



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DEL YAQUI (2640), ESTADO
DE SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	3
Antecedentes.....	3
1.1. Localización.....	3
1.2. Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	6
3. FISIOGRAFÍA.....	8
3.1. Provincia fisiográfica	8
3.2. Clima.....	9
3.3. Hidrografía	10
3.4. Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA.....	12
4.1. Estratigrafía.....	13
4.2. Geología estructural	16
4.3. Geología del subsuelo	17
5. HIDROGEOLOGÍA.....	18
5.1. Tipo de acuífero	18
5.2. Parámetros hidráulicos	18
5.3. Piezometría	19
5.4. Comportamiento hidráulico	19
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2. Elevación del nivel estático	20
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	21
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	24
7.1. Entradas	24
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	25
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	25
7.1.3. Recarga incidental (Ri)	26
7.2. Salidas.....	27
7.2.1. Bombeo (B).....	27
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	27
7.2.3. Evapotranspiración (ETR)	28
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	29
8. DISPONIBILIDAD	31
8.1. Recarga total media anual (R)	31
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	31
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	32
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	32
9. BIBLIOGRAFÍA	33

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 Valle del Yaqui, definido con la clave 2640 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en el extremo sur del estado de Sonora, entre los paralelos 27°03'57" y 27°57'08" de latitud norte y 109°38'16" y 110°36'10" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 6559.1 km².

Limita al norte con los acuíferos Agua Caliente y Valle de Guaymas; al noreste con el acuífero Cumuripa; al este y sureste con el acuífero Cocoraque. Al sur y oeste su límite natural es el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente el área que comprende el acuífero cubre la totalidad del municipio de San Ignacio Río Muerto, y parcialmente los municipios de Bacum, Cajeme y Guaymas, así como porciones menores de Quiriego y Benito Juárez.



Figura 1. Localización del acuífero

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

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y al Consejo de Cuenca de los Río Yaqui y Mátape, instalado el 30 de agosto del 2000. Su territorio se encuentra casi totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda.

En la mayor parte del territorio del acuífero rige el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en una zona que comprende el Distrito de Riego del Río Yaqui, con las delimitaciones que se expresan”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 14 de octubre de 1954. Esta veda es tipo III en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. En su porción norte está en vigor el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona”. conocido como Meridiano 110, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978. Esta veda se clasifica como tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

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

ACUIFERO 2640 VALLE DEL YAQUI							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	24	57.4	27	52	21.4	
2	110	21	14.8	27	50	23.6	
3	110	15	2.4	27	49	54.0	
4	110	13	10.2	27	55	59.9	
5	110	10	2.7	27	55	7.0	
6	110	6	26.0	27	57	6.3	
7	110	3	47.6	27	56	4.7	
8	110	3	23.6	27	53	50.0	
9	109	54	20.2	27	49	1.5	
10	109	50	13.8	27	45	23.1	
11	109	39	44.8	27	48	14.5	
12	109	40	5.0	27	43	24.9	
13	109	38	16.0	27	33	57.0	
14	109	42	57.5	27	28	56.0	
15	109	43	24.9	27	23	48.2	
16	109	52	18.7	27	9	21.0	
17	109	59	19.2	27	3	55.4	DEL 17 AL 18 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
18	110	31	11.6	27	50	35.0	
1	110	24	57.4	27	52	21.4	

En pequeñas áreas de las zonas serranas de los extremos norte y nororiental no rige ningún decreto de veda para la extracción del agua subterránea. La porción no vedada se encuentra sujeta a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras

de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el territorio del acuífero se localiza la mayor parte del Distrito de Riego 041 "Río Yaqui" y el Distrito de Riego 018 "Colonias Yaquis". No se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En su zona costera se localiza el sitio RAMSAR llamado "Complejo Lagunar Bahía Guásimas-Estero Lobos", decretado el 02 de febrero de 2008.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios geohidrológicos de evaluación, algunos de cobertura regional, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE LA RED DE OBSERVACIÓN DEL ACUÍFERO VALLE DEL YAQUI. Realizado en 1997 por Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. DE C.V. para la Comisión Nacional Del Agua. Sus objetivos principales fueron el diseño óptimo de la red de pozos de observación, construir un modelo de simulación hidrodinámica y determinar la disponibilidad de agua subterránea. Calcula un valor de salidas de 423 hm³ anuales, de las cuales 419 hm³ corresponden a la extracción por bombeo, y una recarga total de 235 hm³ anuales, obteniendo un cambio de almacenamiento de 187 hm³/año. Reporta valores de transmisividad de 2942.7 a 7906.7 m²/día (0.034 a 0.0915 m²/s) y coeficientes de almacenamiento de 0.00028 a 0.0012.

ESTUDIO DE DISPONIBILIDAD Y ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLOGICA EN LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE: EL YAQUI, EL MAYO, BOCA ABIERTA Y GUAYMAS, SONORA, realizado en 2000 por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), para

la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo fue proporcionar información geofísica e hidrogeoquímica para el manejo de las aguas superficiales y subterráneas

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO “VALLE DEL YAQUI” MUNICIPIO DE CAJEME, SONORA. Realizado en 2003 por la Universidad de Sonora, para el Distrito de Riego del Río Yaqui. Incluye a los acuíferos Valle del Yaqui y Cocoraque. Su objetivo fue actualizar el balance de aguas subterráneas. Definiendo explícitamente las componentes de la ecuación, para determinar su potencial y su disponibilidad. Entre sus actividades de campo más importantes destacan el censo y nivelación de brocales de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, sondeos geofísicos, ejecución de pruebas de bombeo y toma de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímicos. Calcula una recarga media anual de 564.1 hm³ anuales, en el periodo 1997-2001, que provienen principalmente de la recarga incidental debido a la infiltración en los canales de distribución del agua del distrito de riego y los retornos del riego agrícola.

Concluye que el acuífero está constituido por dos unidades; una superior de tipo libre conformada por sedimentos arcillosos y limo-arcillosos no consolidados de baja permeabilidad, espesor variable y con acuñamientos; y la unidad inferior regional que puede funcionar como semiconfinada-confinada, de espesor promedio de 300 m. composición y propiedades hidráulicas variables en sentido horizontal y vertical. De la interpretación de 140 pruebas de bombeo realizadas en la zona, reporta valores de transmisividad de 5.24×10^{-4} a 2.28×10^{-1} m²/s, con los valores más altos en las porciones oeste y sureste. Determina un valor de rendimiento específico de 0.09.

ESTUDIO DEL IMPACTO POR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL AVANCE DE LA INTERFASE MARINA DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS VALLE DEL YAQUI Y COCORAQUE, EN EL ESTADO DE SONORA. Realizado en 2012 por la Universidad de Sonora para la Comisión Nacional del Agua. Su objetivo principal fue definir la magnitud de los impactos ante escenarios de cambio climático, para proponer políticas de aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos. Además de la información hidrogeológica general del acuífero, Incluye la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero a la intrusión marina y un modelo matemático de simulación hidrodinámica.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO VALLE DEL YAQUI, SONORA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, así como la hidrometría de las extracciones.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se localiza principalmente en la Provincias Fisiográficas Sierras Sepultadas, Subprovincias Sierras de Piamonte y Deltas Costeros Sepultados; y Sierra Madre Occidental, Subprovincias de la Altiplanicie Lávica Riolítica y Sierras Alargadas. El Valle del Yaqui comprende el delta formado por el río del mismo nombre, cuya génesis sobre el contexto de las Sierras Sepultadas y su vecindad con la subprovincia de las sierras pie de monte y con la misma Sierra Madre Occidental, le imprimen una característica especial que influye en la presencia y comportamiento de los sistemas de flujo regionales y locales

La Provincia Fisiográfica Sierras Sepultadas se caracteriza por presentar sierras con orientación NW-SE, que limitan valles rellenos por potentes espesores de conglomerados mal consolidados y material aluvial, producto de la tectónica distensiva del Terciario Medio que afectó al NW de México.

La Subprovincia de Sierras de Piamonte (Planicies acumulativas y erosivas con elevaciones montañosas) está compuesta principalmente por rocas sedimentarias, rocas ígneas extrusivas e intrusivas de composición variable, rocas metamórficas y rocas vulcanosedimentarias, con edades desde el Paleozoico al Reciente. Dentro de esta Subprovincia se encuentra la mayor porción de la parte baja de la cuenca que topográficamente llega hasta el nivel del mar.

La Provincia Sierra Madre Occidental se extiende cerca de la costa occidental, con una dirección noreste-sureste; se inicia 50 km al sur del límite Internacional con los Estados Unidos para finalizar en el Río Santiago en Nayarit y el Eje Neovolcánico. En su porción norte está más separada de la costa (300 km); mientras que hacia el sur reduce su anchura y se aproxima más al mar. Está formada principalmente por rocas ígneas extrusivas con predominancia de rocas félsicas de espesores de gran dimensión durante el Terciario Inferior a Medio. Originalmente era una gran meseta, pero debido a la erosión se creó un paisaje con picos, mesetas, cañones y barrancas.

La Subprovincia de la Altiplanicie Lávica Riolítica (Cadenas montañosas paralelas separadas por cuencas intermontanas), está compuesta en su mayor parte por rocas ígneas intrusivas ácidas, extrusivas y piroclásticas ácidas intermedias y básicas del Cretácico Superior al Plioceno, y en muy baja proporción rocas sedimentarias, vulcanosedimentarias y metamórficas con edades desde la parte inferior del Paleozoico hasta el Cretácico. Dentro de esta Subprovincia la cuenca tiene las mayores alturas topográficas, alcanzando hasta 3,000 m.s.n.m.

La Subprovincia de las Sierras Alargadas (Valles intermontanos y superficies de piedemonte) está compuesta principalmente por rocas ígneas intrusivas y extrusivas de composición variable y en casi igual proporción rocas sedimentarias, y vulcanosedimentarias cuya edad varía desde el Paleozoico hasta el Terciario. En esta Subprovincia se encuentra la mayor porción de la parte media de la cuenca, con alturas que varían en el rango de 300 a 2,200 m.s.n.m.

3.2. Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para México por E. García (1981), se determina que el clima que predomina en la mayor parte de la superficie que cubre el acuífero es BW(h')w muy árido y cálido, y BSo(h')w árido cálido. En el extremo norte el clima es BSohw seco semicálido. En todos ellos la temperatura media anual es mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Presentan régimen de lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% a 10.2% del total anual.

En pequeñas porciones de la zona serrana ubicada en el extremo nororiental, se presenta un clima BSlhw semiárido semicálido, con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de junio a septiembre que correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región. La temperatura media anual presenta valores

extremos de 3 °C como mínima y 40 °C como máxima; la temporada de lluvias tiene lugar entre los meses de junio a octubre, destacando el mes de agosto como el más lluvioso.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 16 estaciones climatológicas ubicadas en la región en la que se ubica el acuífero: Ciudad Obregón, Hornos, Colonia Yaqui, Km 024, Bachoco, Guaymas 4-P-6, San Ignacio Río Muerto 4-P-12, Cárcamo, Porfirio Díaz, Calle Seiscientos, Calle Mil Doscientos, Km. 014, Km. 025, Km 068, Km. 105 y Calle Doscientos; cuyo registro comprende el periodo 1990-2016. Con base en esta información, se determina que los valores promedio anual de temperatura, precipitación, evaporación potencial y evaporación real son **24.2 °C, 344.0 mm, 2153 mm y 168.9 mm**, respectivamente.

3.3. Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica (RH) No. 9 “Sonora Sur”; Subregión Hidrológica Río Yaqui, cuenca baja del Río Yaqui.

El río Yaqui drena la cuenca del mismo nombre en una superficie de 69,590 km² y tiene elevaciones del terreno hasta de 3,000 m.s.n.m. Nace en la confluencia de los ríos Bavispe y Papigochi, en las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, y desemboca en el golfo de California, cerca del poblado de San Ignacio Río Muerto, en el Valle del Yaqui. Tiene una longitud de 410 km, aunque si se considera con una de sus fuentes el sistema Yaqui-Papigochi, alcanza una longitud de 1050 km. El Papigochi cambia varias veces de nombre: Papigochi → Sirupa → Huapoca → Aros → Yaqui.

Su curso se encuentra interrumpido por varias presas hidroeléctricas, que crean importantes embalses como son la presa El Novillo (Plutarco Elías Calles), la presa Lázaro Cárdenas (Angostura) y la presa Álvaro Obregón (El Oviáchic), las cuales además de la generación hidroeléctrica, proporcionan agua para la irrigación de la zona agrícola del Valle del Yaqui (Ciudad Obregón) y Vicam.

El Río Papigochi (Sirupa) nace en la Sierra Madre Occidental del estado de Chihuahua; aunque cambia de rumbo bruscamente, mantiene una dirección preferencial SE-NW, tomando el nombre de Río Aros al entrar al estado de Sonora y uniéndose a la corriente del Río Bavispe, aguas arriba de la Presa Plutarco Elías Calles, para formar el Río Yaqui.

El tributario principal, el Río Bavispe, nace también en la misma sierra unos 200 km al norte; entra al estado de Sonora con rumbo preferencial SE-NW y se intercepta con el Río Agua Prieta que nace en el estado de Arizona, E. U. A., cambiando de rumbo bruscamente a N-S, manteniendo el mismo nombre hasta su confluencia con el Río Aros, adoptando después el nombre de Río Yaqui. A 100 km al norte de esta confluencia y sobre el Río Bavispe se encuentra la presa La Angostura, que almacena 1,270 millones de m³. Ya con el nombre de Río Yaqui, aunque con varios cambios bruscos de rumbo, mantiene una dirección preferencial N-S.

3.4. Geomorfología

La superficie cubierta por el acuífero se localiza dentro dos unidades geomorfológicas importantes: zona de montaña perteneciente a la Sierra Madre Occidental y las sierras sepultadas, localizadas al noreste y norte, respectivamente, y la zona de planicie costera en toda la superficie restante. El paisaje geomorfológico de la región presenta una relación íntima con la forma y disposición del delta del Río Yaqui y por formaciones de origen volcánico que predominan en esta zona. La planicie costera corresponde al delta del Río Yaqui, compuesto por acumulaciones de material detrítico no consolidado de edad Terciario Superior y Reciente interrumpido por antiguas islas, en forma de cerros y pequeñas serranías, constituidas por rocas volcánicas.

El relieve endógeno volcánico acumulativo es el resultado de la actividad volcánica del Oligoceno al Plioceno y Pleistoceno. Está representado por formas de relieve volcánico efusivo en forma de sierras, mesetas. Laderas y lomeríos; incluye también las sierras bajas y lomeríos que se localizan en la porción nororiental las cuales están formadas por ignimbritas y tobas.

Las principales formas del relieve son de tipo exógeno, en las cuales se incluye a los rasgos que son formados por procesos destructivos, como el intemperismo y erosión, y por procesos constructivos como los depósitos fluviales, marinos y eólicos. Dentro de éstos últimos se encuentra el relieve erosivo fluvial que es el generado por procesos de disección del relieve por la acción de corrientes fluviales; el relieve acumulativo fluvial que se forma en los depósitos del cauce del Río Yaqui, como son las llanuras de inundación y terrazas; el relieve acumulativo proluvial que corresponde a los abanicos aluviales o depósitos de pie de monte; el relieve acumulativo marino que corresponde a los depósitos costeros, como son las barras, médanos costeros, tómbolos, cantiles, nichos, playas y bancos; y el relieve

fluviomarino deltaico causado en general por la acción conjunta del relieve acumulativo fluvial con el relieve acumulativo marino, dando lugar a la formación del delta del Río Yaqui.

En la franja costera existen esteros, bahías y depósitos arenosos que, debido a la acción de las corrientes litorales, mareas, oleaje y vientos, han desarrollado dunas paralelas, barras, barras islas, tómbolos y flechas.

4. GEOLOGÍA

La geología de la zona está representada por rocas ígneas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, cuya edad comprende del Cretácico al Reciente (figura 2)

El Cretácico está representado por un vulcanismo intermedio representado en la base por derrames y piroclastos de composición andesítica y dacítica, y en la cima derrames de piroclastos con niveles de arenisca tobácea; así como rocas ígneas intrusivas de composición granodiorítica y granítica, muy fracturadas y con intemperismo profundo, que están distribuidas en la porción norte y nororiental del acuífero y que subyacen a rocas volcánicas y depósitos clásticos del Terciario.

El Terciario se caracteriza por rocas ígneas extrusivas y vulcanosedimentarias. Las primeras integran una secuencia de riolitas, ignimbritas, tobas félsicas, toba brechoide, brecha volcánica máfica y basaltos; que presentan fracturamiento moderado y se localizan en la porción norte y noreste del acuífero. Las rocas sedimentarias están representadas por una secuencia de arenisca-conglomerado y conglomerados, cuyos fragmentos provienen de antiguos abanicos aluviales. Estos depósitos sedimentarios afloran en las porciones central, oeste y noreste del valle. A esta misma edad corresponden los basaltos de olivino y brechas volcánicas que presentan fracturamiento intenso en forma de bloques, que afloran como pequeños remanentes que sobreyacen en discordancia a las rocas graníticas del Cretácico

Del Cuaternario son los conglomerados polimícticos y areniscas, pobremente consolidados, que afloran en los valles aluviales de algunos arroyos y como paleo-terrazas aluviales del Río Yaqui; así como depósitos aluviales y de relleno constituidos por limos, gravas y bloques de mayor tamaño que descansan sobre las unidades anteriores, formando terrazas en la cuenca del río y en los lechos de los arroyos. A esta misma unidad pertenecen los depósitos eólicos, litorales y lacustres que se observan en la zona costera.

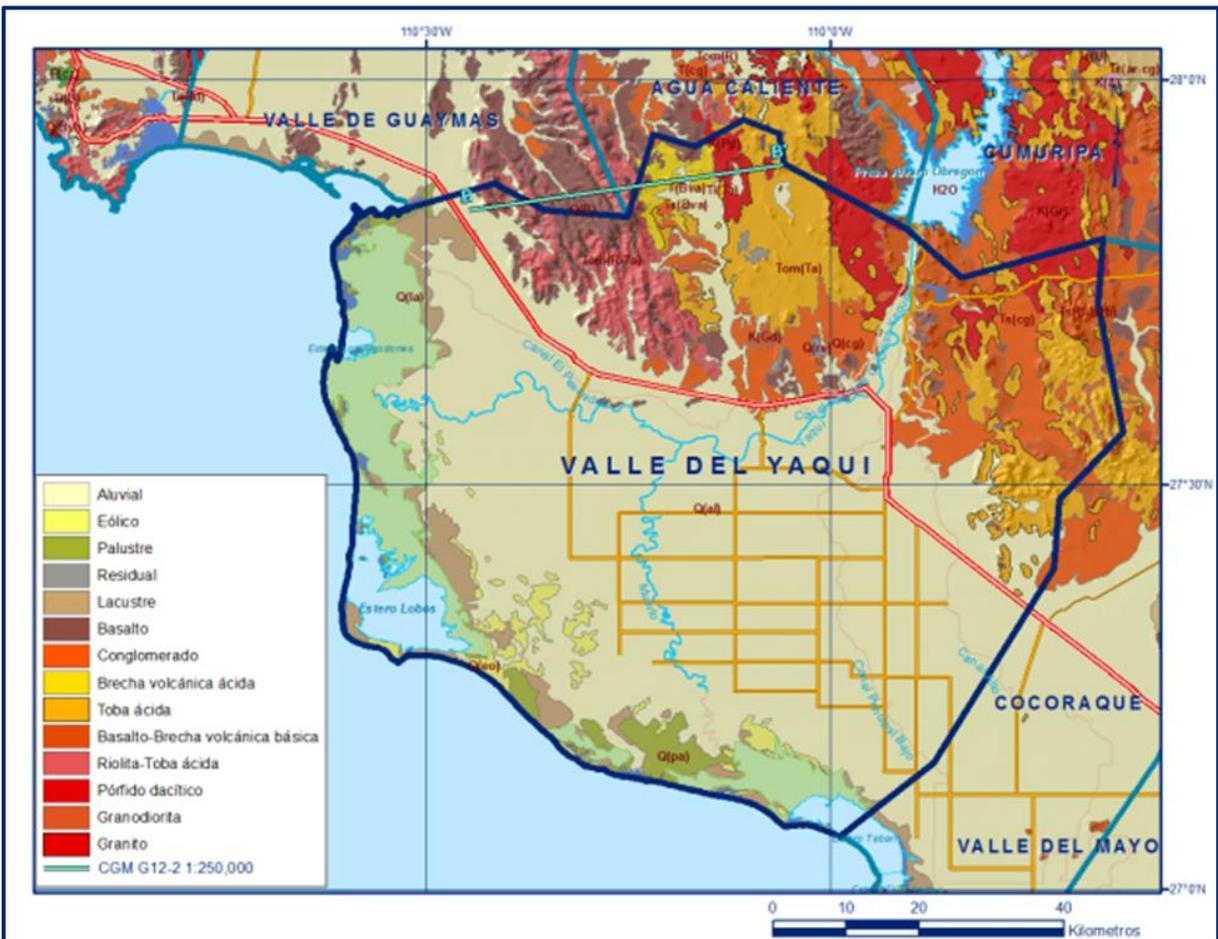


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

En la región en la que se ubica el acuífero Valle del Yaqui, afloran unidades estratigráficas cuyas edades varían desde el Cretácico Inferior hasta el Holoceno; su nomenclatura tanto formal como informal está basada principalmente en los trabajos realizados por el Servicio Geológico Mexicano. Las unidades que afloran en el área de estudio, de la más antigua a la más reciente, son: Cretácico Superior (Granito-Granodiorita); Terciario Oligoceno-Mioceno (tobas e ignimbritas); Terciario Mioceno (conglomerados y vulcanoclásticas); Terciario Mioceno (basaltos); Terciario Indiferenciado (volcánicas); Cuaternario-Pleistoceno (conglomerados y areniscas); reciente (gravas, arenas y arcillas).

CRETÁCICO

Está representado por rocas intrusivas de composición granítica y granodiorítica de color gris claro al fresco que intemperizan a color crema, de textura fanerítica

equigranular, en ocasiones porfídica. Sobreyaciendo discordantemente a estas rocas afloran secuencias de rocas volcánicas de composición intermedia y vulcanosedimentarias: andesitas y areniscas con horizontes de calizas del Cretácico Superior, que se correlacionan con la parte media de la Formación Tarahumara (Wilson & Rocha, 1946).

Durante el cambio del Cretácico al Terciario esta región fue el escenario de una intensa actividad magmática, actualmente representada por una serie de rocas ígneas de afinidad granítica (granitos, dioritas y granitos-granodioritas), cuyas edades varían del Cretácico Tardío al Eoceno. Sin embargo, desde un punto de vista petrogenético, se trata de una serie calcoalcalina emplazada en un ambiente de arco continental durante la "Orogenia Laramide".

Las andesitas y las rocas intrusivas se consideran parte del Complejo Volcánico Inferior propuesto por McDowell y Clabaugh (1979), que en la zona se asignan al Cretácico Superior-Paleoceno y su origen se atribuye a un magmatismo de arco asociado a la Orogenia Laramide. Las rocas intrusivas son de composición de granodiorita a cuarzomonzonita-diorita, la secuencia volcánica es de composición intermedia formada por aglomerado de composición andesítica, andesita afanítica y porfídica. Existen intrusivos máficos considerados como hornblendita gabro de edad posiblemente cretácica, así como apófisis del Batolito de Sinaloa del Cretácico Superior, representado por el intrusivo Capomos.

TERCIARIO

Rocas volcánicas del Terciario

En esta unidad se agrupan las rocas pertenecientes a las secuencias riolíticas contemporáneas al Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental, que se distribuyen principalmente en la porción septentrional del área y en afloramientos aislados en la región oriental formando cerros de laderas escarpadas. Litológicamente están conformadas por tobas riolíticas, riolíticas, riolita, riolita, riolita, ignimbrita, con algunas intercalaciones de brecha volcánica, toba lítica y obsidiana. Su espesor máximo en el área es del orden de los 250-300 m. Cubren discordantemente a las andesitas del Grupo Volcánico Inferior, que no afloran en el área de estudio, y a las rocas Cretácicas. A su vez, se encuentra cubierta discordantemente por las rocas de la Formación Báucarit.

Formación Báucarit

Se agrupan con este nombre a los conglomerados y areniscas que Dumble (1900) y King (1939) denominaron Formación Báucarit, la unidad se distribuye en el área solo en la porción nororiental y en las estribaciones de la sierra. Está formada por areniscas y conglomerados interestratificados, con matriz arcillosa, en estratos delgados que muestran echado de 10 a 20 grados; presenta fracturamiento y coloración rojiza. Su espesor máximo es menor a 100 m. Se considera un depósito de cuenca endorreica asociado a fosas tectónicas. De acuerdo con sus relaciones estratigráficas discordantes con las rocas volcánicas de Terciario y las intrusivas del Cretácico, y su significado tectónico, se le asocia una edad del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano.

Rocas volcánicas del Terciario Indiferenciado

Sobre la secuencia anterior se presenta un paquete volcánico cuya secuencia silícica está compuesta por flujos de piroclastos, ignimbritas asociadas con flujos de lavas, domos riolíticos y vulcanoclásticos, como resultado de las pulsaciones de ignimbritas que ocurrieron en el Mioceno medio y están asociadas a la fase declinante de la Orogenia Laramide y al vulcanismo de transición entre un magmatismo de subducción e intraplaca. Se correlaciona con el Supergrupo Volcánico Superior.

Secuencia Volcánica de la Sierra del Bacatete

Con este nombre se conoce a las secuencias basálticas alcalinas de la Sierra del Bacatete, que se asocian al episodio de vulcanismo basáltico alcalino, emplazadas a través de un sistema de fallas originadas por la apertura del Golfo de California. Aflora en la región noroccidental, en la porción sureste de la Sierra del Bacatete. Cubre discordantemente a la Formación Báucarit y a las rocas volcánicas del Terciario; su espesor máximo de 600 m, estimado de acuerdo con la cartografía.

CUATERNARIO

Del Plioceno al Holoceno se desarrolló una amplia actividad erosiva y se originan secuencias fluviales y fluvio-deltaicas de sedimentos mal consolidados y no consolidados, que están incluidos dentro del Grupo Sonora y Grupo Río Mayo.

El Pleistoceno está representado por afloramientos de conglomerados polimícticos y areniscas, pobremente litificadas, que se encuentran aflorando en muchos valles aluviales de las cuencas continentales, conocidos como Grupo Sonora, que afloran escasamente en algunos arroyos y paleo-terrazas aluviales de los ríos, así como por

vulcanismo basáltico representado por brechas volcánicas basálticas y basaltos. Finalmente, se presentan depósitos cuaternarios aluviales y de relleno, formando terrazas en la cuenca del río Yaqui y en los lechos de los arroyos, que presentan granulometría variada desde limos, gravas y bloques de gran tamaño que descansan sobre las unidades anteriores. Sus depósitos localmente presentan estratificación cruzada, gradación y algunos lentes, aumentando su espesor de las estribaciones de las sierras hacia la zona costera, en donde alcanza 400 m. A esta misma unidad corresponden los depósitos eólicos, palustres, lacustres y litorales

4.2. Geología estructural

El rasgo geomorfológico más característico de la zona es la sucesión de sierras alargadas y afectadas por grandes fallas de rumbo preferencial NW-SE, truncadas por fallas de orientación NE-SW, típica de la región, atribuida al último régimen distensivo del Terciario que dislocó las unidades pre-terciarias, borrando gran parte de los eventos tectónicos anteriores. Es posible aún reconocer la deformación laramídica en la intrusión del batolito Cretácico-Terciario, representado por los granitos y granodioritas. Las fallas más importantes se localizan en los flancos oriental y occidental de la sierra de Bacatete donde se presentan fallas regionales normales de rumbo NW-SE que presentan longitudes que superan 10 km, con inclinación principalmente hacia el NE, produciendo desplazamiento vertical de más de 500 m. También existen otras fallas burdamente paralelas de menor longitud y desplazamiento, que forman pequeñas fosas y pilares muy localizados en la misma sierra. Los eventos intrusivos posteriores generaron apófisis y troncos de diferente composición. Durante el Oligoceno y Mioceno se emplazaron en la fase final de la subducción de las placas Farallón y Norteamérica, este evento fue seguido por un periodo de extensión tectónica en el Mioceno que ocasionó la formación de fallas normales regionales, conformando bloques levantados y escalonados que dieron origen a la morfología de sierras y valles alargados principalmente de rumbo NW-SE y N-S. Durante esta fase extensiva se produce el adelgazamiento de la corteza con fusión parcial y producción de magma basáltico que llega a la superficie a través de fallas normales activas, dando lugar a un vulcanismo básico de aparente origen fisural. (Carta Geológico Minera "Guaymas" G12-2, escala 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano, 2002).

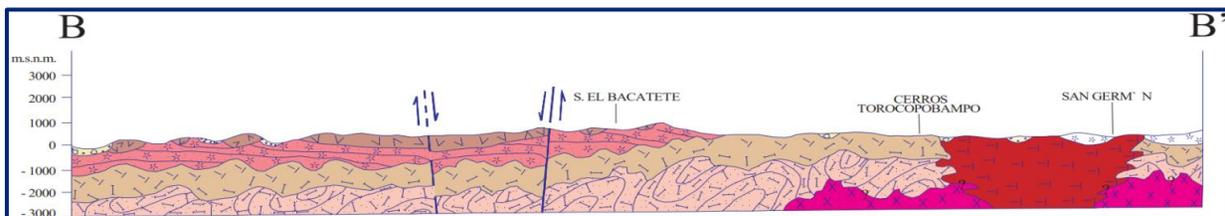
Se presenta deformación dúctil-frágil y frágil; la primera de manera incipiente en la secuencia vulcano-sedimentaria del Cretácico Superior, observada en la porción oriental del cerro La Mina, donde se presentan calizas margosas ligeramente

plegadas, interdigitadas entre la secuencia andesítica de las rocas correlacionables con la Formación Tarahumara. La deformación frágil presenta dos sistemas, el primero y más importante de rumbo NW-SE, algunas asociadas con estructuras mineralizadas, y el segundo de rumbo NE-SW con tendencia al oriente franco, representado en forma muy aislada y asociado también a algunas estructuras mineralizadas. (Carta Geológico Minera “Buenavista” G12-B14, escala 1:50,000. Servicio Geológico Mexicano, 2019).

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de cortes litológicos de pozos, geofísica y de geología superficial recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, litorales, eólicos y lacustres, que constituyen el lecho y llanura de inundación del Río Yaqui y la planicie costera, así como en los conglomerados, cuyo espesor conjunto alcanza algunos cientos de metros en la porción central de la planicie. Esta es la unidad que principalmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región. Las exploraciones geofísicas realizadas revelan que el subsuelo del Valle del Yaqui está conformado por una gran fosa tectónica (fosa Obregón), orientada en dirección norte-sur, en la que los espesores de los materiales de relleno superan los 1000 m, pero el espesor promedio del acuífero varía de 200 a 300 m (Distrito de Riego del Río Yaqui, 2003).

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas volcánicas de litología muy variada que comprende riolitas, tobas, brechas volcánicas, basaltos, y rocas sedimentarias como areniscas y conglomerados, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico, están representados por las mismas rocas ígneas y sedimentarias al desaparecer al fracturamiento a profundidad, y por rocas metamórficas e ígneas intrusivas (figura 3).



FUENTE: Carta Geológico-Minera G12-2 “Guaymas”. Escala 1:250,000 (SGM, 2002)

Figura 3. Sección Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, así como los cortes litológicos de pozos permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, con condiciones locales de **semiconfinamiento y confinamiento** debido a la presencia de estratos, y lentes de sedimentos arcillosos, que es el resultado de la compleja distribución de las planicies fluvio-aluvial y deltaica del río Yaqui. Está constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos, de pie de monte y lacustres, así como por conglomerados polimícticos y areniscas, cuyo espesor puede alcanzar algunas centenas de metros en el centro de la planicie. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas y vulcanosedimentarias entre las que destacan tobas ácidas, riolitas, ignimbritas, brechas y basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o alteración.

5.2. Parámetros hidráulicos

Para la estimación de los parámetros hidráulicos de las unidades geológicas que conforman el acuífero, se analizó la información de pruebas de bombeo, la mayoría de ellas de corta duración, que se han realizado como parte de estudios previos a lo largo de varias décadas (SARH, CONAGUA, Distrito de Riego del Río Yaqui, ITSON). De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se determina que los valores de transmisividad varían de **1.9×10^{-4} a 2.3×10^{-1} m²/s**. Si consideramos un espesor promedio de 250 m, los valores de conductividad hidráulica varían de **0.07 a 79.5 m/d (7.6×10^{-7} a 9.2×10^{-4} m/s)**, que reflejan la gran heterogeneidad de los depósitos que conforman el acuífero.

Los valores más altos se presentan en la porción norte del Distrito de Riego, al oeste de Ciudad Obregón, entre Chinabampo y Campo 5, y en la cercanía al cauce del Río Yaqui, asociados a la existencia depósitos de granulometría más gruesa; en tanto que los más bajos se registraron hacia el Estero El Tobarí y hacia las estribaciones de las sierras, debido a la presencia de sedimentos arcillosos y menores espesores saturados, respectivamente.

Con respecto al valor del coeficiente de almacenamiento, muy pocas pruebas de bombeo contaron con pozo de observación en la zona del distrito de riego. Los resultados muestran valores que varían de **3.0×10^{-8} a 5.2×10^{-1}** . Para el rendimiento específico se consideran valores que varían de **0.05 a 0.15**.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2003 además de registros históricos durante el periodo 1997-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Noreste y por el Distrito de Riego del Río Yaqui, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 3 a 50 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera y del cauce del río Yaqui hacia las estribaciones de las sierras que limitan la planicie. Los niveles estáticos más someros, menores de 5 m, se registran en toda la porción baja de la cuenca, en la zona comprendida entre Los Venaditos, Mache López, El Salitral, Veinticuatro de Junio y Campo San Isidro; incrementándose gradualmente hacia el norte y noreste conforme se asciende topográficamente. Los más profundos de 20 a 50 m, se registraron en las porciones norte, entre Ciudad Obregón y Esperanza; y nororiental, entre Marte R. Gómez, El Tobarito, Quetchehueca y Eusebio Zamorano Acosta (figura 4).

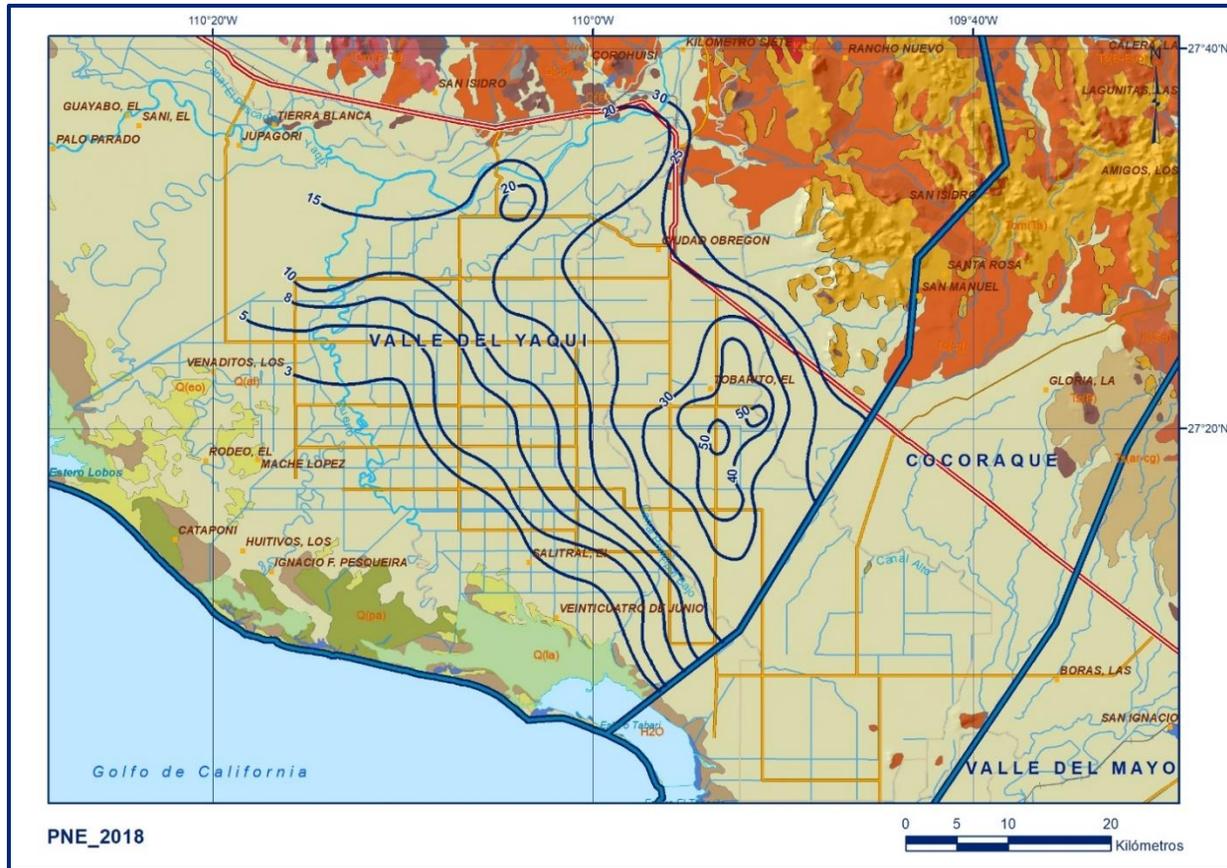


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 1 a 30 msnm, que se incrementan de las zonas de depósitos lacustres y palustres que se localizan en toda la zona costera entre las bahías de Lobos y Tobarí, conforme se asciende topográficamente al igual que los valores de profundidad, hacia la región norte y noreste, mostrando de esta manera una dirección preferencial de flujo subterráneo norte-sur y noreste-suroeste, paralela a la dirección de escurrimiento superficial. Los valores más altos de carga hidráulica de presentan al norte de Ciudad Obregón y en la porción nororiental, a lo largo de carretera que comunica a esta población con Navojoa (figura 5).

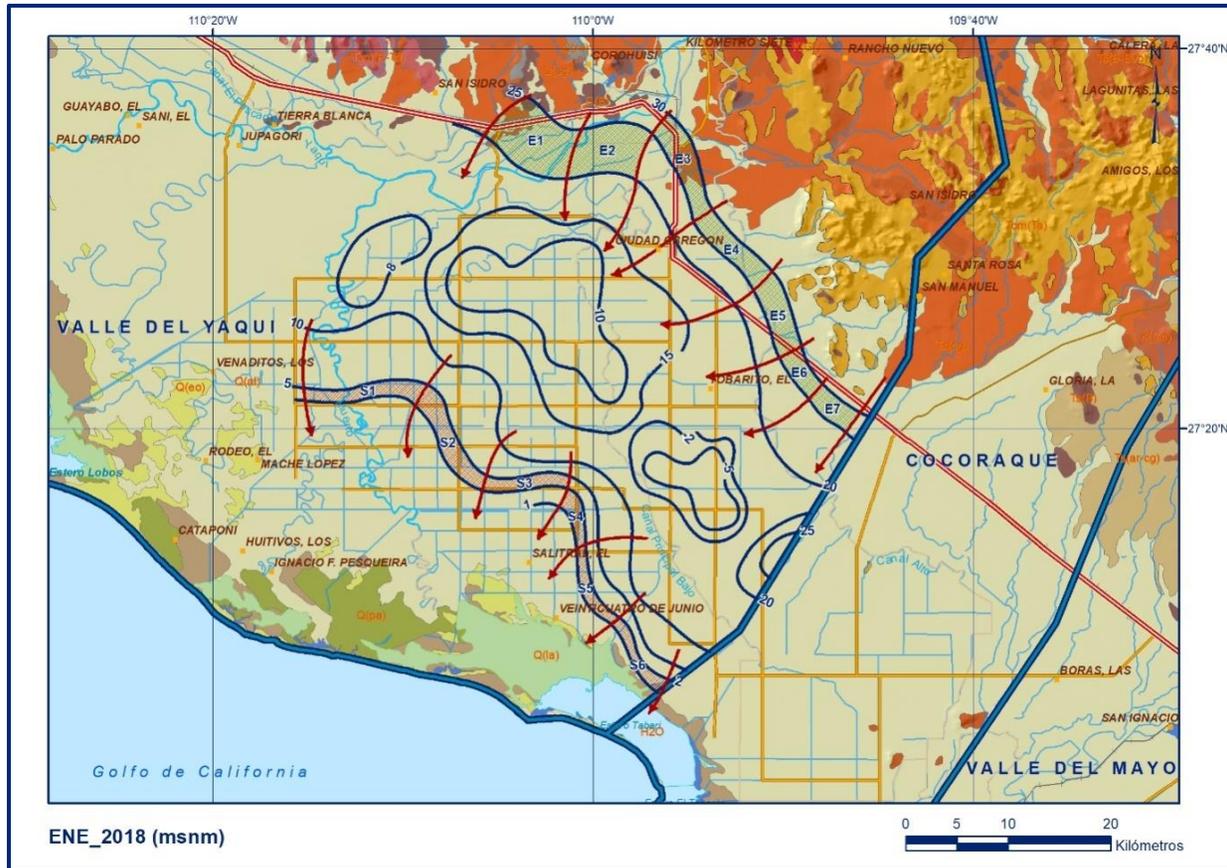


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 registra valores tanto de recuperación como de abatimiento. Los primeros se observan en la porción central del valle, entre las localidades Francisco Javier Mina y Primero de Mayo, y varían de 1 a 2 m, que representan 0.1 a 0.2 m anuales, con valores locales de 5 m (0.5 m anuales). Los abatimientos varían de 2 a 5 m, es decir 0.2 a 0.5 m anuales, con valores puntuales de 10 y 15 m (1.0 a 1.5 m anuales), se registraron en la región suroriental del valle, entre El Tobarito y Eusebio Zamorano Acosta. En la mayor parte de la superficie de la zona de explotación no se registraron cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

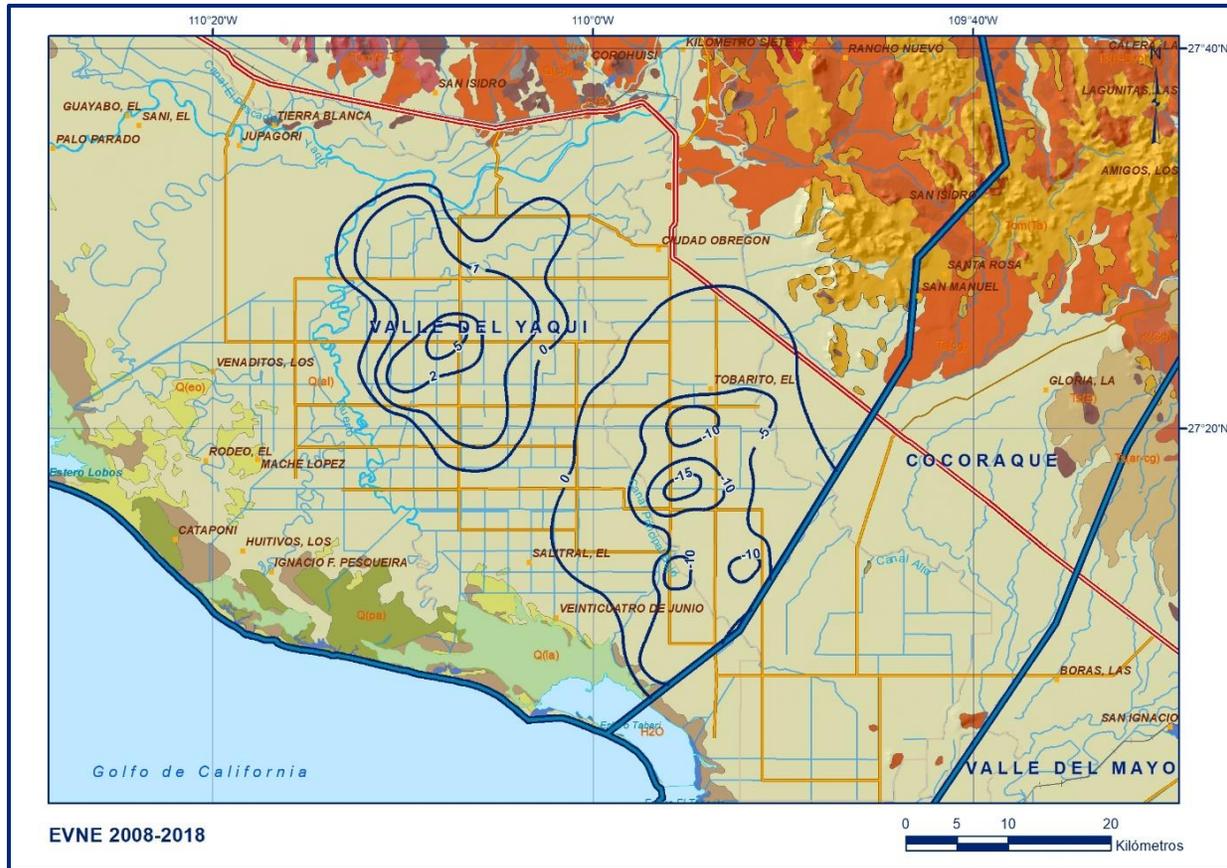


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2003 se tomaron 182 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de distrito de riego que incluye los acuíferos Valle del Yaqui y Cocoraque, para los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos correspondientes, así como 30 muestras para análisis isotópicos de deuterio, tritio, oxígeno y Carbono 14. Las determinaciones de campo y laboratorio incluyeron conductividad eléctrica, temperatura, pH, Eh, sólidos totales disueltos, dureza total, iones mayoritarios, nitratos y bromuro

De manera general, las concentraciones de algunos de los diferentes iones y elementos sobrepasaron los límites máximos permisibles (LMP) que establece la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD, para el agua destinada al consumo humano. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 235 a 5420 mg/l., rebasando en algunos casos el LMP de 1000 ppm que establece la mencionada NOM para el agua destinada al consumo

humano. Los parámetros cuyas concentraciones superan el LMP establecido en la norma son coliformes fecales sólidos totales disueltos, dureza total, cloruros, sodio

Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a agua de mar, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 344 a 22,500 $\mu\text{mhos/cm}$. Los valores puntuales mayores se asocian a la contaminación de las granjas acuícolas. Los valores más bajos se registraron en la porción norte y noreste, aumentando gradualmente hacia la zona costera. Los valores de temperatura varían de 25.1 a 40.0 $^{\circ}\text{C}$ y los de pH entre 6.7 y 8.7.

Con respecto a las familias del agua por ion dominante, se identificaron muchas familias del agua debido a la dinámica e intercambio que existe entre el agua superficial y la subterránea, propia de los distritos de riego, predominando las familias sódica-sulfatada, sódica-bicarbonatada, magnésica-clorurada, cálcica-clorurada. En la gran variedad de familias identificadas, los pares iónicos calcio y el magnesio tienen mayor presencia, contribuyendo a la dureza del agua. A lo largo de las zonas cercanas el trazo de los canales alto y bajo, y hacia las regiones norte y noreste, predominan las aguas de bicarbonatadas, tanto sódicas como cálcicas y mixtas, que reflejan la influencia del agua del río Yaqui y la proximidad de las zonas de recarga.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2003, (Distrito de Riego del Río Yaqui, 2003), complementada con información 2020 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) y los volúmenes de extracción del Distrito de Riego 2010-2022, proporcionada por el Organismo de Cuenca Noroeste, se registró la existencia de 1883 aprovechamientos del agua subterránea, de cuales 525 se utilizan para la agricultura, 787 para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 470 para uso doméstico-abrevadero, 56 para uso industrial y 39 para servicios y 6 para acuacultura.

El volumen total de extracción calculado es de **509.9 $\text{hm}^3/\text{año}$** , de los cuales 438.4 hm^3 (86.0 %) son para uso agrícola, 55.7 hm^3 (10.9%) para uso público-urbano, 9.1 hm^3 (1.8%) para uso industrial, 3.7 hm^3 (0.7%) para uso pecuario, 0.7 hm^3 (0.1 %) para servicios y 2.3 hm^3 (0.5%) para acuacultura.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2009-2019, en una superficie de **2,068 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

7.1. Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que el volumen destinado al uso público-urbano es pequeño comparado con volumen para uso agrícola, para fines del balance de aguas subterráneas solo se considera la recarga incidental debida a los retornos del riego agrícola.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal (agua dulce)
- Ri:** Recarga incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración real
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

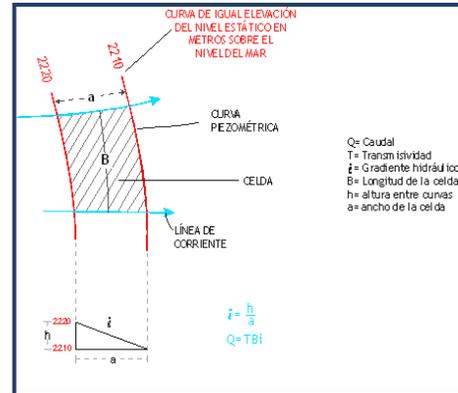
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal de agua dulce es de **67.6 hm³/año**.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	7605	5400	5	0.0009	0.050	0.352	11.1
E2	6100	5240	5	0.0010	0.050	0.291	9.2
E3	9840	2380	5	0.0021	0.030	0.620	19.6
E4	8260	1970	5	0.0025	0.020	0.419	13.2
E5	7280	2280	5	0.0022	0.015	0.239	7.6
E6	4450	1870	5	0.0027	0.010	0.119	3.8
E7	4435	2255	5	0.0022	0.010	0.098	3.1
TOTAL							67.6

7.1.3. Recarga incidental (Ri)

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

Para el riego agrícola se utiliza un promedio anual de 1,099.4 hm³ anuales durante el periodo 1995-2018, de los cuales 661.0 hm³ son agua superficial proveniente de la presa Álvaro Obregón (El Oviachic), entregada en los puntos de medición de los distritos de riego 018 Colonias Yaquis y 041 Río Yaqui, y 438.4 hm³ de agua

subterránea (de acuerdo con la información proporcionada por el Organismo de Cuenca Noroeste). Las estimaciones hechas por el distrito de riego indican que el promedio de la eficiencia en la aplicación del riego agrícola es del 65%, tomando en cuenta uso consuntivo, evapotranspiración real, precipitación efectiva, superficie sembrada, por tipo de cultivo, láminas de riego y volúmenes aplicados; por lo que el 35% restante se traduce en recarga afectiva de las infiltraciones por retornos de riego y en los canales de distribución. Esto se explica porque en toda la superficie del distrito de riego los niveles freáticos son menores de 10 m de profundidad y a la permeabilidad media a alta de los depósitos aluviales. Por lo tanto, al aplicar el 35% de retornos al volumen de agua utilizado en la agricultura, se obtiene un volumen de 384.8 hm³ anuales. **Rr = 384.8 hm³ anuales.**

Adicionalmente, las fugas de la red de abastecimiento de agua potable y del sistema de alcantarillado varían en función del estado físico y antigüedad de las líneas de conducción, así como de la eficiencia en el sistema de abastecimiento. Si se toma en cuenta que para uso público-urbano se utilizan 55.7 hm³ anuales, y consideramos que un 20% de este volumen retorna al acuífero como recarga efectiva, entonces el volumen de recarga por infiltración por las fugas en las redes de agua potable y el sistema de alcantarillado es **11.1 hm³ anuales.**

Por lo tanto, la recarga incidental es la suma de los retornos del riego agrícola y la recarga debida a las fugas en la red de abastecimiento de agua potable y del sistema de alcantarillado, es decir, **Ri = 395.9 hm³ anuales.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre de manera artificial por bombeo (B); en forma natural mediante salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) en la zona de niveles freáticos someros.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **509.9 hm³ anuales.**

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático

del 2019, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **21.6 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por el flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	10420	1470	3	0.0020	0.010	0.213	6.7
S2	10500	1720	3	0.0017	0.010	0.183	5.8
S3	7460	1290	3	0.0023	0.010	0.173	5.5
S4	5180	1395	1	0.0007	0.010	0.037	1.2
S5	8170	1120	1	0.0009	0.005	0.036	1.2
S6	7915	1085	1	0.0009	0.005	0.036	1.2
TOTAL							21.6

7.2.3 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) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación.

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 24.2 °C y 344.0 mm, representativos de la zona costera del área de balance del acuífero. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 315.7 mm anuales, como se muestra a continuación.

COUTAGNE	$ETR = P - \chi P^2$	$P =$	0.344
Donde:		$t =$	24.2
ETR= Evapotranspiración m/año		ETR =	0.3157
P = precipitación en m/año			
$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$			
t = temperatura en °C			

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 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso. En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100%, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 79.4 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
3 a 5	4	137.0	0.3157	5	0.2	8.7
1 a 3	2	373.4	0.3157	5	0.6	70.7
	Total	510.4				79.4

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

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.09$, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 2,068 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS : Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -222.5 hm^3 , es decir, un promedio anual de **-22.3 hm^3** .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
-15	-15	5.5	0.09	-7.5
-10 a -15	-12.5	22.2	0.09	-25.0
-10	-10	24.1	0.09	-21.7
-5 a -10	-7.5	193.8	0.09	-130.8
0 a -5	-2.5	369.3	0.09	-83.1
0 a 1	0.5	153.2	0.09	6.9
1 a 2	1.5	186.1	0.09	25.1
2 a 5	3.5	31.0	0.09	9.8
5	5	8.4	0.09	3.8
	TOTAL	27.7	TOTAL	-222.5
	Promedio anual			-22.3

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 509.9 + 21.6 + 79.4 - 22.3 - 67.6 - 395.9$$

$$R_v = 125.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 125.1 + 67.6 + 395.9$$

$$R = 588.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **588.6 hm³/año**, de los cuales 192.7 hm³ son recarga natural y 395.9 hm³ recarga incidental.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Valle del Yaqui la descarga natural comprometida es 61.3 hm³ anuales de los cuales 21.6 hm³ corresponden a la salida por flujo subterráneo hacia el mar que debe conservarse para mantener la posición de la interface marina, y 39.7 hm³ al 50% de la evapotranspiración que se compromete para protección del ecosistema costero y de los sitios RAMSAR. Por lo tanto, **DNC = 61.3 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 **515,565,849 m³ 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 del 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 588.6 - 61.3 - 515.565849 \\ \text{DMA} &= 11.734151 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **11,734,151 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1997. Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de la Red de Observación del Acuífero Valle del Yaqui. Realizado por Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2000. Estudio de disponibilidad y actualización hidrogeológica en los acuíferos de los valles de: El Yaqui, El Mayo, Boca Abierta y Guaymas, Sonora. Realizado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

Comisión Nacional del Agua, 2002. Estudio del impacto por el cambio climático en el avance de la interfase marina de los acuíferos costeros Valle del Yaqui y Cocoraque, en el estado de Sonora. Realizado por la Universidad de Sonora.

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

Distrito de Riego del Río Yaqui, 2003. Actualización Geohidrológica del Acuífero "Valle Del Yaqui" Municipio de Cajeme, Sonora Realizado por la Universidad de Sonora

Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológica-Minera G12-2Guaymas. Escala 1:250,000

Servicio Geológico Mexicano, 2019 Carta Geológica-Minera G12-B14Buenavista. Escala 1:50,000