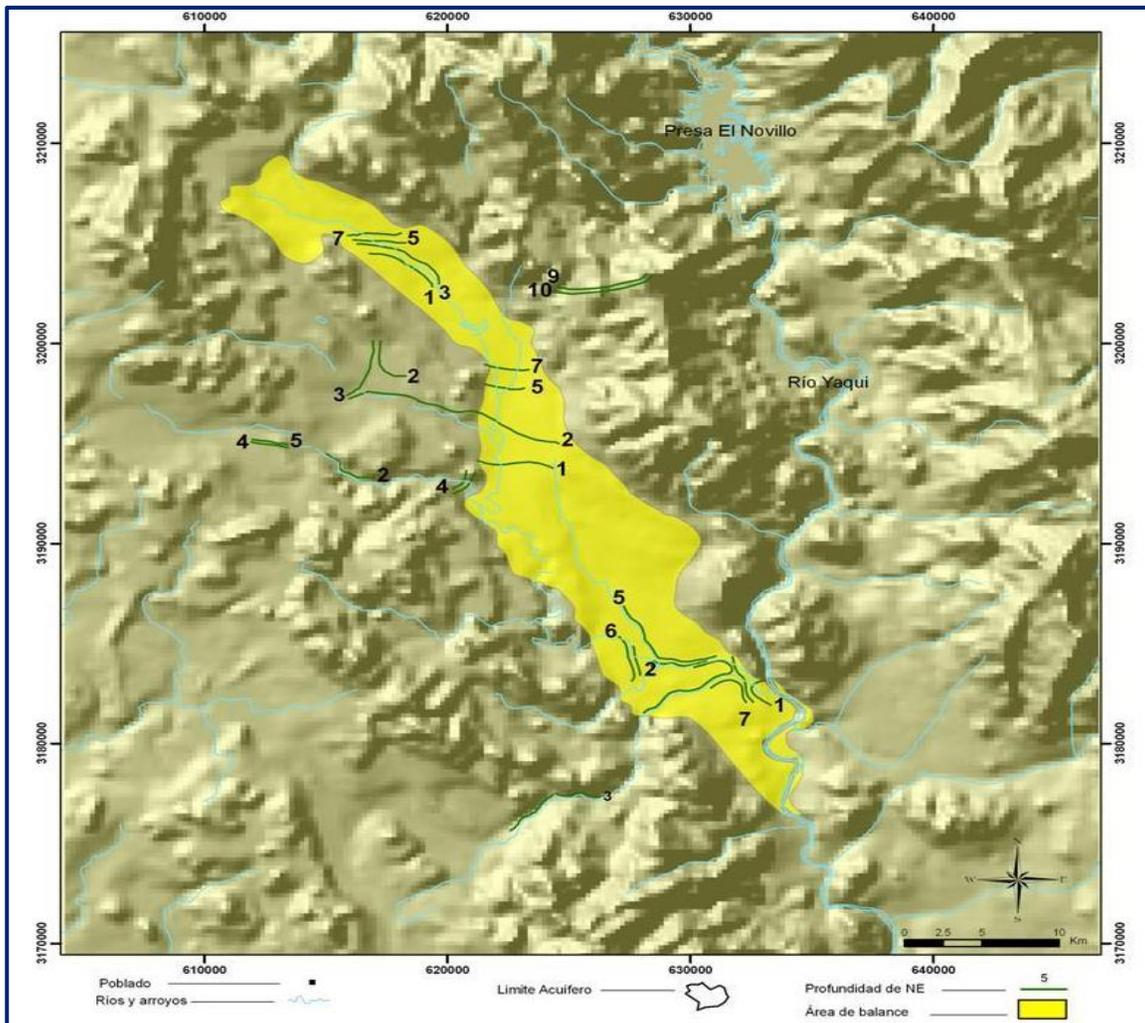


Figura 4. Profundidad al Nivel Estático en m (2008)

Los valores de profundidad al nivel estático no tienen un patrón definido. Al noroeste del poblado Soyopa, en un valle de reducidas dimensiones, se observan valores de profundidad entre 1 y 5 m, mismos que se incrementan rumbo a las inmediaciones del Arroyo El Carrizo. Al noroeste del acuífero se observan profundidades entre 1 y 8 m, mientras que en las márgenes del Arroyo Sibachicori las profundidades varían de 1 a 6 m. De igual forma en las inmediaciones del Arroyo El Dique las profundidades varían de 1 a 3 m, lo mismo para el Arroyo Maviro, con profundidades de 1 a 8 m. Hacia las porciones noroeste y suroeste del acuífero aflora la unidad granítica con profundidades de nivel estático del orden de 1 a 2 m. Lo anterior debido a la intensa alteración de la unidad, la cual tiende a formar una capa arenosa con potencial bajo.

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para 2008 (Figura 5) presenta elevaciones que varían de 210 hasta 550 msnm. Elevaciones de 510 a 550 msnm se presentan en un pequeño valle en una unidad conglomerática del Pleistoceno sobre el Arroyo El Tarais, al oeste del acuífero, asimismo en la parte noroeste de la zona fluye el Arroyo Banco de la Tuna, con dirección preferente noroeste-sureste, donde las elevaciones de nivel estático son del orden de 500 a 530 msnm, mientras que en la zona sureste, en la Sierra Agua Dulce, las elevaciones varían de 390 a 400 msnm.

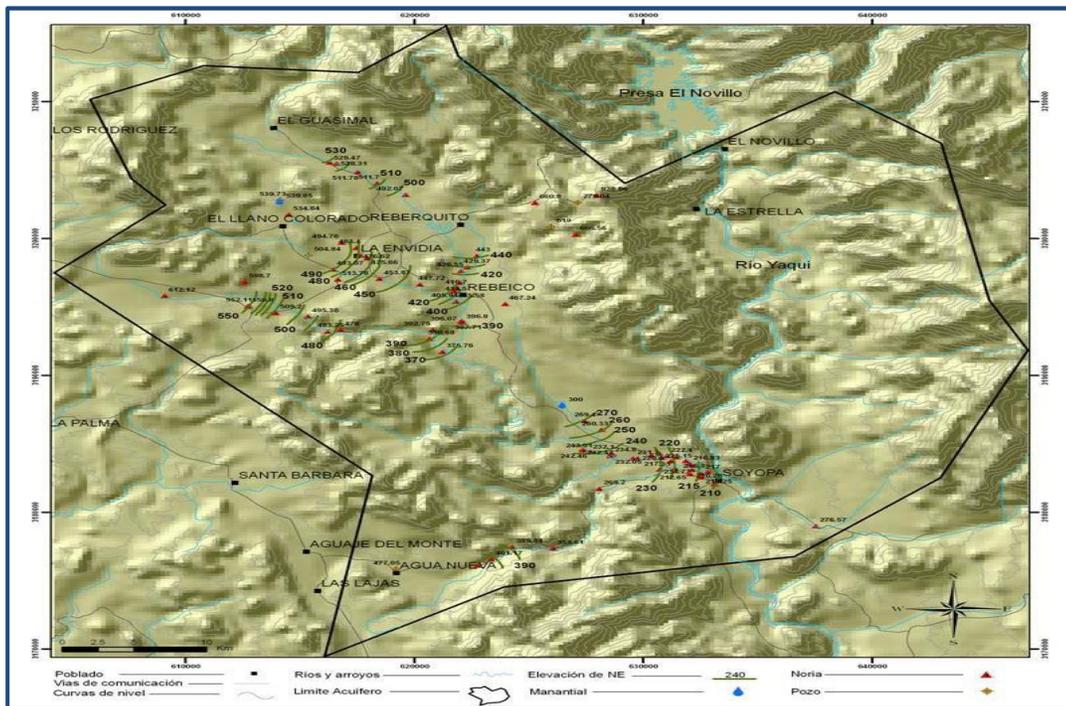


Figura 5. Elevación del Nivel Estático en msnm (2008)

Fuera de la zona de influencia del río principal, todos los arroyos citados confluyen en la zona de valle, al noroeste del poblado de Soyopa, donde las elevaciones son de 210 hasta 230 msnm, en esta zona se observa que la dirección de flujo subterráneo muestra una trayectoria preferencial noroeste-sureste, con una alimentación proveniente del suroeste de la Sierra Agua Dulce, hasta que finalmente drenan las aguas al Río Yaqui.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita su configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Durante la campaña de censo de aprovechamientos realizado en el año 2008 por el Servicio Geológico Mexicano, se tomaron parámetros físicos y químicos de 75 aprovechamientos, de éstos 67 corresponden a norias, 6 pozos y 2 manantiales. Entre los parámetros medidos están: temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto, pH y Eh.

Los valores de pH varían de 4.92 a 9.14, predominan los valores de pH cercanos a 7. La concentración de sólidos totales disueltos varía de 106 a 1959 mg/l. De manera general el agua es de buena calidad a excepción de los alrededores de la comunidad Llano Colorado, donde tiende a ser salobre, existen valores anómalos de pH entre 4.9 y 6.7, relacionados con el marco geológico local y sus procesos de mineralización, mismos que pudiesen elevar la concentración de metales pesados y iones principales.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo al censo de aprovechamientos realizado en el 2008, se registró un total de 83 captaciones del agua subterránea, de las cuales 9 corresponden a pozos, 72 a norias y 2 manantiales.

Del total de aprovechamientos, 64 se destinan al uso pecuario (77.11%), 7 (8.43%) al uso agrícola, 3 (3.61 %) al abastecimiento de agua potable, 1 más (1.20 %) para uso doméstico, y 8 (9.64 %) se encuentran fuera de uso.

El volumen de extracción conjunto se estimó en **0.80 hm³ anuales**, de los cuales 0.32 hm³ (40%) se destinan al abastecimiento de agua potable a los centros de población, 0.22 hm³ (27.50%) para uso agrícola, 0.19 hm³ (23.75%) para uso pecuario y 0.06 hm³ (7.50%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de **187 km²**, que corresponde a la zona donde se localizan la mayor parte de los aprovechamientos de agua subterránea. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

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

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

Donde:

- R_v**: Recarga vertical
- E_h**: Entradas por flujo horizontal
- B**: Bombeo
- S_h**: Salidas por flujo horizontal
- D_n**: Descarga por manantiales y flujo base
- ETR**: Evapotranspiración real
- ΔV(S)**: Cambio en el volumen almacenado

7.1 Entradas

Representa la sumatoria de entradas de agua al sistema acuífero, ya sean naturales o inducidas.

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) está integrada por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (R_v), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola constituye otra fuente de recarga al acuífero.

Este volumen se integra en la componente de recarga inducida (R_i). Debido a que el volumen del agua destinada al uso agrícola es muy bajo y que no existen poblaciones urbanas de importancia en las que se generen infiltraciones de las fugas en las redes de distribución de agua potable y del alcantarillado, se considera que la recarga inducida es despreciable.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) es considerado nulo, y a que se tiene información para calcular las entradas y salidas por flujo subterráneo con base en la Ley de Darcy, el valor de la recarga vertical fue despejado de la ecuación de balance definida por la siguiente expresión:

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + Sh + ETR + D_n - \Delta V(S) - E_h \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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

De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh).

El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

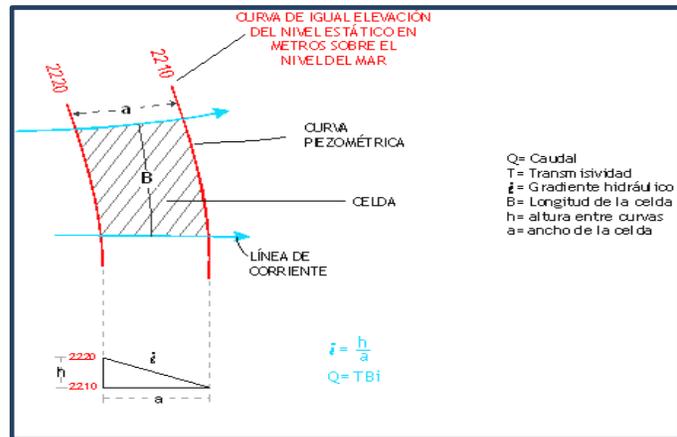
Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$)



Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

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

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

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

Donde:

T = Transmisividad en m^2 / s .

B= Longitud de la celda en m

i = Gradiente Hidráulico, en m

Para el cálculo es necesario conocer el espesor saturado del acuífero (b) y su coeficiente de permeabilidad (K), o bien, el valor de transmisividad (T). Los demás datos se obtienen de la piezometría. Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático y la geología, y se calcula el flujo a través de cada una de ellas.

El coeficiente K, se obtiene a partir de las pruebas de bombeo de las cuales se obtiene el valor de transmisividad (T), que es el producto de la conductividad hidráulica (K) por el espesor saturado:

$$T = K b$$

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, se identificaron celdas de entrada en las porciones noroeste y suroeste del acuífero (Figura 6). Para las celdas E1 y E5 se asignó una transmisividad de $8.11 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, para las celdas E2 y E3 se tomó la transmisividad obtenida con la prueba de bombeo de $3.61 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y por último para E4 se asignó una transmisividad de $1.39 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ todo esto con la finalidad de no sobreestimar las entradas por flujo subterráneo horizontal.

Como resultado del análisis de celdas de flujo se obtuvo un valor de **2.5 hm³/año** que representa las entradas horizontales dentro del área de balance definida en el valle (Tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de entradas horizontales

CANAL	ANCHO B	LONGITUD	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
	(m)	(m)	(m)		(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
E1	783.01	809.09	10	0.0124	0.000811	0.0078	0.25
E2	1429.2	411.87	10	0.0243	0.0000361	0.0013	0.04
E3	1451.87	431.19	10	0.0232	0.0000361	0.0012	0.04
E4	1650.05	395.4	10	0.0253	0.00139	0.058	1.83
E5	1406.24	982.06	10	0.0102	0.000811	0.0116	0.37
Total entradas							2.52

7.2 Salidas

Se trata de los volúmenes de agua, ya sean naturales o extraídos, que pierde el acuífero. Para el acuífero Soyopa las descargas están representadas por el bombeo (B), evapotranspiración (ETR), salidas horizontales (Sh) y descargas naturales a través de manantiales (Dn).

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

Existe una pequeña zona dentro del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 4 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas.

Se aplicó la fórmula de Turc para calcular la lámina de Evapotranspiración real, considerando valores medios anuales de temperatura de 23.8° C y precipitación de 661 mm. El valor de evapotranspiración real media anual obtenida con el método de Turc es de 637 mm/año.

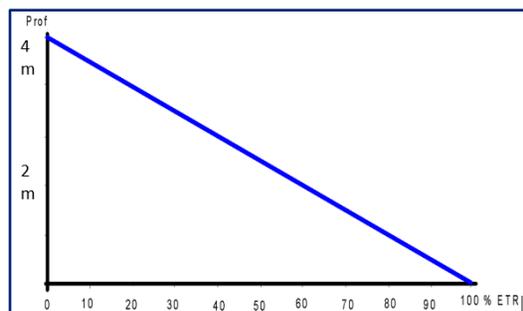
$$ETR (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	23.8		
P(mm) =	661	P ² =	436921
L =	1569.0636	L ² =	2461960.58
ETR (mm)	636.8		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 4 m, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 4 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el porcentaje de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 4 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porcentaje de ETR, de tal manera que a 4 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 2 m el 50%, etc.



En la tabla 3, se observa que el valor resultante es de **4.2 hm³ anuales**.

ETR = 4.2 hm³/año.

Tabla 3. Cálculo de evapotranspiración real

Intervalo curvas (m)	Profundidad (m)	Area (km ²)	%	ETR (m)	Vol ETR (hm ³ /año)
0 a 1	0.5	4.3	0.875	0.637	2.40
1 a 2	1.5	3.2	0.625	0.637	1.27
2 a 3	2.5	1.6	0.375	0.637	0.38
3 a 4	3.5	2.3	0.125	0.637	0.18
Total					4.2

7.2.2 Descargas naturales manantiales, caudal base ríos (Dn)

Se trata de descargas naturales que ocurren a través de manantiales de bajo gasto ubicados al centro y noroeste del acuífero, con un caudal estimado en 2008 de **0.1 hm³/año**.

7.2.3 Extracción por bombeo (B)

De acuerdo con los resultados de la hidrometría de las extracciones, el volumen del bombeo determinado en el 2008 asciende a **0.8 hm³/año**.

7.2.4 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El volumen de las salidas subterráneas se calculó de la misma manera que las entradas subterráneas, tomando en cuenta la elevación del nivel estático mostrada en la Figura 6 y a través de la Ley de Darcy. En la Tabla 4 se muestra que el valor de las salidas subterráneas es de **0.8 hm³/año**, que salen hacia el acuífero Ónavas.

Tabla 4. Estimación de salidas horizontales

CANAL	ANCHO	LONGITUD	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
	(m)	(m)	(m)		(m ² /s)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)
S1	1457.94	868.26	5	0.0058	0.0029	0.0243	0.8
						Total salidas	0.8

Para determinar el valor de salidas horizontales fue utilizada una transmisividad de 2.90×10^{-3} m²/s. Este valor es mayor a los utilizados para el cálculo de entradas horizontales, ya que la celda de salida está ubicada en la planicie de inundación del Río Yaqui, conformada por sedimentos de granulometría más gruesa.

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

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

Por otra parte, la configuración de elevación del nivel estático no muestra aún la presencia de conos de abatimiento o deformaciones de la dirección natural del flujo subterráneo, que sean ocasionados por la concentración del bombeo o de aprovechamientos. Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto $\Delta V(S) = 0$

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración por lluvia (R_v), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 0.8 + 0.8 + 4.2 + 0.1 - 0.0 - 2.5$$

$$R_v = 3.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a $R = R_v + Eh$

$$R = 3.4 + 2.5$$
$$R = 5.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso, su valor es de **5.9 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 = 0.1 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **4,135,027 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 5.9 - 0.1 - 4.135027 \\ \text{DMA} &= 1.664973 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,664,973 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1994. Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos, México, Distrito Federal.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Estudio Geohidrológico del Acuífero Río Sahuaripa. Convenio de Colaboración con Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca del Noroeste.