



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DEL MAYO (2642), ESTADO  
DE SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. GENERALIDADES.....</b>                                   | <b>3</b>  |
| <b>Antecedentes.....</b>                                       | <b>3</b>  |
| 1.1. Localización.....   | 3         |
| 1.2. Situación administrativa del acuífero .....               | 4         |
| <b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>                                     | <b>7</b>  |
| 3.1. Provincia fisiográfica .....                              | 7         |
| 3.2. Clima .....   | 8         |
| 3.3. Hidrografía .....   | 9         |
| 3.4. Geomorfología.....  | 10        |
| <b>4. GEOLOGÍA .....</b>                                       | <b>11</b> |
| 4.1. Estratigrafía.....  | 12        |
| 4.2. Geología estructural .....                                | 16        |
| 4.3. Geología del subsuelo .....                               | 17        |
| <b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>                                   | <b>18</b> |
| 5.1. Tipo de acuífero.....                                     | 18        |
| 5.2. Parámetros hidráulicos.....                               | 19        |
| 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        |
| <b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>        | <b>23</b> |
| <b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....</b>                  | <b>24</b> |
| 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) .....  | 28        |
| 7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....     | 28        |
| 7.2.3. Evapotranspiración (ETR).....                           | 28        |
| 7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ .....              | 30        |
| <b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>                                 | <b>31</b> |
| 8.1. Recarga total media anual (R) .....                       | 32        |
| 8.2. Descarga natural comprometida (DNC) .....                 | 32        |
| 8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) .....  | 32        |
| 8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 33        |
| <b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                   | <b>34</b> |

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

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

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

### **1.1. Localización**

El acuífero Valle del Mayo, definido con la clave 2642 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 26°35'49" y 27°28'35" de latitud norte y 109°00'06" y 109°52'55" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,548 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con los acuíferos Cocoraque y Rosario-Tesopaco-El Quiriego; al noreste con el acuífero San Bernardo y al sureste con el acuífero Fuerte-Mayo. Al sur limita con el Golfo de California (figura 1).

Geopolíticamente el área que comprende el acuífero cubre la mayor parte de los municipios Navojoa, Huatabampo y Etchojoa; así como porciones menores de Álamos y Quiriego.

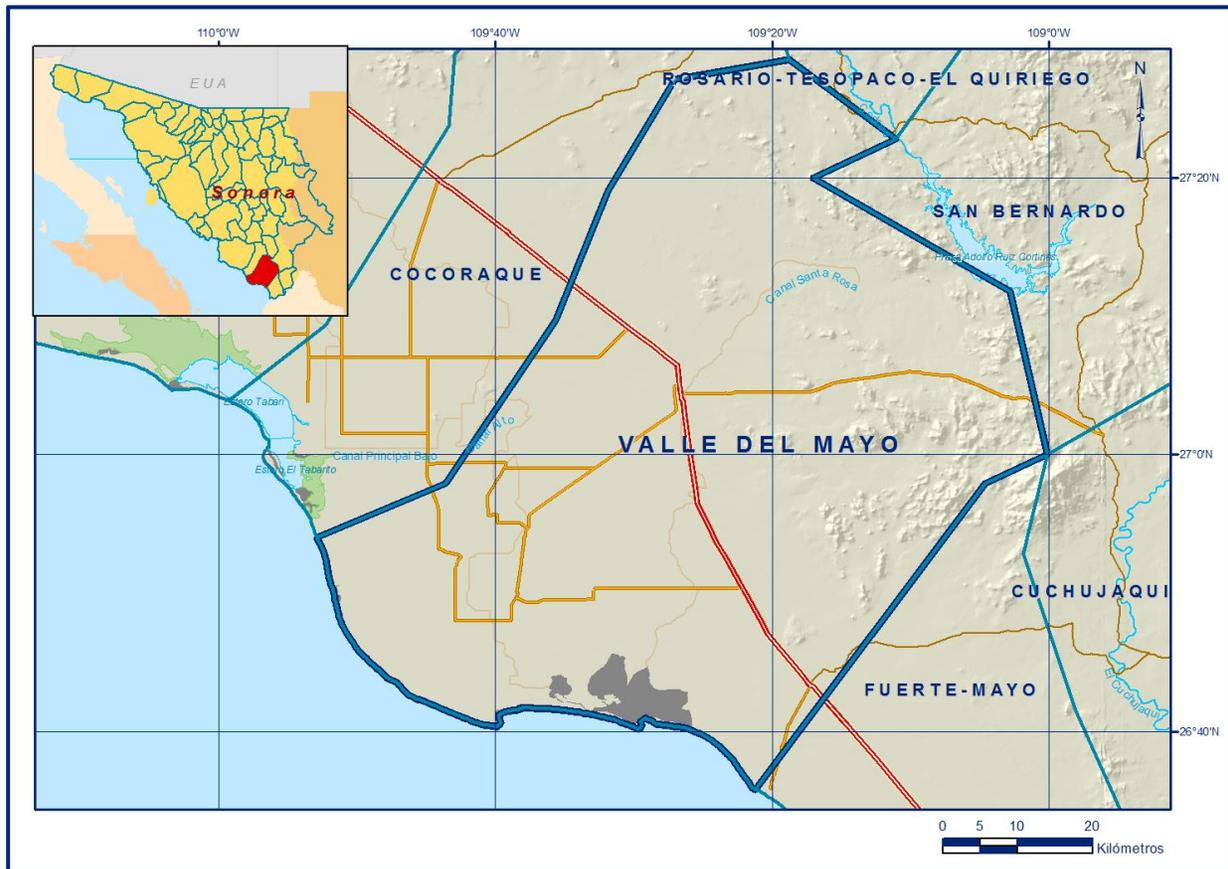


Figura 1. Localización del acuífero

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 a los Consejo de Cuenca Río Mayo, instalado el 30 de agosto del 2000. Su territorio se encuentra casi totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos de veda. En la mayor parte del territorio del acuífero rige el *“Acuerdo que declara de utilidad pública la construcción de las obras que forman el Distrito de Riego del Río Mayo, Sonora y la adquisición de*

los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 21 de febrero de 1956. En una pequeña área de la región suroriental, está en vigor el “Decreto por el que se amplía la zona vedada del Distrito de Riego del Río Mayo, Son., para el alumbramiento de aguas del subsuelo”, publicado en el DOF el 23 de septiembre de 1965. En la región suroccidental está vigente 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. Por último, en el extremo sur está vigente el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de la zona que el mismo delimita en el Estado de Sinaloa”, publicado en el DOF el 25 de agosto de 1956. Todas estas vedas son tipo III en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

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

| VERTICE | LONGITUD OESTE |         |          | LATITUD NORTE |         |          | OBSERVACIONES   |
|---------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|---|
|         | GRADOS         | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS        | MINUTOS | SEGUNDOS |   |
| 1       | 109            | 18      | 47.7     | 27            | 28      | 35.0     |   |
| 2       | 109            | 11      | 5.8      | 27            | 22      | 50.3     |   |
| 3       | 109            | 17      | 2.2      | 27            | 19      | 59.9     |   |
| 4       | 109            | 2       | 47.8     | 27            | 11      | 48.5     |   |
| 5       | 109            | 0       | 6.2      | 27            | 0       | 2.1      |   |
| 6       | 109            | 4       | 38.5     | 26            | 57      | 54.3     |   |
| 7       | 109            | 21      | 13.8     | 26            | 35      | 48.9     | DEL 7 AL 8 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA |
| 8       | 109            | 52      | 54.8     | 26            | 54      | 1.6      |   |
| 9       | 109            | 43      | 38.4     | 26            | 57      | 57.1     |   |
| 10      | 109            | 35      | 40.5     | 27            | 9       | 44.3     |   |
| 11      | 109            | 31      | 54.2     | 27            | 19      | 2.3      |   |
| 12      | 109            | 27      | 3.6      | 27            | 27      | 7.7      |   |
| 1       | 109            | 18      | 47.7     | 27            | 28      | 35.0     |   |

En pequeñas áreas de las zonas serranas de los extremos norte y suroriental 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 038 “Río Mayo” y una pequeña porción del Distrito de Riego 041 “Río Yaqui”. No se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En la zona costera se localiza el sitio RAMSAR “Humedales de Yavaros-Moroncarit”, decretado el 02 de febrero de 2009.

## **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 GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS EN EL VALLE DEL MAYO, realizado en 1970 por PLANIMEX, Ingenieros Consultores, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).** Sus objetivos fueron: comprobar y definir el funcionamiento de recarga, circulación, y descarga del acuífero, determinar las áreas favorables para la explotación del agua subterránea, conocer las características físico-químicas del agua subterránea, cuantificar el volumen aprovechable del acuífero y definir acciones para su explotación racional

**BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, VALLE DEL MAYO, PERÍODO 1996-1997 Y 1997-1998, realizado en 1999 por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), para la Comisión Nacional del Agua.** Su objetivo fue la comparación del comportamiento geohidrológico en el sistema acuífero del Valle del Mayo entre los períodos 1967-1969 y 1996-1998.

**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 DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DEL MAYO, SONORA, realizado en 2004 por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), para la Comisión Nacional del Agua.** Su objetivo fue actualizar la disponibilidad del agua subterránea en calidad y cantidad del acuífero del Valle del Mayo y elaborar un balance de aguas subterráneas. Entre sus actividades de campo más importantes destacan el censo 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 304 hm<sup>3</sup> anuales 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.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA E HIDROMÉTRICA DEL ACUÍFERO VALLE DEL MAYO, 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 a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en las Provincia Fisiográficas Llanura Sonorense, Subprovincia Desierto Sonorense, y Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras Alargadas. Según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2000) el área que cubre el acuífero se localiza en las Provincias Fisiográficas Sierra Madre Occidental, Subprovincia Pie de La Sierra; y Llanura Costera del Pacífico, Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa.

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 Pie de la Sierra se extiende como una franja angosta en el poniente de la Sierra Madre Occidental y tiene una orientación noroeste-sureste. Limita al oeste con la Llanura Costera del Pacífico. Se caracteriza por presentar sierras y lomeríos con litología similar a la de la subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur, aunque mucho más heterogénea, ya que tiene unidades de granito, andesita, basalto y conglomerado; asimismo, las sierras son de altitud menor, las mesetas son escasas, dominan los lomeríos bajos disectados, y los valles, alguno de ellos muy llanos; se trata de una región transicional entre la Sierra Madre Occidental y la Llanura Costera del Pacífico. Los sistemas de topofomas dominantes en la zona de estudio son las denominadas: sierra alta, bajada de lomeríos y valle abierto de laderas tendidas con lomeríos.

La Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Pacífico, limita al norte con el Desierto Sonorense, al este con la Sierra Madre Occidental, al sur con el Eje Neovolcánico y al oeste el Océano Pacífico, abarca zonas costeras de Sonora, Sinaloa y Nayarit. Esta llanura costera es angosta y alargada, tiene una orientación noroeste-sureste y sigue la dirección de la línea de costa. Su relieve es plano casi en su totalidad y está cubierta en su mayor parte de aluviones depositados por los ríos que descienden al mar desde la Sierra Madre Occidental, es también producto de la acción de las mareas que han retrabajado los sedimentos deltaicos y han dado lugar a la formación de barras, las cuales originaron lagunas, esteros y marismas.

La Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa está integrada en su mayor parte por tres grandes deltas: los de los ríos Yaqui, Mayo y Fuerte, parcialmente fusionados los dos primeros, en el cual está ubicado el Distrito de Riego Río Mayo. Todo su territorio se encuentra casi al nivel del mar y la mayoría está cubierto de material aluvial. La línea de costa es sinuosa con un buen número de bahías y esteros. Dentro del acuífero la integran cinco sistemas de topofomas: bajada, llanura aluvial, llanura deltaica, llanura Ciénega y llanura salina.

### **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 la porción oriental el clima es BS1(h')w semiárido cálido. 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 una pequeña porción de la zona serrana ubicada en el extremo este, se presenta un clima BShw 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 12 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Km 91 + 600 Palo Alto, Tesia, Tres Hermanos, Sinahuisa, Navojoa, El Veranito, Yocoquihua, Presa Adolfo Ruiz Cortines, Batacosa, Cocoraque, Villa Juárez y Mumuncuara; cuyo registro comprende el periodo 1990-2016. Con base en esta información, se determina que los valores promedio anual de temperatura, precipitación y evaporación potencial son **21°C, 420 mm y 2400 mm**, respectivamente.

### **3.3. Hidrografía**

El acuífero se encuentra ubicado casi en su totalidad en la Región Hidrológica (RH) No. 9 “Sonora Sur”; el extremo oriental pertenece a la RH No.10 “Sinaloa”, Subregiones Hidrológicas Río Mayo, Río Fuerte y Sonora Sur, cuencas del Río Mayo, Estero de Bacorehuis y Río Fuerte; subcuencas R. Mayo-Navojoa, A. Cedro, A. Cacoraque, R. Mayo-P. Adolfo Ruiz Cortinez, A. de Masiaca y A. Álamos.

La cuenca del Río Mayo drena la región poniente de la Sierra Madre Occidental y conduce las aguas al Golfo de California, comprende 27,541 km<sup>2</sup> de extensión territorial y se alimenta de varios afluentes como: el río Basaseachic, el río Concheño-Moris, el San José Ocampo y el arroyo Hondo, que recibe el caudal del río Babanori.

La corriente superficial más importante y el dren principal es el Río Mayo, tiene su origen en la Sierra Madre Occidental en Chihuahua, su curso es sinuoso con dirección general al suroeste, capta por la margen izquierda al río Batopilillas; aguas abajo se le une en su margen derecha el caudal del río Babanori y a partir de esta unión, cambia de rumbo hacia el sur recibiendo por la misma margen, los ríos Guajaray y Quiriego, éste último en el vaso de la presa Adolfo Ruiz Cortines o Mocúzari; aguas abajo del embalse, el río drena hacia el oeste y suroeste, pasa por la ciudad de Navjoa y continúa su curso hasta desembocar finalmente en el Golfo de California. El distrito de riego Río Mayo forma parte de una región fisiográfica conformada por una extensa planicie costera que recorre prácticamente todo el noroeste de México, flanqueada por el Golfo de California hacia el oeste, y por la sierra Madre Occidental hacia el este.

### **3.4. Geomorfología**

La superficie cubierta por el acuífero se localiza dentro de dos unidades geomorfológicas importantes: zona de montaña perteneciente a la Sierra Madre Occidental, localizada al norte y oriente del acuífero y la zona de planicie costera que se localiza al sur. El paisaje geomorfológico de la región presenta una relación íntima con la forma y disposición del delta del Río Mayo y por formaciones de origen volcánico que predominan en esta zona.

La Sierra Madre Occidental, se caracteriza por ser una zona de alto potencial de recarga de aguas al subsuelo de la planicie costera. Está constituida por montañas volcánicas en forma de mesetas irregulares construidas con materiales piroclásticos y magmas félsicos con intercalaciones de material clástico; estas mesetas se encuentran disectadas por angostos y profundos cañones. La distribución de las sierras está controlada por el sistema de fallas normales que han afectado esta región. La porción central muestra montañas complejas originadas por movimientos tectónicos que generaron plegamientos, intrusiones y fallamientos; estas montañas están constituidas por rocas sedimentarias, volcánicas, intrusivas y metamórficas, y están separadas por depresiones que han sido rellenadas por materiales detríticos continentales que al erosionarse formaron una serie de lomeríos al pie de las sierras.

La planicie costera corresponde al delta del Río Mayo, 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 metamórficas e ígneas; 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, tómbolas y flechas; la zona de detritos se encuentra alineada y paralela a la costa.

#### **4. GEOLOGÍA**

Las unidades más antiguas corresponden al Jurásico y están constituidas por areniscas con intercalaciones de lutitas y calizas, además de una secuencia metamórfica compuesta por filitas, pizarras, cuarcita y calizas recristalizadas; que subyacen en discordancia a las unidades calcáreas y detríticas cretácicas, así como a riolitas y tobas félsicas, areniscas y conglomerados del Terciario. Estas rocas afloran al norte de Navojoa.

El Cretácico está representado por rocas ígneas extrusivas, intrusivas y sedimentarias. Las rocas ígneas intrusivas son de composición granodiorítica y granítica, muy fracturadas y con intemperismo profundo, que están ampliamente distribuidas en el área; ambas subyacen a rocas volcánicas y sedimentarias del Terciario y Cuaternario. Las rocas ígneas extrusivas están representadas por andesitas con fracturamiento moderado a intenso que subyacen a rocas volcánicas y depósitos clásticos del Terciario, expuestas en pequeños afloramientos de la porción noroeste de la zona. Las sedimentarias están presentadas son yeso, lutita-arenisca, calizas, areniscas y conglomerados; el yeso se aflora en los alrededores del poblado Taymuco, ubicado al este, fuera del límite del acuífero; la alternancia de lutita-arenisca aflora en la porción suroeste; en tanto que las calizas con intercalaciones de lutita, dispuestas en capas laminares se localizan en los alrededores de la presa Adolfo Ruiz Cortines y en la región oriental.

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 oriental del valle. 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 que presentan fracturamiento intenso en forma de bloques y que se presentan 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 Mayo; 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 Mayo 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.

#### **4.1. Estratigrafía**

A nivel regional afloran rocas ígneas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, cuyas edades varían del Precámbrico al Reciente. La columna estratigráfica está representada por secuencias detrítico-carbonatadas, andesíticas, riolíticas y dacíticas, así como de sedimentos continentales con presencia de esporádicos derrames volcánicos, constituidos por basaltos, ignimbritas, areniscas, tobas riolíticas y dacitas, así como también conglomerados, limos, arenas y gravas (figura 2).

La descripción de las unidades litológicas expuestas en la superficie del acuífero fue realizada por el Servicio Geológico Mexicano en sus cartas Geológico Mineras “Huatabampo” y “Mocuzari”, escala 1:250,000 y 1:50,000. A continuación, se hace una breve descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente:

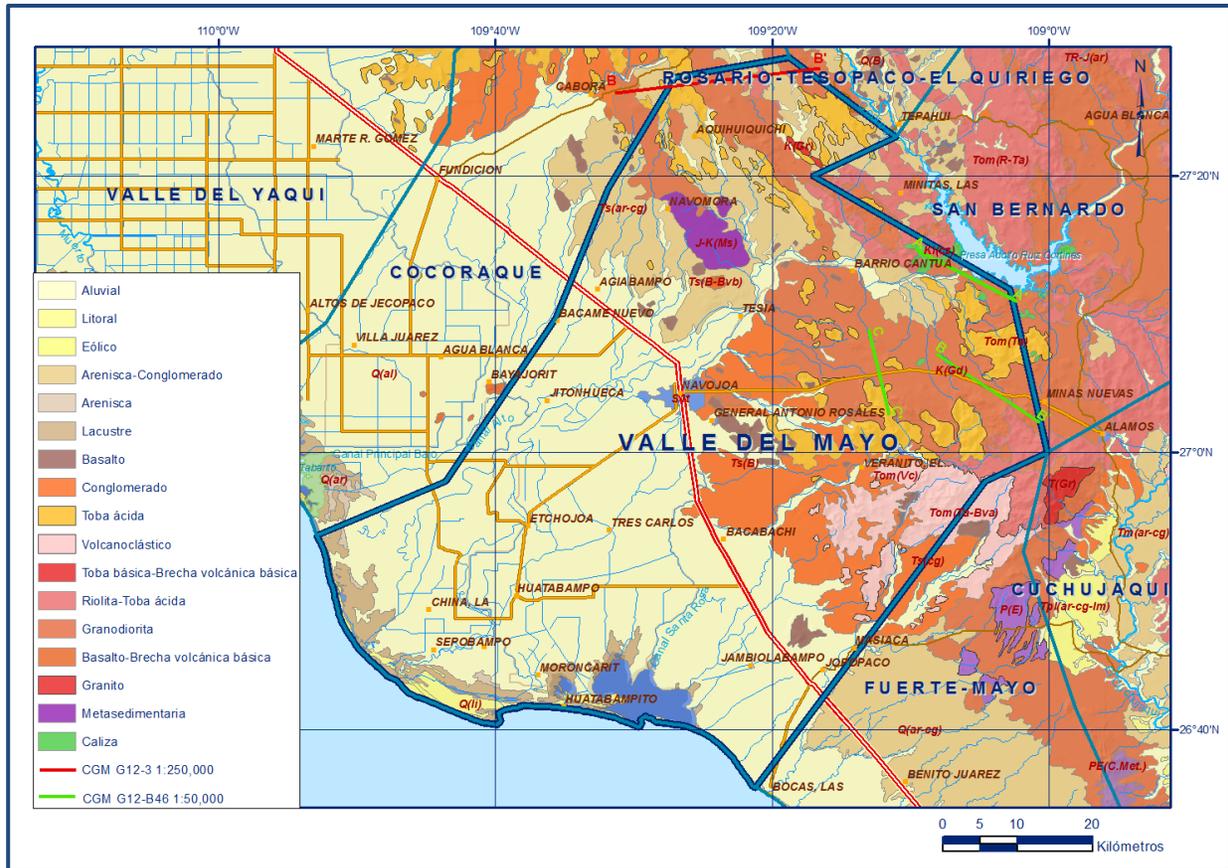


Figura 2. Geología general del acuífero

## PRECÁMBRICO

Las rocas más antiguas corresponden a un complejo metamórfico correlacionado con el complejo Sonobari, constituido por gneises anfibolíticos, metatonalitas y metadioritas con un alto grado de deformación, se le asigna una edad tentativa correspondiente al Precámbrico (?), aflora a manera de “colgantes” en un intrusivo granodiorítico, por lo que se desconoce su relación con las demás unidades.

## PALEOZOICO

El basamento estratigráfico de la región está constituido por una secuencia metamórfica constituida por filitas, esquistos, pizarras y cuarcitas con esporádicos horizontes lávicos andesíticos intercalados. Se le ubicó en el Paleozoico, por su correlación y similitud litológica con la Formación San José de Gracia del norte de Sinaloa, aunque es posible que también pueda pertenecer a la secuencia vulcanosedimentaria que se describe más adelante. Está afectado por un cuerpo intrusivo de composición granítico-granodiorítica de supuesta edad paleozoica que aflora al noreste de El Fuerte, Sinaloa. Se definen dos unidades tectónicas: El Terreno

Guerrero y el Cratón de Norteamérica. El Terreno Guerrero comprende la parte norte del acuífero. Su basamento consiste de una secuencia metamórfica y metasedimentaria que incluye esquistos, mármoles, cuarcitas y metaconglomerados, de posible edad Paleozoica.

## **MESOZOICO**

### **TRIÁSICO-JURÁSICO**

Sobreyaciendo discordantemente a la secuencia anterior afloran sedimentos detríticos carbonatados de la Formación Tepahui de edad Triásico-Jurásico, constituidos por lutitas y calizas, las cuales son correlacionables con unidades superiores del Grupo Barranca.

### **JURÁSICO-CRETÁCICO**

De esta edad son las rocas vulcanoclásticas de composición intermedia que incluye una alternancia de lutitas, areniscas, conglomerados de cuarzo, derrames de lavas de composición andesítica y calizas fosilíferas que coronan la secuencia. Al oriente de la región, fuera del límite del acuífero aflora una secuencia compuesta por metaandesitas y tobas andesíticas, con intercalaciones de calizas y areniscas dispuestas en estratos delgados a gruesos, de edad Jurásico tithoniano-Cretácico Albiano, que se correlaciona con el Terreno Guerrero; basado en el análisis bioestratigráfico de un horizonte de calizas de su base realizado al sur de la localidad minera Lluvia de Oro. Esta unidad está cabalgada por la secuencia de supuesta edad paleozoica. Su origen se asocia a un ambiente de arco-trinchera desarrollado durante la orogenia Mesocretácica.

### **CRETÁCICO**

Sobreyaciendo discordantemente a la unidad anterior, aflora al este de acuífero un paquete de rocas calcáreas arrecifales de estratificación masiva, con horizontes de lutita intercalados, que ha sido datado bioestratigráficamente en el Albiano; sin embargo, se ha observado que al norte del estado estas rocas tienen un rango estratigráfico que abarca al Cenomaniano-Turoniano y ocasionalmente al Maestrichtiano.

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.

Depositado discordantemente sobre las unidades del Cratón de Norteamérica, aflora un conglomerado polimíctico y areniscas de edad Cretácico Superior-Paleoceno, representada por el Conglomerado Gasogachic, el cual contiene clastos de rocas de la Formación Agua Salada.

### **TERCIARIO**

En el Terciario Paleoceno-Eoceno ocurre una actividad volcánica representada por una secuencia de andesitas y tobas andesíticas que descansan en discordancia sobre las unidades del Jurásico y Cretácico; con esto se define el Complejo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental. La secuencia andesítica es seguida por un periodo de erosión que origina el relleno de cuenca continentales depositándose areniscas y conglomerados que cubren parcialmente a las unidades anteriores, cuyos componentes se derivan de las secuencias sedimentarias cretácicas y de los derrames andesíticos

Discordantemente, sobre las rocas intrusivas, se presenta, se presenta una secuencia de areniscas, areniscas gravillentas, derrames de basaltos y conglomerados polimícticos coronados por un paquete de tobas líticas de la Formación Báucarit, asignada por correlación a la base del Mioceno. Se considera como un depósito de cuenca endorreica asociado a fosas tectónicas. 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 a vulcanismo de transición entre un magmatismo de subducción e intraplaca y se puede identificar con el Supergrupo Volcánico Superior.

Sobreyaciendo concordantemente a las tobas riolíticas e ignimbritas del Oligoceno, aflora una amplia gama de unidades del Mioceno, que incluyen riolitas con andesitas basálticas que de manera contemporánea se depositó con la unidad clástica de relleno, conformada por conglomerados polimícticos y areniscas. Este depósito

clástico es a su vez cubierto por tobas riolíticas, riolitas y basaltos. A finales del Mioceno se formaron aparatos volcánicos de basalto que sugieren haberse desarrollado como una actividad volcánica asociada a la fase de extensión principal del Mioceno tardío (cuencas y sierras).

## **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 y 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 del río Mayo, 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 Mayo 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. A esta misma unidad corresponden los depósitos eólicos, palustres, lacustres y litorales.

### **4.2. Geología estructural**

La región está afectada por fallamiento inverso en la porción suroriental, representado por la cabalgadura de las rocas paleozoicas sobre las jurásicas, posiblemente provocado por los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide. Posteriormente la región fue afectada por un patrón de fallas normales de rumbo NW-SE constituyendo una serie de fosas y pilares tectónicos de forma escalonada con desplazamientos laterales, y el último patrón estructural con dirección NE-SW provocó desplazamientos de bloques unos con respecto a otros e interrupción de estructuras (Carta Geológico Minera "Huatabampo" G12-6, escala 1:250,000. Servicio Geológico Mexicano, 2000).

Entre el Mioceno Temprano y el Mioceno medio se desarrolla un fallamiento normal de alto ángulo, el cual genera una serie de cuencas continentales tipo graben y semi-graben (Sierra y Cuencas), cuyo relleno sedimentario se lleva a cabo dentro de ambientes de abanico aluvial, fluvial y lacustre.

La región se sitúa en el límite de las provincias Llanura Sonorense y Sierra madre Occidental, que se caracteriza por un estilo de deformación frágil excepto en las áreas en donde aflora la secuencia vulcanosedimentaria en los que prevalece la deformación dúctil. La deformación frágil generó dos sistemas de fallas orientadas NE-SW y NW-SE; las primeras generalmente corresponden a fallas normales derivadas de un evento extensivo que sirvieron de control a la mineralizaciones de la primer generación; la segunda tendencia está implicada con fallas transformantes asociadas con la apertura del Golfo de California y dentro del área conformaron sistemas de fallas laterales cuyas raíces son profundas, y guardan una estrecha relación con las zonas mineralizadas de la segunda generación orientadas NW-SE y/o removilizando las mineralizaciones de la primera generación, burdamente paralelas a la línea de costa del Pacífico y a las estructuras producto de dicha distensión (Cuencas y Sierras). La evolución tectónica de la región está relacionada a la interacción entre las placas Pacífico y Farallón, cuya dinámica causó la deformación de la secuencia vulcanosedimentaria Mesocretácica en un complejo de arco-subducción y posteriormente involucrada en los procesos magmáticos del Terciario, culminando con la expulsión de grandes volúmenes de rocas ígneas que conforman la Sierra Madre Occidental (Carta Geológico Minera "Mocuzari" G12-B46, escala 1:50,000. Servicio Geológico Mexicano, 2008).

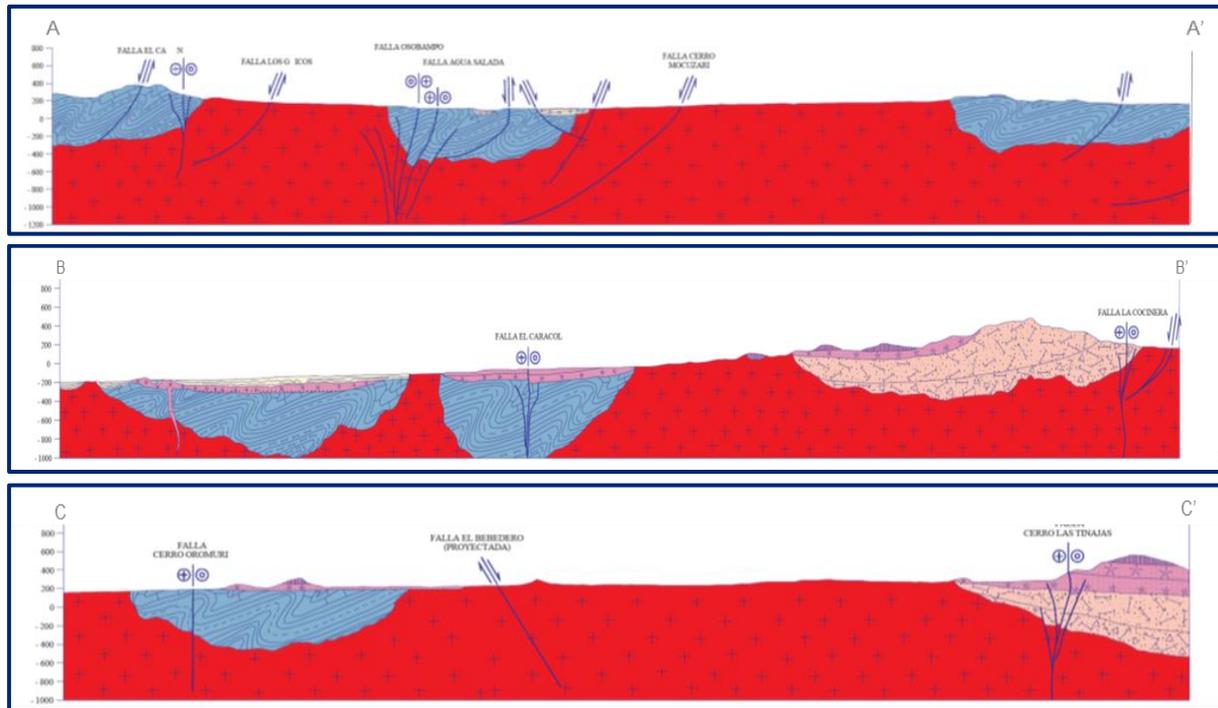
#### **4.3. Geología del subsuelo**

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 Mayo y la planicie costera, así como en los conglomerados, cuyo espesor conjunto es de 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.

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 G12-3 "Ciudad Obregón". Escala 1:250,000 (SGM, 2002)



FUENTE: Carta Geológico-Minera G12-B46 "Mocuzari". Escala 1:50,000 (SGM, 2008).

Figura 3. Secciones 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, 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; e intrusivas 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, IMTA, ITSON). De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales y por el modelo numérico Rathod y Rushton, se determina que los valores de transmisividad varían de  **$5.7 \times 10^{-3}$  a  $5.7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$**  y los valores de conductividad hidráulica varían de **5 a 100 m/d ( $5.8 \times 10^{-5}$  a  $1.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ )**. Los valores más altos se presentan hacia el centro y norte del distrito entre Navojoa y Huatabampo, con valores máximos en la porción nororiental, entre Navojoa y la presa derivadora Tesia. Los valores más bajos se registraron hacia los extremos oriental y occidental, al oriente de Etchojoa y Huatabampo y hacia el litoral costero.

Con respecto al valor del coeficiente de almacenamiento, muy pocas pruebas de bombeo contaron con pozo de observación. De la interpretación realizada por el modelo numérico a las 25 pruebas de bombeo ejecutadas en el estudio de 2004, se obtuvieron valores de rendimiento específico 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 2004 además de registros históricos durante el periodo 1997-2017, obtenidos por el Organismo de Cuenca Noreste, 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 3 a 50 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera y del cauce del río Mayo hacia las estribaciones de las sierras que limitan la planicie. Los niveles estáticos más someros, menores de 8 m, se registran en la porción baja de la cuenca, en la zona ubicada entre Sepobampo, Hutabampo y Jambiolobampo; incrementándose gradualmente hacia la región norte conforme se asciende topográficamente. Los más profundos de 30 a 50 m, se registran al sureste de Navojoa, entre ésta y la localidad Bacabachi (figura 4).

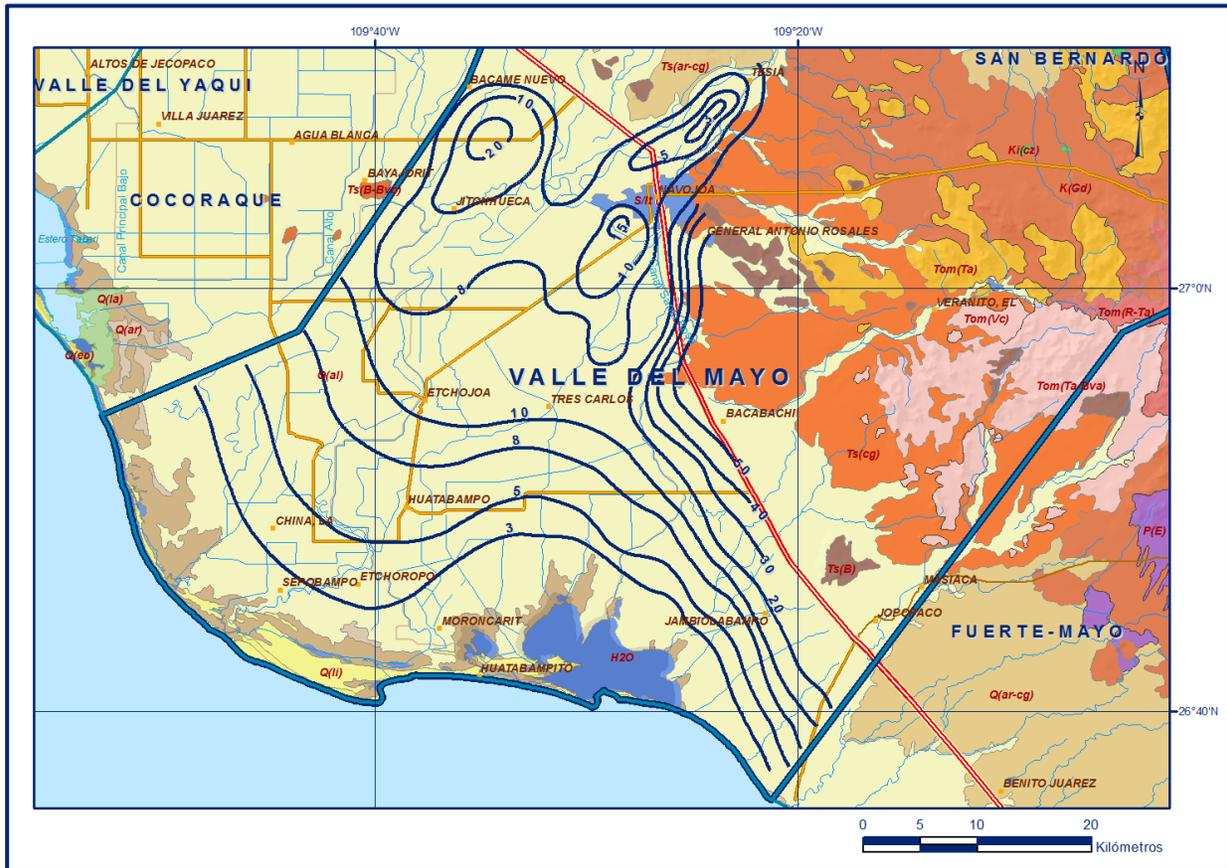


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

#### 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 60 msnm, que se incrementan de las zonas próximas de las lagunas Yavaros, Etchoropo y Moroncarit, conforme se asciende topográficamente al igual que los valores de profundidad, hacia la región central y noreste, mostrando de esta manera una dirección preferencial de flujo subterráneo noreste-suroeste, paralela a la dirección de escurrimiento superficial. Los valores más altos de carga hidráulica de presentan al sur, sureste y noreste de Navojoa; entre las localidades Tesia, General Antonio Rosales y Bacabachi (figura 5)

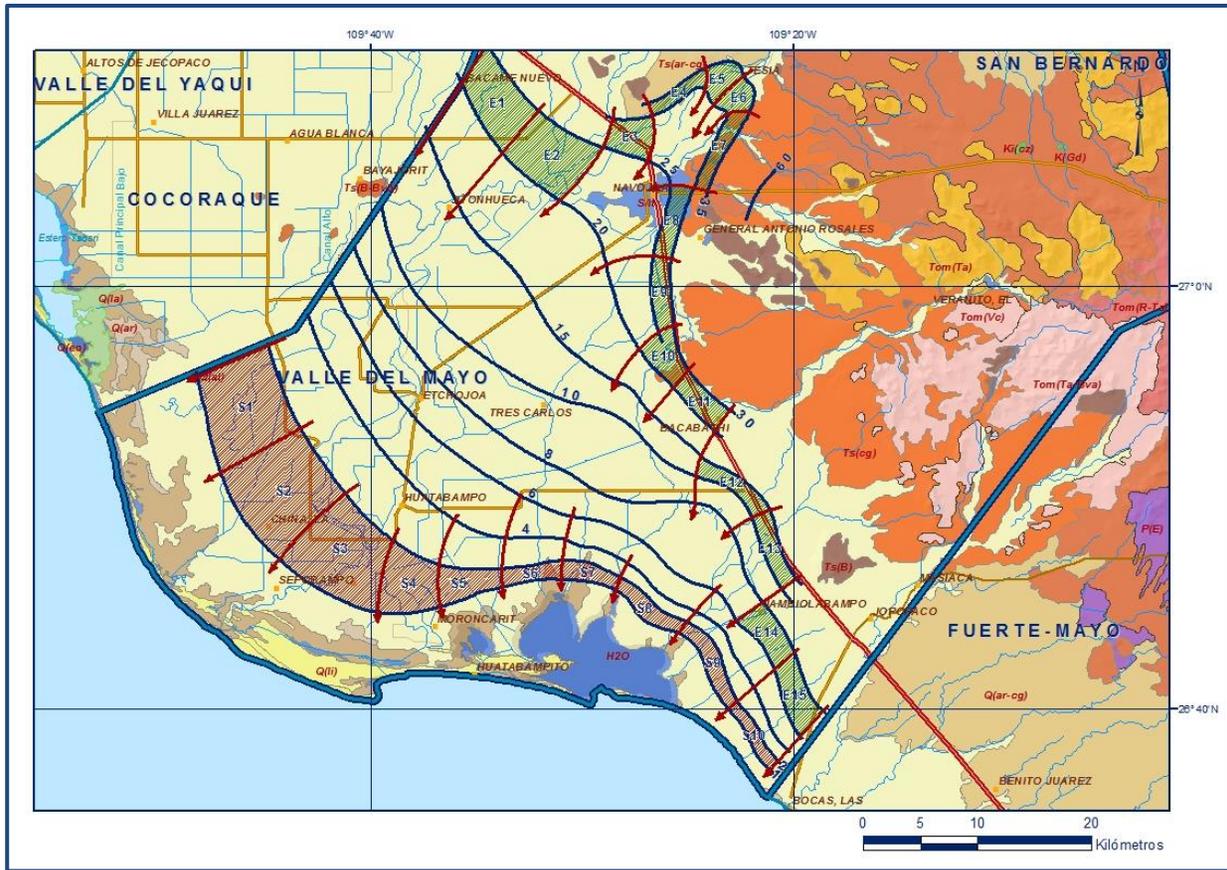


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

### 5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 registra valores de recuperación para la mayor parte de la superficie de explotación del acuífero, que varían de 1 a 4.0 m, es decir de 0.1 a 0.4 m anuales. Las recuperaciones mayores de 2 m, 0.2 m anuales, se registran en la porción norte ubicada al suroeste y noreste de Navojoa y al suroeste de Bacabachi. En la superficie restante no se registraron cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

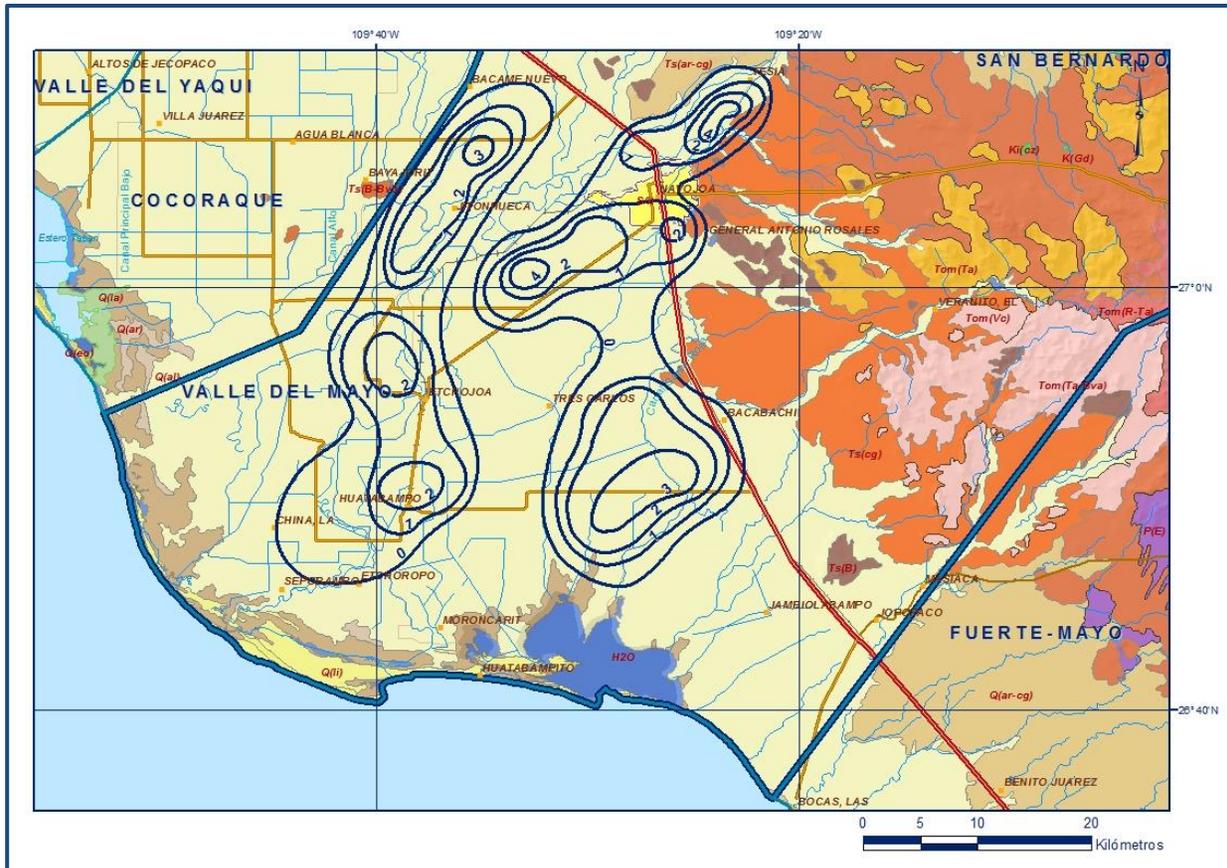


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2019)

### 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2004 se tomaron 42 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de distrito de riego, para los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos correspondientes y 25 muestras para análisis isotópicos de deuterio, tritio y oxígeno. Las determinaciones de laboratorio incluyeron dureza total, iones mayoritarios, nitritos, nitratos, elementos traza (silicio, litio, aluminio, titanio, cromo cadmio, manganeso, fierro, arsénico estroncio, entre otros), pH, Eh, sólidos totales disueltos (STD) y conductividad eléctrica.

De manera general, las concentraciones 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. De las 42 muestras colectadas, 16 de ellas presentan valores mayores al LMP de dureza total, 15 muestras para el LMP de sodio y de la concentración de STD. Con relación a los elementos menores o traza se identificaron 12 muestras que rebasan el LMP para manganeso, 15 para hierro y 5 para el arsénico. Otros elementos

como el cloruro, fluoruro y cadmio solo fueron rebasados en una muestra de agua subterránea.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 190 a 4781 mg/l., rebasando en algunos casos el LMP de 1000 ppm que establece la mencionada NOM para el agua destinada al consumo humano. Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 272 a 6810  $\mu\text{mhos/cm}$ . Los valores más bajos se registraron en una buena parte de las inmediaciones del Río Mayo, desde la presa derivadora Tesia hasta la población de Etchojoa ubicada en la región central del distrito de riego. En las inmediaciones del Río Mayo las concentraciones de STD son menores a 1000 mg/l. Los valores de temperatura varían de 26 a 38.1 °C y los de pH entre 6.5 y 9.5.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), la mayoría de las muestras analizadas se clasifican como  $C_2-S_1$  y  $C_3-S_1$ , que representan agua de salinidad media a alta y contenido bajo de sodio intercambiable, que en general no es apta para la agricultura, salvo algunos cultivos resistentes a la salinidad en suelos con buen drenaje que requieren lavados periódicos. En las zonas cercanas al río Mayo y las áreas de recarga, el agua se clasifica como de salinidad baja ( $C_1$ ) y contenido bajo de sodio intercambiable ( $S_1$ ), que es apropiada para su uso en riego sin restricciones. Con respecto a las familias del agua por ion dominante, predominan las familias bicarbonatada-mixta y mixta-mixta.

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

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2004, complementada con información 2020 del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) y volúmenes de extracción 2010-2022, proporcionada por el Organismo de Cuenca Noroeste, se registró la existencia de 1897 aprovechamientos del agua subterránea, de cuales 697 son pozos y 1200 norias; la gran mayoría de ellos activos. Del total de obras 434 se utilizan para la agricultura, 749 para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 657 para uso doméstico-abrevadero, 28 para uso industrial y 29 para otros usos.

El volumen total de extracción calculado es de **238.5 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 184.9 hm<sup>3</sup> (77.5%) son para uso agrícola y 39.1 hm<sup>3</sup> (16.4%) para uso público-urbano, 8.4 hm<sup>3</sup> (3.5%) para uso doméstico-pecuario, 4.9 hm<sup>3</sup> (2.1%) para uso industrial y 1.2 hm<sup>3</sup> (0.5%) para otros usos.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2009-2019, en una superficie de **1,739 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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)**

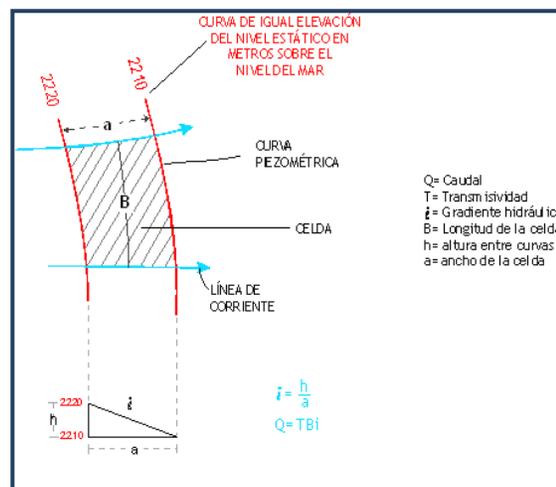
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de 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 (m<sup>3</sup>/s)
- T:** Transmisividad (m<sup>2</sup>/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 **46.6 hm<sup>3</sup>/año**.

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

| CELDA        | LONGITUD B (m) | ANCHO a (m) | $h_2-h_1$ (m) | Gradiente i | T (m <sup>2</sup> /s) | CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año) |
|--------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| E1           | 6890           | 4175        | 5             | 0.00120     | 0.010                 | 0.0825                       | 2.6                            |
| E2           | 6200           | 5180        | 5             | 0.00097     | 0.010                 | 0.0598                       | 1.9                            |
| E3           | 3725           | 3225        | 5             | 0.00155     | 0.005                 | 0.0289                       | 0.9                            |
| E4           | 5250           | 1150        | 5             | 0.00435     | 0.008                 | 0.1849                       | 5.8                            |
| E5           | 2120           | 3750        | 5             | 0.00133     | 0.025                 | 0.0707                       | 2.2                            |
| E6           | 2170           | 3200        | 5             | 0.00156     | 0.025                 | 0.0861                       | 2.7                            |
| E7           | 7325           | 1250        | 5             | 0.00400     | 0.008                 | 0.2344                       | 7.4                            |
| E8           | 6600           | 1525        | 5             | 0.00328     | 0.005                 | 0.1082                       | 3.4                            |
| E9           | 6300           | 1750        | 5             | 0.00286     | 0.005                 | 0.0900                       | 2.8                            |
| E10          | 4350           | 2685        | 10            | 0.00372     | 0.005                 | 0.0810                       | 2.6                            |
| E11          | 4900           | 2230        | 10            | 0.00448     | 0.008                 | 0.1758                       | 5.5                            |
| E12          | 6650           | 1360        | 5             | 0.00368     | 0.005                 | 0.1222                       | 3.9                            |
| E13          | 6640           | 1690        | 5             | 0.00296     | 0.005                 | 0.0982                       | 3.1                            |
| E14          | 5250           | 2400        | 2             | 0.00083     | 0.008                 | 0.0350                       | 1.1                            |
| E15          | 5900           | 2700        | 2             | 0.00074     | 0.005                 | 0.0219                       | 0.7                            |
| <b>TOTAL</b> |                |             |               |             |                       |                              | <b>46.6</b>                    |

### 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 845.9 hm<sup>3</sup> anuales durante el periodo 1995-2017, de los cuales 661.0 hm<sup>3</sup> son agua superficial proveniente de la presa Adolfo Ruíz Cortines, entregada en los puntos de medición del DR 038 y 184.9 hm<sup>3</sup> 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 efectiva de las infiltraciones por retornos de riego y en los canales de distribución. Esto se explica por el sistema de riego por gravedad, ya que 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 296.1 hm<sup>3</sup> anuales. **Ri = 296.1 hm<sup>3</sup> 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 39.1 hm<sup>3</sup> 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 **7.8 hm<sup>3</sup> 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 = 303.9 hm<sup>3</sup> 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 **238.5 hm<sup>3</sup> 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 **8.7 hm<sup>3</sup>/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 <sup>2</sup> /s) | CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s) | VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año) |
|--------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| S1           | 7990           | 6530        | 1             | 0.00015     | 0.010                 | 0.0122                       | 0.4                            |
| S2           | 7465           | 8100        | 1             | 0.00012     | 0.010                 | 0.0092                       | 0.3                            |
| S3           | 7005           | 7030        | 1             | 0.00014     | 0.020                 | 0.0199                       | 0.6                            |
| S4           | 4370           | 4690        | 1             | 0.00021     | 0.020                 | 0.0186                       | 0.6                            |
| S5           | 5050           | 2300        | 1             | 0.00043     | 0.020                 | 0.0439                       | 1.4                            |
| S6           | 4700           | 1445        | 1             | 0.00069     | 0.010                 | 0.0325                       | 1.0                            |
| S7           | 4690           | 1660        | 1             | 0.00060     | 0.010                 | 0.0283                       | 0.9                            |
| S8           | 6140           | 1515        | 1             | 0.00066     | 0.008                 | 0.0324                       | 1.0                            |
| S9           | 7715           | 1670        | 1             | 0.00060     | 0.008                 | 0.0370                       | 1.2                            |
| S10          | 6050           | 1215        | 1             | 0.00082     | 0.008                 | 0.0398                       | 1.3                            |
| <b>TOTAL</b> |                |             |               |             |                       |                              | <b>8.7</b>                     |

### 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.

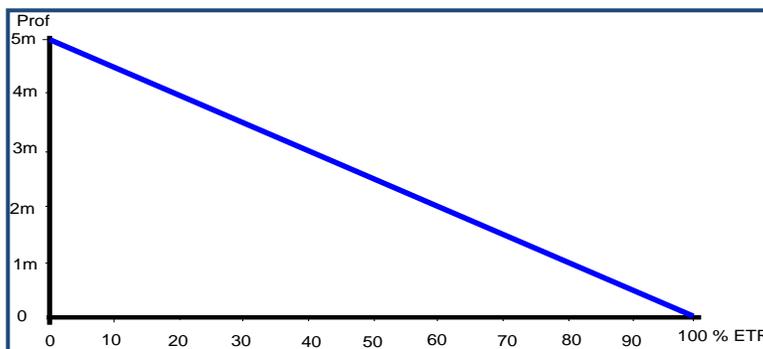
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 21.0 °C y 420 mm, representativos de la superficie del acuífero. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 418.7 mm anuales, como se muestra a continuación.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

|          |         |                  |           |
|----------|---------|------------------|-----------|
| T (°C) = | 21.0    |                  |           |
| P(mm) =  | 420.0   | P <sup>2</sup> = | 176400    |
| L =      | 1288.05 | L <sup>2</sup> = | 1659072.8 |
| ETR (mm) | 418.7   |                  |           |

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 de puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 109.1 hm<sup>3</sup>/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

| RANGOS DE PROFUNDIDAD (m) | PROFUNDIDAD MEDIA (m) | ÁREA (km <sup>2</sup> ) | LÁMINA ETR (m) | % ETR        | VOLUMEN ETR (hm <sup>3</sup> /año) |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|--------------|------------------------------------|
| 0 a 3                     | 1.5                   | 302.7                   | 0.4187         | 0.7          | 88.7                               |
| 3                         | 3                     | 3.4                     | 0.4187         | 0.4          | 0.6                                |
| 3 a 5                     | 4                     | 236.5                   | 0.4187         | 0.2          | 19.8                               |
|                           | <b>Total</b>          | <b>542.6</b>            |                | <b>Total</b> | <b>109.1</b>                       |

### 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  $S_y = 0.1$ , se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 1,739 km<sup>2</sup>, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- $\Delta VS$ :** 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 -110.0 hm<sup>3</sup>, es decir, un promedio anual de **11.0 hm<sup>3</sup>**.

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

| Evolución (m) | Evolución media (m)   | Área (km <sup>2</sup> ) | Sy           | $\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año) |
|---------------|-----------------------|-------------------------|--------------|--------------------------------------|
| 4             | 4                     | 10.8                    | 0.1          | 4.3                                  |
| 2 a 4         | 3                     | 41.3                    | 0.1          | 12.4                                 |
| 3             | 3                     | 7.6                     | 0.1          | 2.3                                  |
| 2 a 3         | 2.5                   | 113.7                   | 0.1          | 28.4                                 |
| 2             | 2                     | 36.3                    | 0.1          | 7.3                                  |
| 1 a 2         | 1.5                   | 233.6                   | 0.1          | 35.0                                 |
| 0 a 1         | 0.5                   | 405.5                   | 0.1          | 20.3                                 |
|               | <b>TOTAL</b>          | <b>848.8</b>            | <b>TOTAL</b> | <b>110.0</b>                         |
|               | <b>Promedio anual</b> |                         |              | <b>11.0</b>                          |

### Solución de la ecuación de balance

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

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

$$R_v = 238.5 + 8.7 + 109.1 + 11.0 - 46.6 - 303.9$$

$$R_v = 16.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 16.8 + 46.6 + 303.9$$

$$R = 367.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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:

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

Donde:

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

**R** = Recarga total media anual

**DNC** = Descarga natural comprometida

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

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

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **367.3 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 63.4 hm<sup>3</sup> son recarga natural y 303.9 hm<sup>3</sup> recarga incidental.

### 8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Valle del Mayo la descarga natural comprometida es 63.2 hm<sup>3</sup> anuales de los cuales 8.7 hm<sup>3</sup> corresponden a la salida por flujo subterráneo hacia el mar que debe conservarse para mantener la posición de la interface marina, y 54.5 hm<sup>3</sup> al 50% de la evapotranspiración que se compromete para protección del ecosistema ribereño y de los sitios RAMSAR. Por lo tanto, **DNC = 63.2hm<sup>3</sup> anuales.**

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

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

volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **281,942,683 m<sup>3</sup> 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 367.3 - 63.2 - 281.942683 \\ \text{DMA} &= 22.157317 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe volumen disponible de **22,157,317 m<sup>3</sup>** para otorgar nuevas concesiones

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 1999. Balance de aguas subterráneas, Valle del Mayo, período 1996-1997 y 1997-1998. Realizado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

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. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle del Mayo, estado de Sonora.

Comisión Nacional del Agua, 2004. Actualización del Estudio Geohidrológico del Valle del Mayo, Sonora. Realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

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

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1970. Estudio geohidrológico de los acuíferos en el Valle del Mayo. Realizado por PLANIMEX, Ingenieros Consultores, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 2000 Carta Geológica-Minera G12-6Huatabampo. Escala 1:250,000

Servicio Geológico Mexicano, 2008 Carta Geológica-Minera G12-B46Mocuzari. Escala 1:50,000