



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO FUERTE MAYO (2644), ESTADO DE
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	9
4.2 Geología estructural	10
4.3 Geología del subsuelo.....	11
5. HIDROGEOLOGÍA.....	11
5.1 Tipo de acuífero.....	11
5.2 Parámetros hidráulicos	11
5.3 Piezometría.....	12
5.4 Comportamiento hidráulico.....	12
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	12
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	13
5.4.3 Evolución del nivel estático	13
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	16
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	17
7.1.3 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	18
7.2 Salidas	19
7.2.1 Bombeo (B).....	19
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	20
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	21
8. DISPONIBILIDAD	22
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	23
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	23
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	24
9. BIBLIOGRAFÍA	25

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 Fuerte Mayo, definido con la clave 2644 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza al suroeste del estado de Sonora, entre las coordenadas geográficas 108° 50' y 109° 21' de longitud oeste, y 26° 17' y 27° de latitud norte cubriendo una superficie de 1,928 km².

Limita al norte y este con el acuífero Valle del Mayo, al noreste con el acuífero Cuchujaqui, al sur-suroeste con el Golfo de California y al sur-sureste con los acuíferos Río Fuerte y El Carrizo que pertenecen al estado de Sinaloa. (Figura 1).

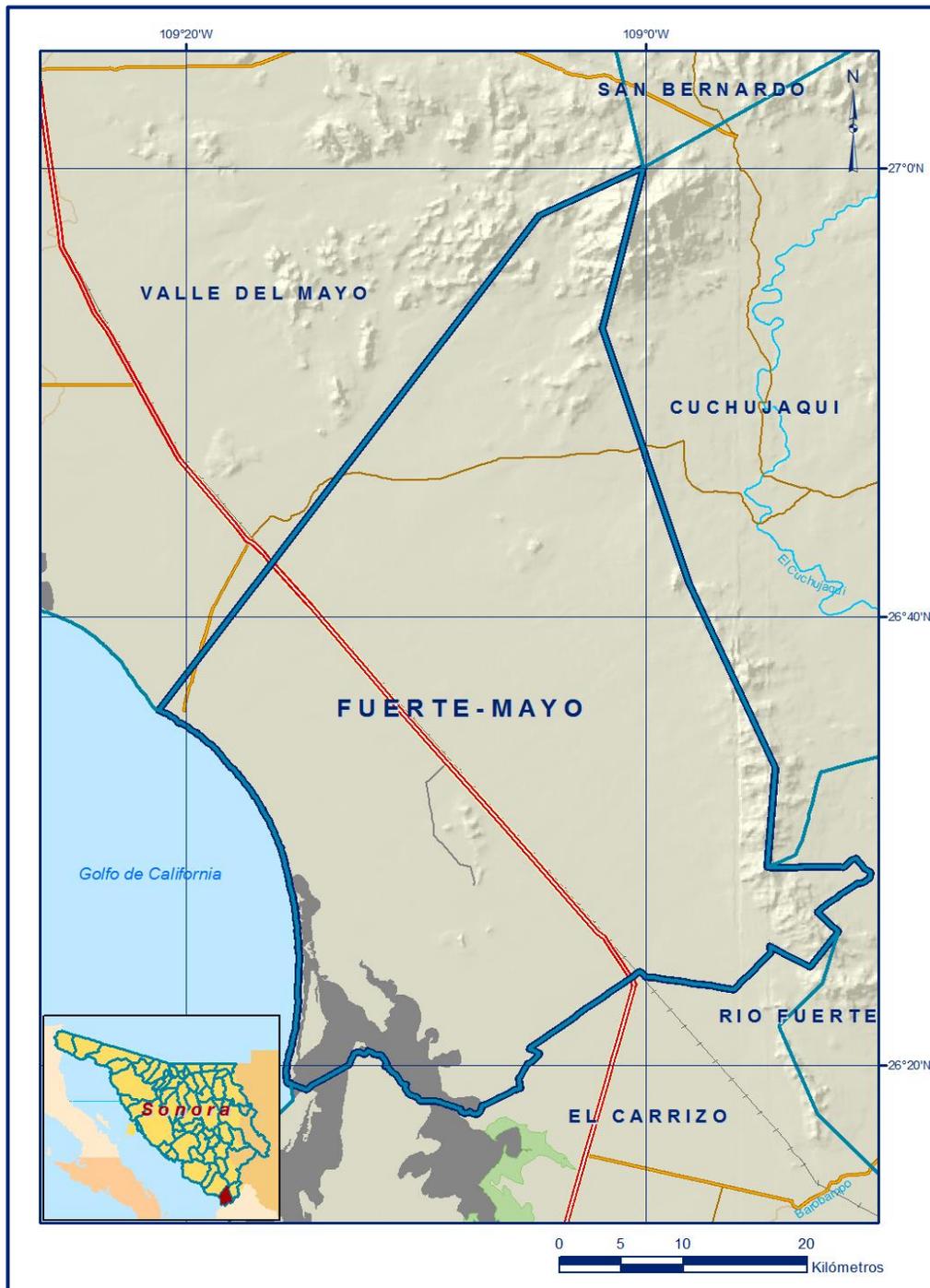


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios de Navojoa, Huatabampo y Álamos. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2644 FUERTE-MAYO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	108	54	42.4	26	28	49.0	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	108	51	35.0	26	25	56.7	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	109	15	27.9	26	19	8.6	DEL 3 AL 4 POR LA LINEA DE BAJA MAR A LO LARGO DE LA COSTA
4	109	21	13.8	26	35	48.9	
5	109	4	38.5	26	57	54.3	
6	109	0	6.2	27	0	2.1	
7	109	1	52.0	26	52	51.9	
8	108	58	6.8	26	41	30.6	
9	108	54	21.6	26	33	15.1	
1	108	54	42.4	26	28	49.0	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Fuerte Mayo pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y al Consejo de Cuenca Alto Noroeste.

En el territorio que cubre el acuífero están en vigor dos decretos de veda. El primero rige en la porción sur y “establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que el mismo delimita en el Estado de Sonora”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de Agosto de 1956. Este decreto es tipo III que permite extracciones para usos prioritarios.

Una pequeña porción al norte de su superficie está cubierto por el decreto de veda “Decreto por el que se amplía la zona vedada del Distrito de Riego del Río Mayo, Sonora, para el alumbramiento de *aguas del subsuelo*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 21 de Febrero de 1956. Este decreto es tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El principal usuario es el público-urbano. En el acuífero se localiza la unidad de riego “Fuerte-Mayo” que utiliza agua de la presa Luis Donald Colosio (“Huites”). No se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Se han realizado algunos estudios que contienen información piezométrica y caracterización del acuífero Fuerte-Mayo. A continuación se describe su contenido:

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, 1999. PIEZOMETRÍA Y CENSO DE APROVECHAMIENTOS EN LA ZONA FUETE-MAYO, ESTADO DE SONORA. INFORME TÉCNICO NO. GAS/99/07. Contiene información piezométrica y datos de conductividad eléctrica y calidad del agua, recabados durante el censo de aprovechamientos realizado en el año 1999.

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

El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración del Organismo de Cuenca Noroeste, que incluye la totalidad del Estado de Sonora y parte del Estado de Chihuahua.

Además de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de profundidad y elevación que indican la dirección preferencial del flujo subterráneo). Representa un estudio de consulta general de los acuíferos.

“ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y PIEZOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS DE LA REGIÓN NOROESTE”. Realizado por la Universidad de Sonora, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2006. Contiene información general de las concentraciones de iones mayores presentes en el agua subterránea y de parámetros físicos como conductividad eléctrica, pH y temperatura; con sus respectivos planos de isodistribuciones.

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

El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas del acuífero mediante el diagnóstico de la evolución de los niveles del agua, contar con información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como determinar la calidad del agua a partir de parámetros fisicoquímicos medidos en campo y en laboratorio.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo, hidrometría, piezometría, nivelación de brocales de pozos, toma de muestras para análisis físicoquímicos, ejecución de sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Propone sitios adecuados para la perforación de pozos.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

En el estado de Sonora están representadas cuatro Provincias Fisiográficas (INEGI, 1981) siguientes: Llanura Sonorense, Sierra Madre Occidental, Llanura Costera del Pacífico y Sierras y Llanuras del Norte; las dos primeras son las de mayor cobertura en la entidad.

La región del acuífero Fuerte Mayo se ubica dentro de la Subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa que se caracteriza por estar integrada por los deltas que forman los ríos Yaqui, Mayo y Fuerte. Todo su territorio se encuentra casi a nivel del mar y la mayoría de su superficie está cubierta por material aluvial. La línea costera es sinuosa y contiene un buen número de esteros y bahías.

3.2 Clima

En la zona predomina un clima que varía del seco muy cálido, en la región costera, al seco cálido que cubre la mayor parte de la región; donde la temperatura media anual es 22 °C. En la porción norte del acuífero se presenta un clima semiseco-semicálido con lluvias en verano, con un porcentaje de lluvia invernal que oscila entre 5 y 10.2. Hacia la parte oriental del área el clima es seco-semicálido con invierno fresco, donde las temperaturas medias anuales comprenden un rango de 18° a 22 °C.

Se analizó la información de 6 estaciones climatológicas, Arroyo Hondo, Barebampo, El Veranito, Estación Don, Minas Nuevas Mumuncuera, todas ellas administradas por la Comisión Nacional del Agua. De ellas, sólo la Estación Don se encuentra dentro del área de estudio, las otras cinco están fuera del acuífero, a una distancia máxima de 30 km.

Las estaciones registran una temperatura media superior a los 20 °C; la media para toda el área es de 23.4 °C. La distribución de las isotermas en el acuífero muestra que las temperaturas medias anuales aumentan hacia la zona costera, hasta alcanzar 24.5 °C.

Las lluvias se presentan en invierno y verano, similar a la mayor parte de la región noroeste del país. En invierno la precipitación es frontal, debido a las masas de aire polar que colisionan las masas de aire semi-tropical existente.

En verano el tipo de lluvia es una conjugación de tipo orográfico y por convección, debido a su posición fisiográfica, así la lluvia es de carácter chubasco, de gran intensidad y corta duración.

Con base en el análisis climatológico se obtuvo una precipitación anual mínima de 258.0 mm en la estación Mununcuera y una máxima de 751.7 mm en Minas Nuevas. Basándose en la información de las estaciones, es posible observar que en las estaciones que se encuentran hacia la mitad este del área, la precipitación media anual es mayor de 504.9 mm.

3.3 Hidrografía

El acuífero se ubica dentro en la Región Hidrológica 10, Sinaloa (RH-10) dentro de la cuenca Estero de Bacorehuis.

No existe una corriente superficial notable dentro del acuífero. Sus límites están definidos al este y noreste con el parteaguas del arroyo Cuchujaquí, al oeste y suroeste con el Golfo de California y al Sur y sureste con el parteaguas de la cuenca del Río Fuerte.

El acuífero tiene una concesión de agua superficial procedente de la presa Miguel Hidalgo, por un volumen de 188.8 hm³, que son servidos por medio de un canal desde la presa.

3.4 Geomorfología

En el área que cubre el acuífero y sus inmediaciones existen dos unidades geomorfológicas muy importantes: la zona de montaña perteneciente a la Sierra Madre Occidental, localizada al norte y oriente del área y la zona de planicie costera.

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 edificadas con materiales piroclásticos y lavas de composición silícica principalmente, con intercalaciones de material clástico; 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.

Por su parte la planicie costera corresponde a la planicie aluvial, compuesta por acumulaciones de material detrítico no consolidado del Terciario Superior y Reciente, interrumpida por antiguas islas, en forma de cerros y pequeñas serranías, constituidas por rocas metamórficas e ígneas. En la franja costera hay 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 y flechas.

4. GEOLOGÍA

Aunque la columna estratigráfica incluye una gran variedad de rocas y sedimentos, en la zona de estudio los afloramientos en su mayoría consisten de asociaciones de arenas y conglomerados así como de sedimentos aluviales, todos del Cuaternario.

Hacia las zonas costeras se presentan arenas y suelos de litoral especialmente en Las Bocas-Camahuiroa y al sur de Agiabampo (Esteros de Bamocha y Agiabampo).

En la parte centro-sur de la zona de estudio se levantan los únicos cerros del lugar: Tasirogojo-El Jarro y El Jejeri (4 km al SE de Melchor Ocampo) y El Tlacuache-Nudito (10 km al E de Venustiano Carranza), constituidos por rocas metamórficas precámbricas. Desde el punto de vista geohidrológico, la presencia de estas rocas implica el afloramiento del basamento, constituyendo barreras locales impermeables al flujo general de las aguas subterráneas hacia el Mar de Cortés.

Las demás rocas y sedimentos de la columna estratigráfica afloran al NE y E fuera de la zona de estudio, en especial se tiene la presencia de rocas granodioríticas cretácicas encajonadas en el complejo metamórfico Precámbrico. Estas rocas afloran formando una estructura de orientación N-S y NNW-SSE y constituyen una barrera franca para los escurrimientos provenientes de los Ríos Cuchujaqui (presa Josefa Ortíz de Domínguez) y Fuerte (Presa Miguel Hidalgo). Como ambos ríos drenan hacia el S y SSW (Sinaloa), su contribución a la recarga a los acuíferos de la zona de estudio es nula (figura 2).

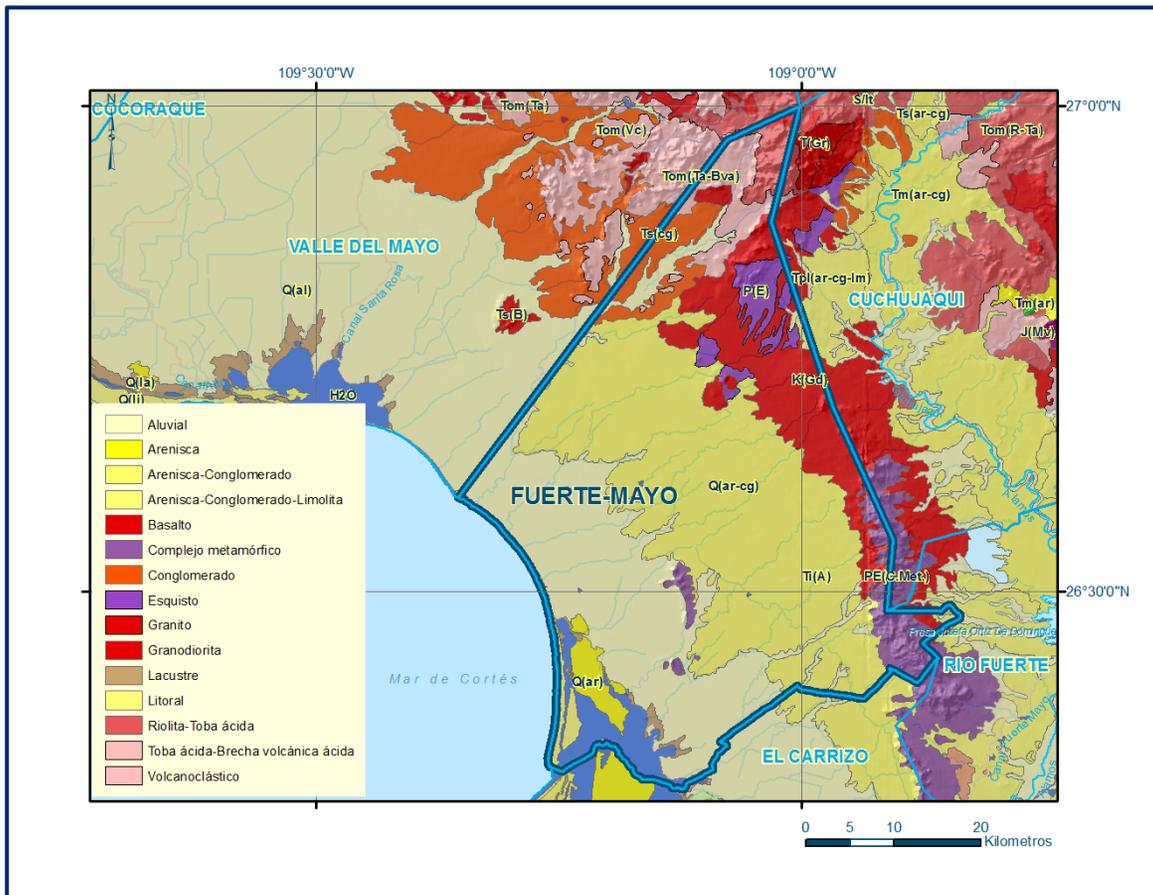


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

PRECÁMBRICO

Alrededor del área de estudio afloran rocas precámbricas metamórficas constituidas principalmente por esquistos micáceos, filitas, anfibolitas, cuarcitas, mármol y gneis. Estas rocas presentan una textura esquistosa lepidoblástica con muscovita, cuarzo, sillimanita, clorita, epidota, zircón, pirita y hematita, representando un metamorfismo regional de facies de esquistos verdes.

El Precámbrico Medio está representado por un complejo metamórfico, compuesto principalmente de gneis milonítico y augen-gneis milonítico. Los afloramientos principales tienen una orientación norte-sur y se encuentran al noreste y sureste de la localidad Venustiano Carranza.

PALEOZOICO

Las rocas que representan al paleozoico en esta área son de origen metamórfico, principalmente esquistos que se encuentran aflorando en la parte noreste del acuífero y se encuentran en contacto con rocas ígneas mesozoicas. Los esquistos se localizan al sureste de Navojoa.

MESOZOICO

Las rocas mesozoicas están representadas por granodioritas que se encuentran aflorando en la porción este del acuífero, con una orientación noroeste – sureste.

CENOZOICO

El Cenozoico está representado en el área por areniscas que afloran al suroeste del área, en la zona costera. También existen conglomerados que afloran al sureste de Navojoa. Con una orientación noroeste – sureste, en la porción media del acuífero, aflora una gran secuencia de areniscas, conglomerado y limolitas. Al noreste, en pequeños afloramientos, se presentan derrames basálticos y andesíticos.

TERCIARIO

Al suroeste de Navojoa se encuentran aflorando asociaciones de riolita- toba ácida de edad Terciaria, así como asociaciones de toba ácida-brecha volcánica ácida al oeste de la primera de edad Oligoceno-Mioceno.

CUATERNARIO

Los depósitos aluviales ocupan una mayor área en el acuífero. Los depósitos lacustres y litorales se localizan a lo largo de la línea de costa.

4.2 Geología estructural

El área de estudio está afectada por fallamiento inverso en la porción sureste, representado por la cabalgadura de las rocas paleozoicas sobre las jurásicas, posiblemente provocado por esfuerzos compresionales durante la Orogenia Laramide.

Posteriormente la región fue afectada por un patrón de fallas normales de rumbo NW-SE generando una serie de fosas y pilares tectónicos de forma escalonada con desplazamientos laterales. El último patrón estructural con dirección NE-SW provoca desplazamientos de bloques unos con respecto a otros e interrupción de estructuras.

4.3 Geología del subsuelo

Como parte del estudio realizado en el 2007, se ejecutaron 15 sondeos electromagnéticos (TEM's) distribuidos en el acuífero, hasta una profundidad de investigación de 200 m. Con esta información, los cortes litológicos de pozos y la geología del acuífero, es posible definir que el acuífero regional está constituido por materiales aluviales de naturaleza conglomerática, gravas, arenas, limos y arcillas; en general de baja permeabilidad y semiconsolidados cuyo espesor real se desconoce, pero por las obras para su aprovechamiento se le asigna al menos 200 m. Se encuentran depositados sobre rocas de origen ígneo y metamórfico que funcionan como barreras laterales al flujo subterráneo hacia las porciones sur y oriental, en tanto que al occidente se presentan descargas hacia el Golfo de California.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo al estudio de las características hidrogeológicas de área se concluye que el acuífero es de tipo libre heterogéneo y anisotrópico, constituido por depósitos aluviales de granulometría variada, desde clastos a arcilla, cuyo espesor real se desconoce, pero que por la profundidad de las obras captación se le asigna un valor mínimo de 200 m.

5.2 Parámetros hidráulicos

De las pruebas de bombeo realizadas en estudios previos se observa que los valores de transmisividad varían de 0.018 a $2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, congruente con el tipo de depósitos de origen aluvial, con ligeras variaciones debido a las condiciones locales de permeabilidad y espesor.

En el acuífero vecino al norte, Valle del Mayo, se realizaron en el año 2004, 25 pruebas de bombeo de corta duración que se interpretaron por métodos analíticos convencionales (Neuman) y como método alternativo, la aplicación de un modelo numérico de flujo radial de dos capas. Debido a que las condiciones geológicas de ambos acuíferos son similares, podemos adoptar por correlación hidrogeológica, los valores de los parámetros hidráulicos.

De esta manera, los valores de transmisividad varían de 0.7 a $46.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, en tanto que para la conductividad hidráulica oscilan entre 2.07 y 40.1 m/día.

5.3 Piezometría

Se cuenta con información piezométrica para el periodo 1999-2008, que cubre la mayor parte del acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de la profundidad al nivel estático para 1999 (figura 3) muestra que los valores aumentan de la costa hacia el este, desde valores menores a los 10 m hasta 60 m, conforme se asciende topográficamente. Los valores más altos se registran al oeste del poblado 10 de Abril. Para el 2008 se mantiene la misma tendencia, con los valores más someros en la franja costera hasta los 50 m que se registran en la porción oriental del acuífero (figura 3).

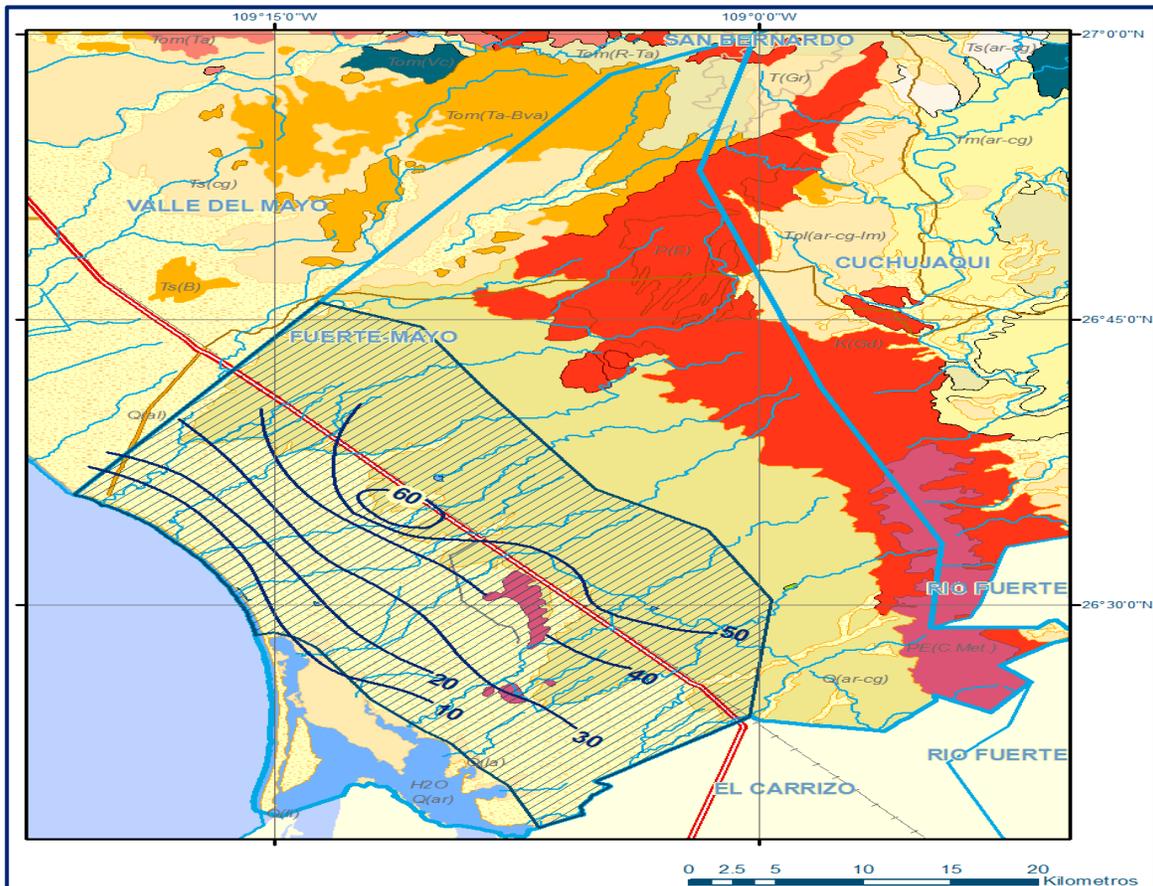


Figura 3. Profundidad al Nivel Estático en m, 1999

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático para el año 2009 (figura 4), se observa que sus valores muestran claramente el reflejo de la topografía, evidenciando de esta manera que no se han producido alteraciones de las condiciones naturales. El flujo subterráneo tiene una dirección preferencial noreste – suroeste, desde las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero hacia la zona costera, en sentido paralelo a la al escurrimiento de los arroyos. Los valores registrados varían de 1 a 60 m.s.n.m.

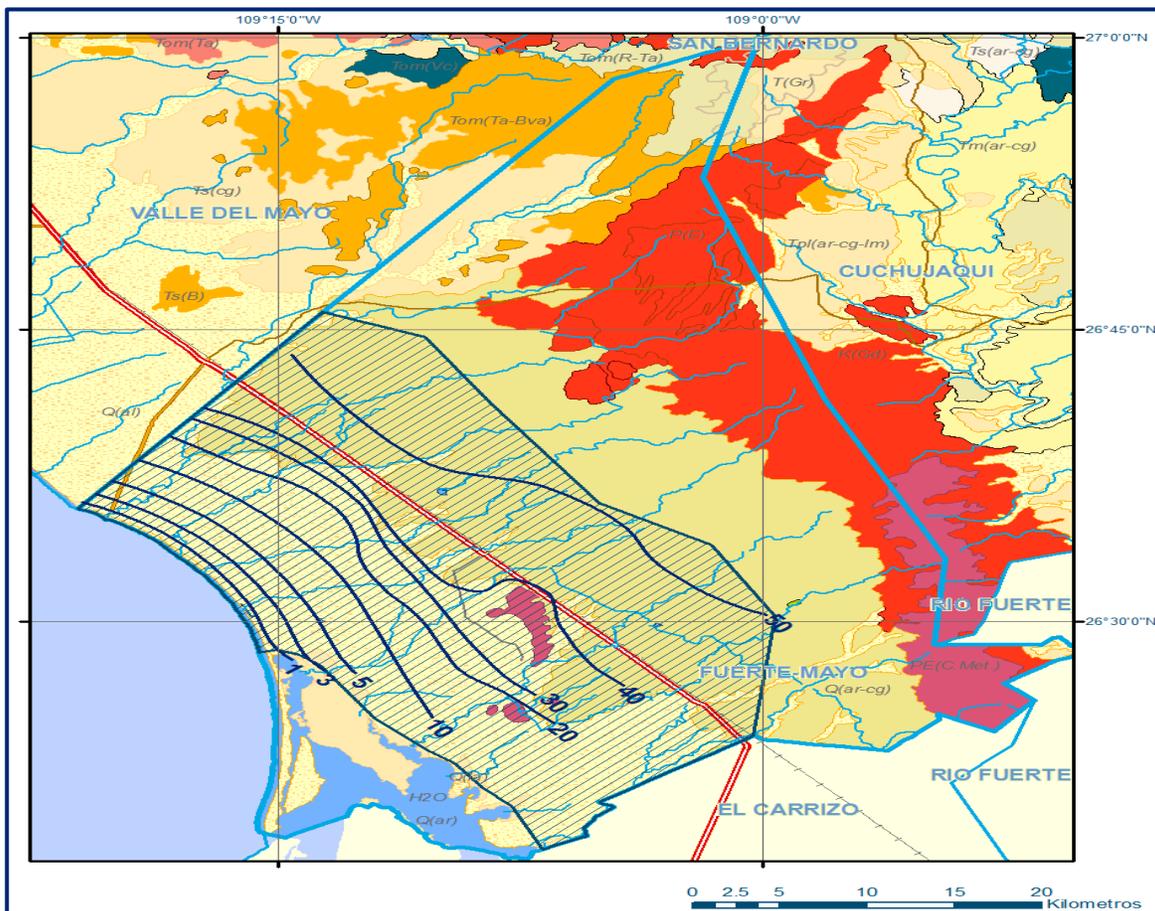


Figura 4. Profundidad al Nivel Estático en m, 2008

5.4.3 Evolución del nivel estático

La posición de los niveles del agua subterránea se ha mantenido sin cambios significativos en la mayor parte del acuífero, salvo en la zona comprendida entre las localidades Benito Juárez, Guadalupe Victoria y Jeobampo, donde se han registrado recuperaciones.

La configuración de la evolución del nivel estático, para el período de 1999 al 2008 (figura 5), muestra una zona importante de recuperación que se localiza en el centro del acuífero, de 3 hasta 15 m, que representan un ascenso de los niveles del agua subterránea de 0.3 a 1.7 m anuales (figura 6). Para la superficie restante del acuífero, no se registran alteraciones importantes en la posición del nivel estático.

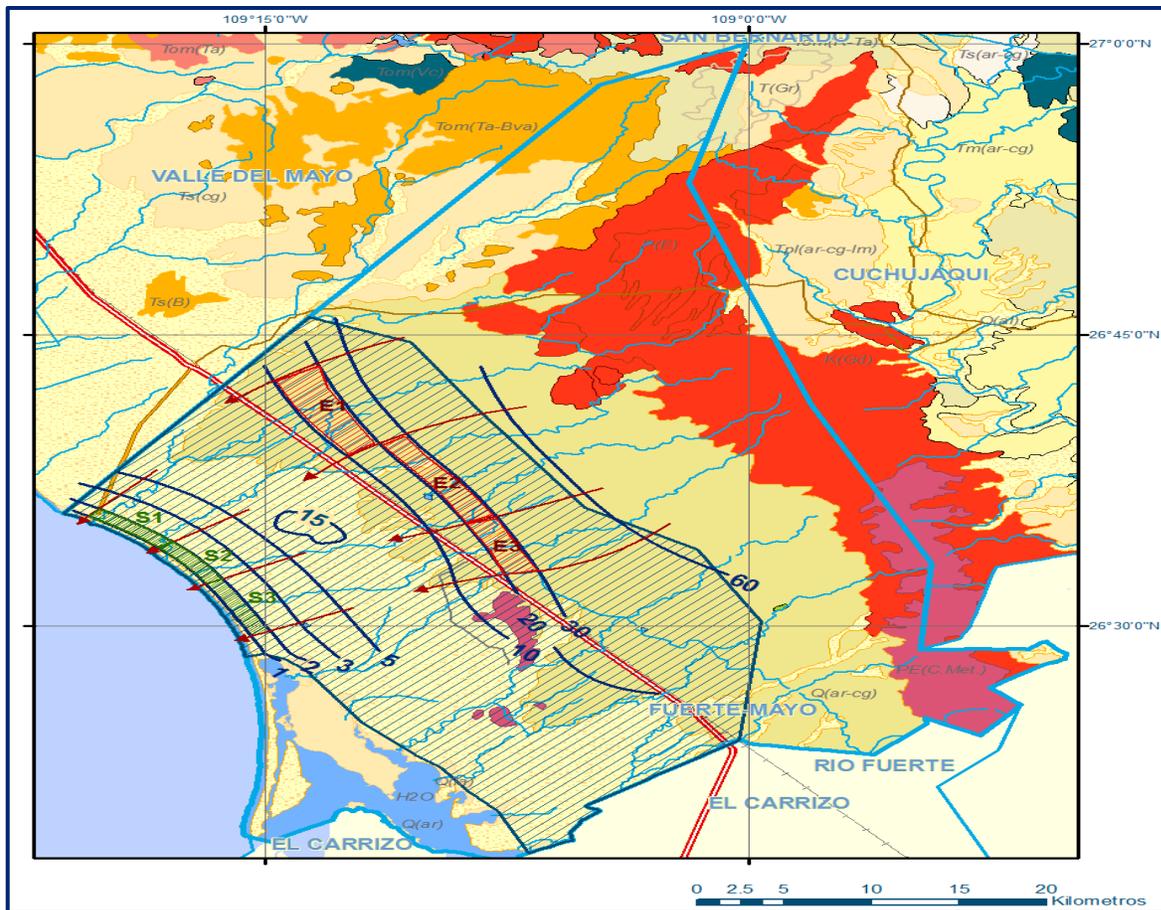


Figura 5. Elevación del Nivel Estático en msnm (2008)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2007, se tomaron muestras de agua algunos aprovechamientos, para su análisis físicoquímicos correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos. Esta información se complementó con la base de datos de las muestras químicas de la Carta de Aguas Subterráneas G1206 Serie II (Huatabampo) Edición II, a escala 1:25000 editada por INEGI de la Dirección Regional Noroeste, en el año 2007.

Por medio de los sondeos geofísicos realizados en la zona y con el apoyo de cortes litológicos de algunos pozos, se han identificado tres grupos principales de agua: el primero corresponde a agua de buena calidad con concentraciones bajas de sales al que corresponde la mayor parte de la planicie; el segundo grupo es de aguas freáticas superficiales que contienen concentraciones ligeramente altas y se localizan al noroeste de la zona. El tercer grupo corresponde a aguas salobres locales, atrapadas entre los sedimentos de origen marino. En general, las concentraciones varían de 200 a 1300 ppm de STD. Las zonas con mejor calidad del agua se localizan al sureste de la localidad de San José de Masiaca y en la porción oriental de la región.

La baja concentración de sales en la parte central de la planicie, así como la presencia de sodio y bicarbonatos como iones predominantes, típicos de acuíferos arcillosos, indica que el agua es de reciente infiltración. La concentración de sales se incrementa de noreste a suroeste, mostrando la trayectoria preferencial del flujo subterráneo.

Con respecto a la temperatura, se presentan valores que varían de 26.6 a 30.2 °C. Las temperaturas más altas se registran en la porción este del acuífero, en las inmediaciones del ejido Tierra Colorada.

Para la caracterización de familias de agua se utilizaron los diagramas de Piper, los cuales se basan en la clasificación por balance de masas que permiten zonificar la presencia de diferentes tipos de familias hidrogeoquímicas. De acuerdo con esto, predomina la familia sódica- bicarbonatada. En los aprovechamientos ubicados en la franja costera predomina la familia sódico-clorurada; puntualmente se registran altas concentraciones de sulfatos que pueden estar asociados a la presencia de horizontes evaporíticos de yesos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en el 2007, existen en el acuífero un total de 117 de aprovechamientos del agua subterránea, la mayoría de ellos norias que satisfacen las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Del total de obras, 76 son norias, 16 son pozos someros y 25 son pozos profundos.

El volumen de extracción conjunta asciende a **4.5 hm³ anuales**, de los cuales 2.0 (44.5%) se utilizan en la agricultura, 1.0 más (22.2%) para el abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, y los 1.5 hm³ (33.3 %) para uso doméstico-abrevadero.

El 91% de los aprovechamientos cuenta con una extracción de agua menor a 10 lps, siendo éste el gasto predominante del acuífero. El 9% restante representan gastos de 11 a 100 lps. El diámetro de descarga predominante es menor de 4" representado por el 88 % de la totalidad de los aprovechamientos, el 12% restante para descargas de 4 a 6".

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido (1999-2008). El balance se definió en una superficie de 900 km²

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

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos del arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v), y por flujo subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i).

Debido a que la extracción para uso agrícola incipiente y que no existen poblaciones importantes, se considera que no existe recarga inducida por el agua subterránea, pero sí de la que procede de la presa "Huites".

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Este término es uno de los que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

R_v : Recarga Vertical

E_h : Entradas subterráneas por flujo horizontal

B : Bombeo

S_h : Salidas subterráneas por flujo horizontal

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + S_h \pm \Delta V(S) - E_h \quad (2)$$

7.1.2. Recarga Inducida (R_i)

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

La Unidad de Riego "Fuerte-Mayo" tiene un título de concesión por un volumen de 150 hm³ anuales. Actualmente la primera etapa del proyecto considera 75 hm³ anuales, procedentes de la presa Luis Donald Colosio ("Huites"). Considerando la baja permeabilidad de suelo de la región, las prácticas de riego y la profundidad al nivel estático mayor a 30 m en la zona agrícola, se estima que un 10% de retorno al acuífero. Esto equivale a **7.5 hm³ anuales**.

7.1.3 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 piedemonte, 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.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2007 (figura 4). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

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

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

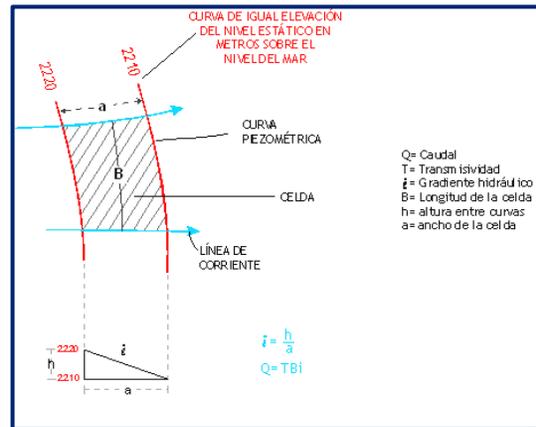
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

T = Transmisividad en m² /s.

B = Longitud de la celda en m.

i = Gradiente Hidráulico, en m.



El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2008 se presenta en la tabla 2, en la que se observa que su valor total es de **5.7 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	9200	2600	10	0.0038	0.001	0.0354	1.1
E2	8200	1650	10	0.0061	0.0015	0.0745	2.3
E3	6550	1300	10	0.0077	0.0015	0.0756	2.4
Total de entradas							5.7

Los Valores de T fueron obtenidos de estudios anteriores y extrapolados para el espesor saturado en cada sitio. Los valores son consistentes con los obtenidos en los acuíferos vecinos Cuchujaqui y Valle del Mayo. Para el año 1999 no se contaba con la nivelación de los brocales de pozos, por lo que no fue posible trazar la configuración de elevación.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh) y por evapotranspiración (ETR). No existen manantiales ni descarga de flujo base.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **4.5 hm³/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas subterráneas se realizó de la misma manera que las entradas subterráneas, utilizando el plano de elevación del nivel estático (figura 6) y aplicando la Ley de Darcy para las celdas de flujo identificadas.

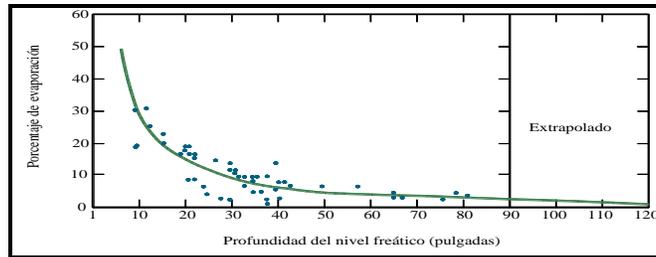


Figura 6. Evaporación del agua freática en función de la profundidad al nivel estático

El detalle del cálculo de la celda se muestra en la tabla 3, donde el resultado indica que el volumen total de salidas subterráneas asciende a **0.5 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	5560	1150	1	0.0009	0.001	0.0048	0.2
S2	3930	950	1	0.0011	0.001	0.0041	0.1
S3	5560	980	1	0.0010	0.001	0.0057	0.2
Total de entradas							0.5

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la ausencia de cobertura vegetal.

Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos < 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith (1973), en este sentido, para una profundidad al NE de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%.

Su valor se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE <a 2 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas (2000 mm).

El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se presenta a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático.

Considerando una superficie de 36.8 km² de la porción costera del acuífero donde la profundidad al nivel estático es menor a los 2 m y un 2% de la evaporación potencial, se tiene que la evaporación es del orden de los **1.5 hm³ anuales** (tabla 4).

Tabla 4. Cálculo de la evaporación

Evaporación potencial media anual (m)	Área (km ²)	% de la Evaporación Potencial	Volumen Evaporación (hm ³ /año)
2	36.9	0.02	1.5

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

Para la determinación de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero 1999-2008 mostrada en la tabla No. 5. Con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático, y considerando un coeficiente de almacenamiento $S = 0.11$ (tabla 6), se determinó la variación del almacenamiento con la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$ = 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

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento

Curva de evolución	Área de influencia	Volumen hm ³	Sy	$\Delta V Sy$ (hm ³)
15	15	4.9	0.11	8.1
15 a 10	13	18.4	0.11	25.3
10 a 5	8	40.5	0.11	33.4
5 a 3	4	96.4	0.11	42.4
Total				109.2
Promedio anual				12.1

El valor del coeficiente rendimiento específico fue obtenido del promedio de 25 pruebas de bombeo realizadas en el acuífero vecino Valle del Mayo (como parte del estudio hidrogeológico realizado por el IMTA para la CONAGUA en el 2004), interpretadas por el método de flujo radial de dos capas de Rathod y Rushton (1991). El cambio de almacenamiento en el acuífero Fuerte-Mayo es **12.1 hm³** anuales.

Solución de la ecuación de balance

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

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

Sustituyendo valores:

$$Rv = 0.5 + 4.5 + 1.5 + 12.1 - 5.7 - 7.5$$

$$Rv = 5.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a

$$R = Rv + Eh + Ri$$

$$R = 5.4 + 5.7 + 7.5$$

$$R = 18.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero. Para el caso del acuífero Fuerte-Mayo su valor es de **18.6 hm³**, de los cuales 11.1 hm³ son recarga natural y los 7.5 hm³ restantes recarga inducida.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para este caso se considera una descarga natural comprometida de **2.0 hm³ anuales**, de los cuales 0.5 hm³ corresponden a la salida subterránea para mantener la posición de la interfase marina y los 1.5 hm³ restantes a la evapotranspiración para proteger el ecosistema costero.

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 **10,556,200 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 de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 18.6 - 2.0 - 10.556200 \\ \text{DMA} &= 6.043800 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **6,043,800 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

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