



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO PETATLÁN (1219), ESTADO DE
GUERRERO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. GENERALIDADES..... | 2 |
| Antecedentes..... | 2 |
| 1.1 Localización..... | 2 |
| 1.2 Situación administrativa del acuífero..... | 4 |
| 2. ESTUDIOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD..... | 5 |
| 3. FISIOGRAFIA..... | 6 |
| 3.1 Provincia fisiográfica..... | 6 |
| 3.2 Clima..... | 7 |
| 3.3 Hidrología superficial..... | 7 |
| 3.4 Geomorfología..... | 7 |
| 4. GEOLOGÍA..... | 8 |
| 4.1 Estratigrafía..... | 9 |
| 4.2 Geología del subsuelo..... | 14 |
| 5. HIDROGEOLOGIA..... | 15 |
| 5.1 Tipo de acuífero..... | 15 |
| 5.2 Parámetros hidráulicos..... | 16 |
| 5.3 Piezometría..... | 16 |
| 5.4 Comportamiento hidráulico..... | 16 |
| 5.4.1 Profundidad al nivel estático..... | 16 |
| 5.4.2 Elevación del nivel estático..... | 17 |
| 5.4.3 Evolución del nivel estático..... | 18 |
| 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea..... | 19 |
| 6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA..... | 19 |
| 7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS..... | 20 |
| 7.1 Entradas..... | 20 |
| 7.1.1 Recarga vertical (Rv)..... | 20 |
| 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)..... | 21 |
| 7.1.3 Recarga inducida (Ri)..... | 22 |
| 7.2 Salidas..... | 23 |
| 7.2.1 Evapotranspiración (ETR)..... | 23 |
| 7.2.2 Bombeo (B)..... | 25 |
| 7.2.3 Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh)..... | 25 |
| 7.2.4 Descargas naturales (Dn)..... | 25 |
| 7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ | 26 |
| 8. DISPONIBILIDAD..... | 26 |
| 8.1 Recarga total (R)..... | 27 |
| 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)..... | 27 |
| 8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)..... | 27 |
| 8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)..... | 27 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA..... | 29 |

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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 Petatlán, definido con la clave 1219 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción occidental del Estado de Guerrero, entre los paralelos 17°23' a 17°48' de latitud norte y los meridianos 100°57' a 101°19' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 693 km². Colinda dentro del estado con los acuíferos Paso de Arena al norte, Coyuquilla al este, San Jeronimito al oeste y al sur con el Océano Pacífico (figura 1).

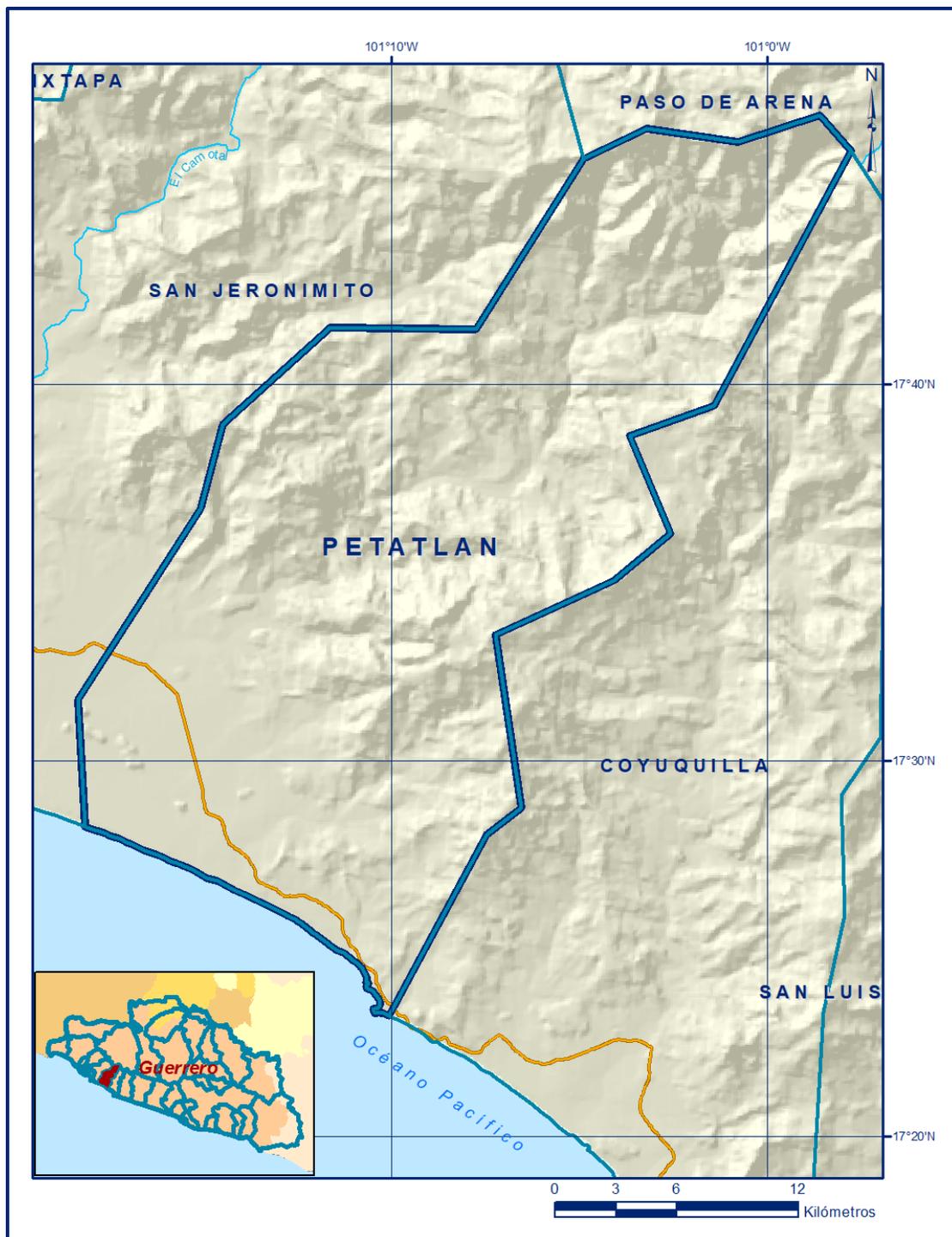


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente se ubica principalmente en el municipio Petatlán y sólo una pequeña porción del norte del acuífero en el municipio Coyuca de catalán. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

| ACUIFERO 1219 PETATLAN | | | | | | | |
|------------------------|----------------|---------|----------|---------------|---------|----------|--|
| VERTICE | LONGITUD OESTE | | | LATITUD NORTE | | | OBSERVACIONES |
| | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | GRADOS | MINUTOS | SEGUNDOS | |
| 1 | 100 | 57 | 46.8 | 17 | 46 | 14.2 | |
| 2 | 101 | 1 | 25.2 | 17 | 39 | 27.5 | |
| 3 | 101 | 3 | 40.0 | 17 | 38 | 38.8 | |
| 4 | 101 | 2 | 33.9 | 17 | 36 | 2.8 | |
| 5 | 101 | 4 | 5.0 | 17 | 34 | 48.0 | |
| 6 | 101 | 7 | 13.4 | 17 | 33 | 21.9 | |
| 7 | 101 | 6 | 32.3 | 17 | 28 | 45.7 | |
| 8 | 101 | 7 | 27.1 | 17 | 28 | 2.5 | |
| 9 | 101 | 10 | 3.5 | 17 | 23 | 13.7 | DEL 9 AL 10 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA |
| 10 | 101 | 18 | 8.1 | 17 | 28 | 14.9 | |
| 11 | 101 | 18 | 19.6 | 17 | 31 | 38.3 | |
| 12 | 101 | 15 | 4.0 | 17 | 36 | 42.5 | |
| 13 | 101 | 14 | 28.4 | 17 | 38 | 56.9 | |
| 14 | 101 | 11 | 36.5 | 17 | 41 | 31.8 | |
| 15 | 101 | 7 | 44.3 | 17 | 41 | 29.0 | |
| 16 | 101 | 4 | 53.6 | 17 | 46 | 1.2 | |
| 17 | 101 | 3 | 12.3 | 17 | 46 | 48.7 | |
| 18 | 101 | 0 | 46.0 | 17 | 46 | 27.5 | |
| 19 | 100 | 58 | 36.6 | 17 | 47 | 10.6 | |
| 1 | 100 | 57 | 46.8 | 17 | 46 | 14.2 | |

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Petatlán, se encuentra dentro del Organismo de Cuenca Pacifico Sur y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guerrero.

Su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en los Municipios de José Azueta, Petatlán, Tecpan de Galeana, Atoyac de Álvarez y Benito Juárez, Gro.”, publicado en el Diario Oficial de la federación (DOF) el 6 de marzo de 1978. Este decreto es tipo II que sólo permite extracciones para uso doméstico.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El usuario principal del agua subterránea es el público urbano. Dentro del acuífero no existen distritos o unidades de riego, a la fecha no se ha constituido Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que cubre el acuífero no se han realizado estudios geohidrológicos, sólo se cuenta con trabajos geológicos de alcance regional e información geohidrológica de algunos acuíferos de la región Costa Grande fuera de la zona de estudio. A continuación, se presenta un resumen de los trabajos consultados:

ROCAS METAVOLCÁNICAS E INTRUSIVOS RELACIONADOS PALEOZOICOS DE LA REGIÓN DE PETATLÁN, ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por Zoltan de Cserna del Instituto de Geología de la UNAM, en 1978. En este estudio se describe la litología de área cercana al municipio de Petatlán, así como los principales rasgos estructurales y el significado geológico regional.

ESTUDIO DE LA ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LA CUENCA DE LA SABANA, EN ACAPULCO, GRO. Elaborado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. en 1983. Los objetivos principales fueron: analizar las condiciones geohidrológicas para dictaminar la variación que ha tenido la recarga en los acuíferos de la Sabana y efectuar investigaciones geofísicas para localizar sitios adecuados para de perforación de pozos.

Los resultados indicaron que en el campo de pozos de La Sabana contenía altas concentraciones de fierro y manganeso en los pozos de agua potable y que la recarga principal proviene de la infiltración de la lluvia y del escurrimiento superficial a lo largo del cauce del río La Sabana.

ACTUALIZACIÓN DE LAS MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUÍFEROS DE IXTAPA, BAHÍA DE ZIHUATANEJO Y BAHÍA DE ACAPULCO, ESTADO DE GUERRERO.

Elaborado por Consultoría BESTCO en 2003. El documento contiene la descripción de las condiciones climatológicas, hidrológicas y geohidrológicas, así como los parámetros físicos e hidráulicos regionales que rigen el movimiento del agua en el subsuelo. Con la piezometría recabada en campo y la nivelación de brocales fue posible elaborar las configuraciones del nivel estático y actualizar el conocimiento de la posición de los niveles del agua subterránea en la red piloto, definida previamente, para el monitoreo de la calidad y los niveles del agua subterránea.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA POSICIÓN DE LA INTERFASE MARINA EN LA PORCIÓN COSTERA DEL ACUÍFERO LA SABANA, GUERRERO. Elaborado por GEOPSA SA de CV en 2007. Los objetivos principales fueron determinar la elevación del nivel estático en un período de tiempo determinado; configurar la profundidad, elevación, evolución del nivel estático.

Se trazó la red de flujo, en la cual se observó que el aporte de agua subterránea ocurre a lo largo del curso de las principales corrientes superficiales hacia la costa.

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO (1218) SAN JERONIMITO, ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por la CONAGUA y publicado en el Diario Oficial de la Federación el 13 de agosto de 2007. En este estudio se describe la estratigrafía, geología estructural, geología del subsuelo, así como el tipo de acuífero y sus parámetros hidráulicos que sirvieron para el planteamiento del balance de aguas subterráneas.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LA UNIÓN, PETATLAN Y TECPAN EN EL ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por Consultoría BETSCO en 2009. Los objetivos principales fueron: Elaborar un censo de captaciones de agua subterránea; determinar el volumen de extracción de aguas subterráneas para los diferentes usos, cuantificar la magnitud de los componentes de la recarga, obtener los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales, afinar el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y elaborar el balance hidrometeorológico del acuífero.

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

3. FISIOGRAFIA

3.1 Provincia fisiográfica

El área de estudio se encuentra comprendida en dos subprovincias de la provincia fisiográfica “Sierra Madre del Sur” (Raisz, 1964); la porción norte, en la Cordillera Costera del Sur, que constituye la franja central de la provincia y el extremo sur del área se encuentra en la subprovincia Costas del Sur, que se extiende a lo largo de la línea de costa.

El estado de Guerrero a su vez está dividido en 3 subprovincias (INEGI, 1991): “Cuenca Balsas Mexcala”, “Taludes Meridionales” y “Planicie Costera del Pacífico”. El acuífero Petatlán, se encuentra dentro de las subprovincias “Taludes Meridionales” y “Planicie Costera”, cubriendo una mayor superficie de esta última. La zona de estudio presenta dos tipos de relieves, el primero de ellos formado por elevaciones topográficas de origen ígneo y el segundo está representado por los sedimentos que conforman la planicie costera, los cuales están formados por arena de granulometría media a fina, así como por los depósitos aluviales producto de la desintegración de las rocas preexistentes.

3.2 Clima

Dentro de la zona de estudio e inmediaciones se localizan cuatro estaciones climatológicas con registro histórico; entre ellas la estación Petatlán la cual cuenta con datos para el periodo de 42 años comprendido entre 1941 y 1983. En la zona de estudio el clima varía en relación a su relieve, presentándose dos tipos en la región montañosa; de acuerdo con los criterios de Köppen modificados por Enriqueta García. El primero (BS1 (h')w) semiárido cálido, el segundo (A) C(w₁) Semicálido Subhúmedo del grupo C. En la Planicie Costera se definen dos tipos de clima (Aw₀) cálido Subhúmedo y (Aw₁) cálido Subhúmedo. La temperatura media anual se estima en 25.6 °C, la precipitación media anual es de 1,067 mm y la evaporación potencial media anual de 1,973 mm.

3.3 Hidrología superficial

El Acuífero Petatlán se ubica en la Región Hidrológica 19 “Costa Grande de Guerrero”, sobre la vertiente sur de la Sierra Madre del Sur. El acuífero pertenece a la cuenca denominada “Río Ixtapa y Otros”, que drena hacia el Océano Pacífico. Los principales escurrimientos en la zona de estudio son el río Petatlán y el San Jeronimito. No existe infraestructura hidráulica para su aprovechamiento.

3.4 Geomorfología

En el área que cubre el acuífero se identifican dos geoformas principales: la que integra la zona serrana conformada por rocas ígneas y metamórficas que presentan un relieve abrupto y sumamente accidentado, con presencia de drenaje dendrítico; y la planicie o llanura costera donde se ha desarrollado un drenaje de tipo paralelo. Las sierras constituidas por rocas sedimentarias, presentan un ciclo geomorfológico maduro, ya que sus perfiles son suaves y ondulados.

Los afloramientos de todas estas rocas se prolongan hasta la costa, en donde la acción de la erosión y el oleaje dan lugar a la formación de acantilados y depresiones que forman pequeños valles y playas.

4. GEOLOGÍA

La geología del estado de Guerrero es muy compleja, ya que la entidad se encuentra dividida en diferentes terrenos tectonoestratigráficos, con estratigrafías variadas, pertenecientes a cuencas de depósito, unidades corticales y oceánicas de tamaño, litología, deformación y edad variables. La distribución de dichas rocas se muestra en la figura 2.

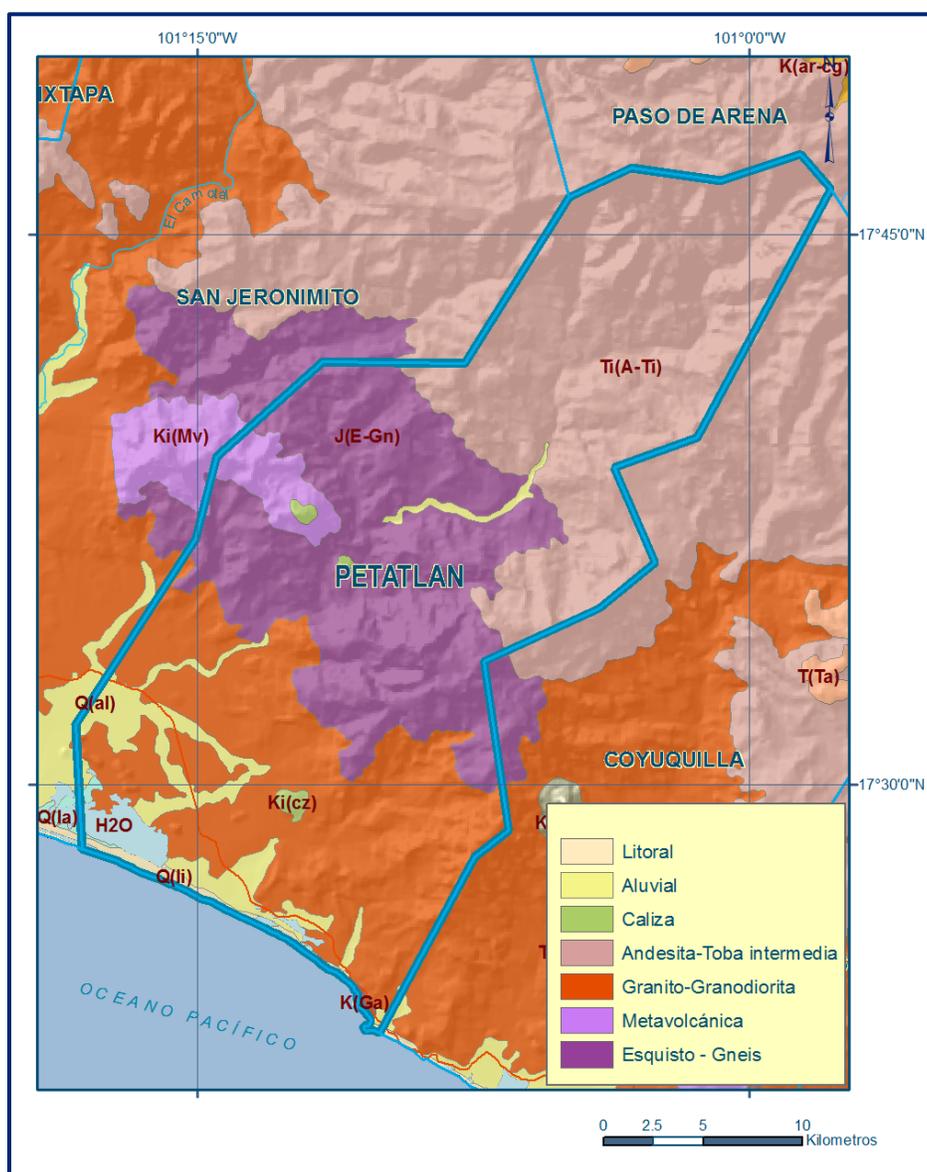


Figura 2. Geología general del acuífero

Además, debido a que esta región está situada en el borde suroccidental de la placa norteamericana, donde en la región de la fosa de Acapulco, se sumerge y sumergieron placas oceánicas, se han formado durante su historia geológica depósitos relacionados con arcos insulares y mares marginales, dando origen a varios tipos de depósitos vulcanosedimentarios y sedimentos marinos y continentales (terrenos Guerrero, Oaxaca, Xolapa y otros) La geología regional de la zona se encuentra dominada por rocas metamórficas, ígneas intrusivas y depósitos recientes.

A nivel regional la geología general del área de estudio comprende a las rocas metamórficas del Paleozoico, las rocas volcánicas del Paleógeno y Neógeno, las calizas y lutitas del Cretácico Inferior, así como los materiales recientes formados por gravas, arenas, limos y arcillas producto de la alteración y acarreo de rocas preexistentes.

Las rocas de mayor antigüedad corresponden a extensos afloramientos de rocas metamórficas cuya formación tuvo lugar durante el Paleozoico. Posteriormente durante el Cretácico Inferior tuvo lugar una transgresión, lo que motivo el depósito de sedimentos calcáreos que dieron origen a calizas de estructura masiva.

En el valle del río Camalotito cerca de El Zapotillo, en la parte suroccidental del Estado de Guerrero, aflora una secuencia metavolcánica de más de 350 m de espesor, que está cubierta discordantemente por lutitas y calizas interestratificadas que poseen una recristalización incipiente. La mitad inferior de la secuencia metavolcánica está formada por toba andesítica, mientras que la mitad superior por tobas y en menor proporción rocas basálticas. Las rocas metavolcánicas contienen intercalaciones delgadas de argilita.

4.1 Estratigrafía

El registro estratigráfico comprende del Paleozoico al Reciente y está conformado por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias. En la región aledaña al área de estudio se presentan diferentes terrenos tectonoestratigráficos, que se clasifican de acuerdo con sus basamentos. La cubierta sedimentaria incluye rocas volcánicas y sedimentarias probablemente deformadas durante el Jurásico o el Cretácico, calizas del Cretácico Inferior y conglomerados del Cretácico Inferior-Cretácico Superior, así como rocas volcánicas continentales del Paleógeno y Neógeno.

El acuífero de Petatlán se localiza en las estribaciones de la Sierra Madre del Sur, la cual se considera la provincia morfo-tectónica más compleja y con mayor diversidad de tipos de rocas en el país. Ferrusquía (1993), la subdivide en cinco Subprovincias de las cuales, la denominada "Planicie Costera del Pacífico" abarca la zona de estudio. Esta Subprovincia forma una franja estrecha de terreno, que se localiza al occidente de Acapulco. Tiene menos de 10 km de anchura en promedio, ampliándose a 20 km o más entre los ríos Papagayo y Verde.

La base del Cretácico está constituida por conglomerados; calizas y otras rocas metasedimentarias que se sobrepone tectónicamente al basamento del terreno Xolapa. Sobreace a la secuencia anterior un cuerpo de areniscas y calizas del Cretácico Superior.

En el Paleógeno se tiene un conglomerado Polimíctico bien consolidado (que se encuentra cubierto discordantemente por andesitas, cuya textura es fanerítica y escasamente porfídica, constituida por plagioclasas, escasos piroxenos y ferromagnesianos, se atribuye una edad Eoceno. A partir de esta edad, se considera que los terrenos tectonoestratigráficos comparten una historia en común.

La zona presenta intrusivos de composición granítica-granodiorítica que afectaron a la columna precedente. Esos cuerpos son de textura cristalina. En el granito abunda el cuarzo, los feldespatos, plagioclasa sódica y micas. En la granodiorita disminuye la cantidad de cuarzo, las plagioclasas se vuelven más cálcicas y aparecen los piroxenos (figura 2). La secuencia estratigráfica se describe a continuación:

Rocas Metamórficas Paleozoicas. Esta unidad es un complejo de rocas metamórficas representado por pizarras y filitas que constituye el basamento de la región.

Por su constitución litológica y por tratarse de una roca consolidada esta unidad se considera impermeable, ya que funciona como una barrera natural para el flujo del agua subterránea. Está representado también por la Formación Lagunillas del Aptiano que se sobrepone tectónicamente al basamento del terreno Xolapa consiste en una secuencia tipo Flysch depositada en una cuenca ante-arco, que en conjunto está constituida por metalutitas, metareniscas, metatobas, filitas, pizarras y esquistos, dentro de las cuales se encuentran alojadas rocas ultramáficas.

Calizas y lutitas del Cretácico Inferior (Ki). Las rocas de esta unidad afloran en las estribaciones de la sierra, y consiste de calizas de color gris, de estratificación gruesa, que se encuentran intercaladas con lutitas, las cuales están cubiertas por arcillas, producto de su misma alteración. Esta unidad se encuentra aflorando principalmente en la porción sur del acuífero. De acuerdo con su constitución litológica, solo cuando se encuentra fracturada puede tener porosidad secundaria para permitir el flujo del agua subterránea.

Granitos. Estas rocas se encuentran aflorando al norte de la zona de estudio. Se tratan de cuerpos de composición granítico-granodiorítico, los cuales afectaron la secuencia del Terreno Xolapa.

Este cuerpo granítico forma parte del gran batolito de la costa de Guerrero. Se encuentran muy alterados y fracturados en su parte superior, razón por la cual en algunas zonas ya se han formado suelos, esto como consecuencia del intenso intemperismo y la erosión a la que ha sido sujeto. Salvo la parte alterada y fracturada que cuando alcanza un espesor considerable llega a almacenar cantidades significativas de agua, la parte sana del granito se considera impermeable.

Tobas y andesitas. Se presenta como una colada andesítica porfídica de color morado, fracturada y un poco alterada que aflora en las estribaciones de la sierra. Posiblemente su edad corresponda al Paleógeno y Neógeno, ya que se encuentra cubierta por una capa de suelo limo-arcilloso. Por su constitución litológica se clasifica como una unidad impermeable para fines hidrogeológicos.

Sedimentos aluviales. Está constituida por arenas finas-medias, transportados por la acción de las aguas fluviales y depositados en las depresiones formadas en las rocas graníticas, principalmente por la acción erosiva de las corrientes.

Esta unidad presenta buena porosidad y alta permeabilidad debido a la naturaleza propia de los materiales que lo conforman; sin embargo, presentan una distribución muy restringida.

Sedimentos fluviales. Esta unidad tiene su origen en el transporte de las aguas fluviales, cuyos materiales han sido depositados en las vegas del río, formando playones y terrazas de poca altura, en las que superficialmente abundan las arenas.

Constituida principalmente por gravas gruesas, arenas y limos. Esta unidad presenta alta permeabilidad, misma que superficialmente facilita la infiltración del agua de lluvia. Además, esta unidad es susceptible de inundarse durante las crecientes del río, razón por la cual puede llegar a funcionar como acuífero, cuando alcanza un espesor considerable.

Sedimentos de Litoral. Esta unidad se encuentra conformada por arena medias y finas, misma que cubren la totalidad de la barra, presenta buena permeabilidad. Al igual que la unidad anterior, su distribución es escasa.

La geología estructural está influenciada por la complejidad tectónica que presenta la zona. En las rocas cretácicas que conforman la unidad de calizas y lutitas es común la presencia de plegamientos, pero debido a su naturaleza compacta no se han desarrollado conductos de disolución.

La sobreposición de diferentes dominios tectónicos hace posible el contacto, por falla o en discordancia, de diferentes unidades litoestratigráficas que generalmente funcionan como barreras al flujo subterráneo y que le imprimen un particular rasgo a toda esta región del sur del país.

Como resultado de los procesos geológicos que han conformado la secuencia litológica, a excepción de los depósitos aluviales, está afectada por fallas normales, fallas inversas, fallas de inflexión y algunas otras de tipo rotacional, producto de la tectónica que ha imperado en la región, lo que tiene una influencia directa en el desarrollo del relieve.

Para entender mejor la complejidad de la geología del estado, y de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano, es necesario entender el marco tectónico bajo el cual se formaron. Con base en lo anterior, en la literatura existente se plantean diferentes nombres para los terrenos y aún está en discusión su extensión y límite, el estado de Guerrero cuenta con un super-terreno y dos terrenos.

TERRENO GUERRERO

El terreno Guerrero constituye el súper-terreno que ha sido el centro de controversias tanto acerca de su contenido como de sus límites; está dividido en cinco subterrenos que cubren la mitad occidental del estado.

TERRENO MIXTECO

El Terreno Mixteco aflora en la parte nororiental del estado, teniendo, dentro de los confines del estado, aproximadamente 120 km de largo y 130 km de ancho, es el único de los terrenos guerrerenses al que con seguridad se le conoce basamento, constituido por el Complejo Acatlán, del Paleozoico Inferior, cubierto en forma aislada por sedimentos del Pérmico, más ampliamente por una secuencia del Jurásico y, por último, por una secuencia de calizas del Albiano, mejor desarrollada en lo que constituye la plataforma Guerrero-Morelos (Ramírez Espinosa, 1982).

Estudios paleomagnéticos indican que las rocas a partir del Albiano sufrieron muy poco o ningún desplazamiento en el Terreno Mixteco con respecto a la placa estable de Norteamérica.

La localización del límite entre los terrenos Guerrero y Mixteco es controversia. El Complejo Acatlán en su exposición más occidental cabalga sobre carbonatos cretácicos a lo largo de la falla inversa de Papalutla (de Cserna *et al*, 1980).

Para algunos autores, los carbonatos de la plataforma Guerrero-Morelos constituyen parte del Terreno Mixteco, mientras que para otros forman parte del Terreno Guerrero.

De ser así, la falla de Papalutla sería el límite de los terrenos Mixteco y Guerrero. Sin embargo, en el pozo de Zoquiapan, perforado por Petróleos Mexicanos en 1993, a los 1,576 m de profundidad se cortó el Complejo Acatlán, lo que sostiene la idea de que por lo menos la mayor parte de la plataforma tiene al Terreno Mixteco como basamento.

TERRENO XOLAPA

El Terreno Xolapa es el más grande, pero el menos conocido de los terrenos en el sur de México. Comprende un área aproximada de 70 a 100km de amplitud y se extiende 600 km a lo largo de la costa del Pacífico.

Este terreno representa la raíz de un arco magmático del Mesozoico Medio al Paleógeno, caracterizado por orto y paragneis y migmatitas en conjunto con plutones sintectónicos y postectónicos, consistiendo en rocas con un alto grado de metamorfismo.

Los contactos del Terreno Xolapa con los terrenos Guerrero y Mixteco están caracterizados por milonitas, con una asociación a fallas normales (Herrmann, 1994), producto de reactivación de otras estructuras (Tolson, 1997).

Con base en la magmatización a gran escala de la corteza media e inferior, y plutonismo granodiorítico, tonalítico y granítico generalizado, el Complejo Xolapa se interpreta como un arco magmático (Ortega-Gutiérrez, 1981), construido por un proceso continuo de emplazamiento de magma y magmatización de la corteza.

Sabanero Sosa (1990) sostiene que el terreno Xolapa representa un terreno metaplutónico, que se ha formado por procesos de desarrollo de corteza continental, al lado del margen truncado por el desplazamiento del bloque Chortis al SE durante el Eoceno. Sedlock y colaboradores (1993) señalan que el límite por falla del Terreno Xolapa con el Terreno Guerrero está completamente destruido por intrusiones graníticas del Paleógeno y Neógeno al este de Zihuatanejo y Petatlán.

Los intrusivos de los terrenos Guerrero y Xolapa, según dataciones isotópicas de Rb-Sr, indican un decremento hacia el SE en las edades de los minerales, desde 80 ± 3 Ma en Puerto Vallarta, Jalisco, hasta 119 ± 3 Ma en Puerto Ángel, Oaxaca, independiente de la edad del metamorfismo de las rocas.

Así en Acapulco se obtuvo una edad de 48 ± 1 Ma (Eoceno Medio) para la intrusión en esta área y en Pinotepa Nacional, Oaxaca, de 25 ± 1 Ma (Oligoceno Superior).

4.2 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica 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 fluviales que constituyen el lecho y la llanura de inundación del Río Petatlán; y en su porción inferior por conglomerados, rocas sedimentarias e ígneas fracturadas.

Las evidencias directas e indirectas demuestran que el espesor del medio granular varía desde algunos metros en las estribaciones de la sierra, incrementándose ligeramente en las inmediaciones de los cauces de los ríos y arroyos, hasta alcanzar algunas decenas de metros en la planicie costera.

El medio fracturado está asociado a la zona de alteración de las rocas intrusivas principalmente y a la presencia de fracturamiento en rocas sedimentarias; su espesor varía, de unos cuantos metros hasta alcanzar 50 m en algunas zonas; sin embargo, su promedio es de alrededor de 20 m, según lo demuestran las exploraciones geofísicas (figura 3).

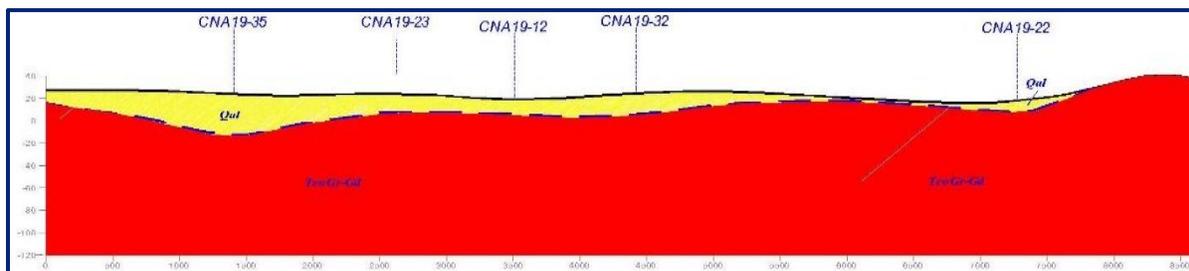


Figura 3. Sección geológica esquemática

Dependiendo de la naturaleza de los materiales o rocas con los que se encuentra en contacto, hacia la parte alta del cauce del río los límites lateral e inferior del acuífero están constituidos por las rocas metamórficas, graníticas y la unidad andesítica que constituyen el basamento y las barreras al flujo subterráneo.

5. HIDROGEOLOGIA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten establecer la presencia de acuíferos aislados de **tipo libre** heterogéneos y anisótropos, constituidos, por un lado, de materiales granulares porosos y por otro de materiales fracturados. El medio granular poroso está conformado por los depósitos no consolidados y semi-consolidados que incluyen materiales clásticos de granulometría diversa, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en la zona, estos materiales presentan permeabilidad media a baja y se ubican en la proximidad del cauce de los ríos y arroyos, así como en la angosta planicie costera.

La disposición espacial de estos medios está limitada ya que existe muy poca continuidad hidráulica entre ellos, por lo que el agua subterránea solo puede trasladarse en distancias cortas aflorando, al alcanzar su frontera, en forma de pequeños manantiales “lloraderos” para posteriormente escurrir e incorporarse a un cauce superficial y posiblemente alimentar de nuevo alguna zona permeable aguas abajo.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del presente estudio, se ejecutaron 6 pruebas de bombeo (2009) tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 3 a 24 horas, en aprovechamientos que extraen agua, tanto de los materiales granulares como los de las zonas alteradas de las rocas ígneas y metamórficas que abundan en la región.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos, se establece que los valores de transmisividad varían de **1.0×10^{-6} a $8.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$** .

Los valores bajos de transmisividad corresponden a la parte alterada, con presencia de arcillas, de las rocas graníticas y metamórficas.

De acuerdo con el espesor saturado, la conductividad hidráulica es consistente con la obtenida en los acuíferos vecinos, en la que se registran valores de **$3.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$** (3 m/d). Las pruebas de bombeo no contaron con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

No existe registro piezométrico histórico consistente debido a que no se tiene definida una red piezométrica.

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró únicamente la información recabada durante el estudio realizado en 2009.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la configuración de la profundidad al nivel estático mostrada en la figura 4, se puede observar que los valores, medidos principalmente en norias, varían de 1 a 6 m a lo largo del Río Petatlán y otros arroyos, conforme se asciende topográficamente de la zona costera hacia las estribaciones de las sierras.

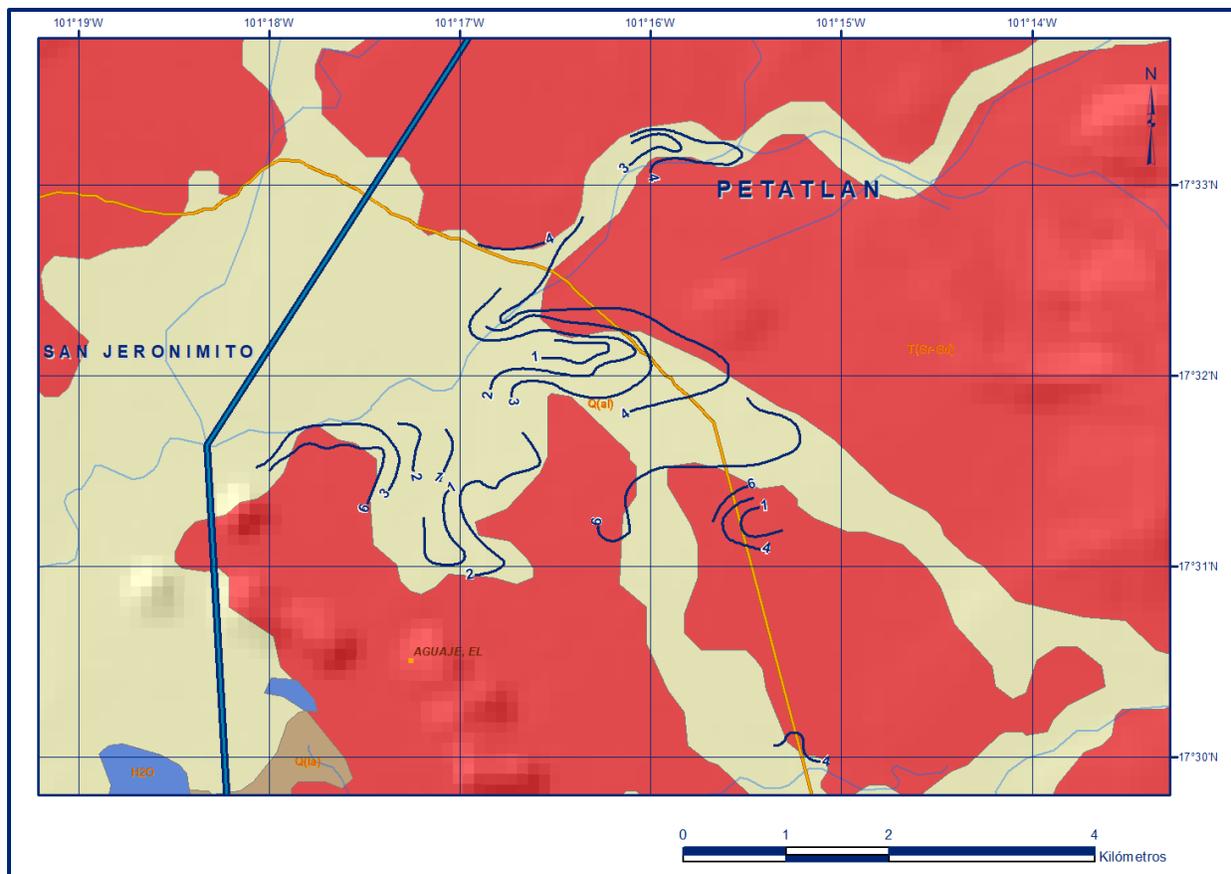


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2009)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático, la información se encuentra dispersa en varias zonas de explotación definidas por pequeñas subcuencas. Los valores varían de 90 a 5 msnm (figura 5).

En la porción oriental, alrededores de la cabecera municipal, se define una subcuenca cuya elevación del nivel estático varía de 30 msnm en las estribaciones de la sierra (parte noreste), a 9 msnm en el suroeste, en la zona oriental del rancho La Nopalera.

Al sureste se aprecia otra zona en donde las curvas de igual elevación registran un valor máximo de 30 msnm en las inmediaciones del rancho Emir (cabecera de la subcuenca), y descienden a 9 msnm al poniente del campo de tiro.

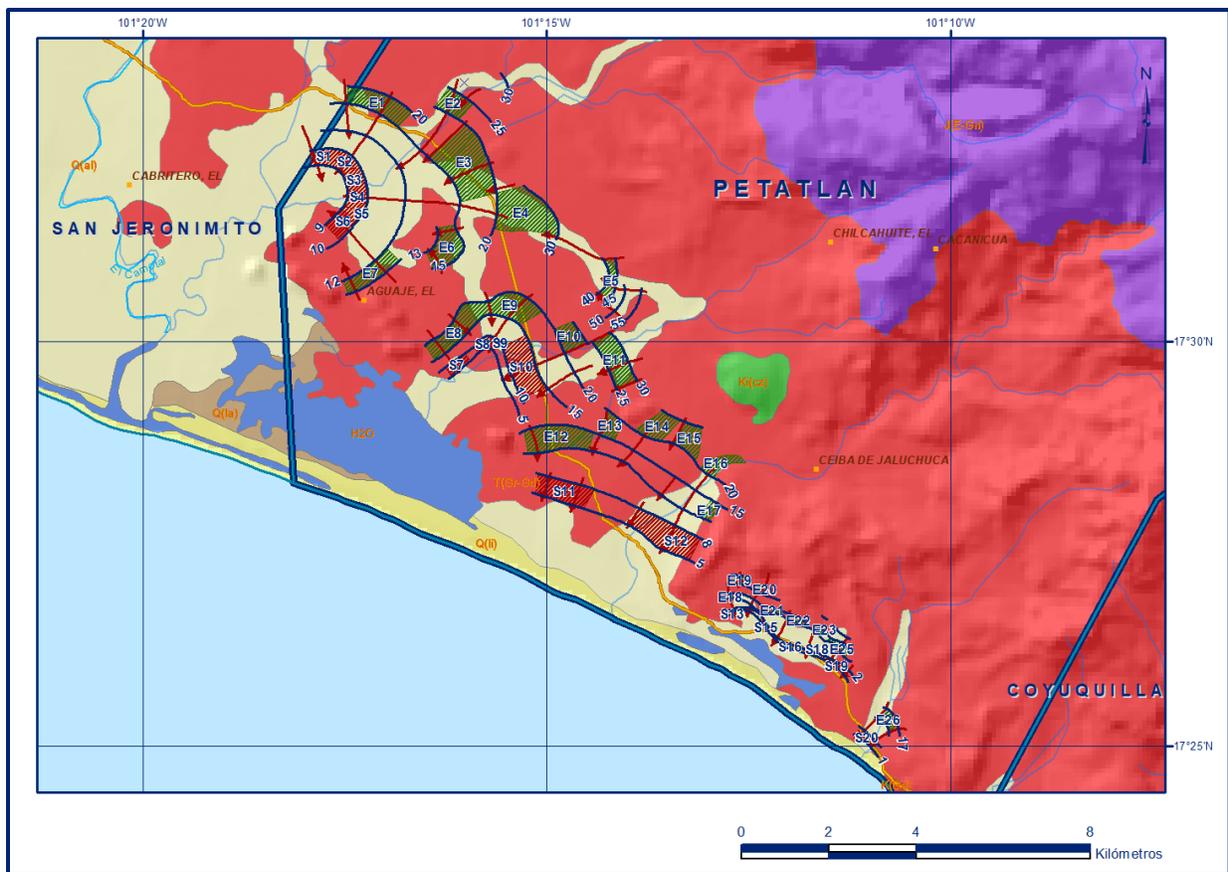


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2009)

Se puede apreciar una tercera subcuenca en los alrededores de Rancho Nuevo, con valores máximos de 30 msnm que decrecen hasta 5 msnm en las inmediaciones de Juluchuca. En la zona comprendida entre salinas La Parota y el rancho Loma Bonita, se emplaza otra subcuenca que registra elevaciones máximas de 96 msnm, al norte de salinas La Parota, los cuales descienden a menos de un metro en los alrededores de la laguna Salina El Cuajo. Por último, en el extremo sureste del área (puente La Barrita), las captaciones presentan elevaciones del nivel estático de 18 msnm disminuyendo gradualmente a menos de un metro hacia la playa.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar una configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas se encuentran dispersas en tiempo y espacio, son insuficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Adicionalmente, el volumen de extracción es inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado en el 2009, se tomaron 15 muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayores, nitratos, bromuros, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis fisicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Disueltos Totales (SDT) varían de 81 a 2602 ppm, los cuales corresponden a las norias CNA19-35 y CNA19-75 respectivamente. De las muestras sólo dos de ellas sobrepasan las normas para agua potable (Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.) en Dureza Total, Na⁺⁺ y Cl⁻. Predominan los iones bicarbonato y sodio y en menor proporción el Cloro y el Magnesio.

De la representación de los resultados en los diferentes diagramas, se concluye que las familias de agua predominantes son Mg/Na-HCO₃ y Na-So₄/HCO₃, para las áreas aledañas a las rocas graníticas; Na/HCO₃ y Na-Cl/HCO₃ para la planicie aluvial y finalmente sódico-clorada (Na/Cl) en la zona costera.

En lo que se refiere a la conductividad eléctrica medida in situ al momento de recolección de las muestras, la mayoría de los aprovechamientos registró conductividades menores que 1500 micro-Siemmens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

Dentro de la zona del acuífero se visitaron 155 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 15 son pozos, 139 norias y 1 galería filtrante.

Del total de obras, 124 se destinan al uso agrícola, 18 uso público-urbano y 13 para pecuario. El volumen de extracción en conjunto asciende a **9.1 hm³ anuales**, de los cuales, 3 hm³ (33.0%) son para uso agrícola, 6.0 hm³ (65.9%) público-urbano y los 0.1 hm³ restantes (1.1%) para uso pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2009, en una superficie de 73 km² del acuífero, en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos.

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 la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola 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 (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene 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:

$$R_v + R_i + E_h - B - S_h - D_{fb} - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- R_v**= Recarga vertical;
- R_i**= Recarga inducida;
- E_h**= Recarga por flujo horizontal;
- B**= Bombeo;
- S_h**= Salidas por flujo horizontal;
- D_{fb}**= Descarga natural por flujo base;
- ETR**= Evapotranspiración real;
- ΔV(S)**=Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = S_h + B + D_{fb} + ETR \pm \Delta V(S) - R_i - E_h \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

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

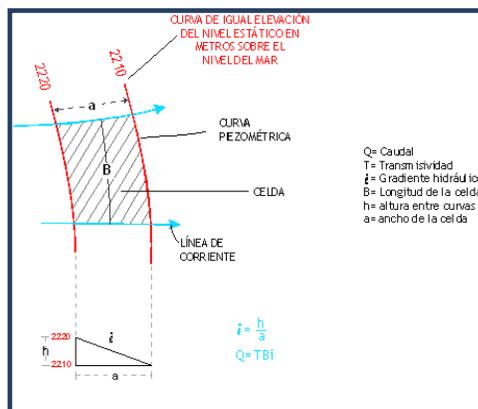
La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

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 mostrada en la figura 5, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- Q**= Gasto;
- T**= Transmisividad;
- B**= Longitud de la celda;
- i**= Gradiente hidráulico;



El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2009 se presenta en la tabla 2, en la que en la se observa que su valor total es de **17.8 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas

| No. de Celda | Largo(l) (m) | Ancho (a) (m) | Gradiente hidráulico i=Dif/l | K(media) m/día | Espesor m | Trasmisividad m ² /s | Caudal Q=Tai m ³ /s | Volumen entradas hm ³ /anual |
|--------------|--------------|---------------|------------------------------|----------------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| E1 | 510 | 1,800 | 0.009804 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0245 | 0.8 |
| E2 | 420 | 1,410 | 0.011905 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0233 | 0.7 |
| E3 | 550 | 650 | 0.009091 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0082 | 0.3 |
| E4 | 980 | 1,550 | 0.005102 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0110 | 0.3 |
| E5 | 110 | 1,110 | 0.090909 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.1402 | 4.4 |
| E6 | 200 | 1,110 | 0.025000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0385 | 1.2 |
| E7 | 700 | 700 | 0.002857 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0028 | 0.1 |
| E8 | 350 | 1,400 | 0.002857 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0056 | 0.2 |
| E9 | 400 | 1,350 | 0.012500 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0234 | 0.7 |
| E10 | 510 | 1,550 | 0.009804 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0211 | 0.7 |
| E11 | 500 | 530 | 0.010000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0074 | 0.2 |
| E12 | 490 | 1,210 | 0.010204 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0171 | 0.5 |
| E13 | 590 | 1,450 | 0.008000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0161 | 0.5 |
| E14 | 515 | 360 | 0.010000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0050 | 0.2 |
| E15 | 700 | 515 | 0.014000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0100 | 0.3 |
| E16 | 600 | 540 | 0.017000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0128 | 0.4 |
| E17 | 900 | 260 | 0.011000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0040 | 0.1 |
| E18 | 450 | 270 | 0.011000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0041 | 0.1 |
| E19 | 125 | 217 | 0.080000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0241 | 0.8 |
| E20 | 180 | 350 | 0.028000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0136 | 0.4 |
| E21 | 170 | 170 | 0.088000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0208 | 0.7 |
| E22 | 125 | 300 | 0.080000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0333 | 1.1 |
| E23 | 100 | 280 | 0.100000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0389 | 1.2 |
| E24 | 150 | 120 | 0.067000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0112 | 0.4 |
| E25 | 110 | 190 | 0.091000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0240 | 0.8 |
| E26 | 230 | 280 | 0.043000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0167 | 0.5 |
| E27 | 270 | 680 | 0.007000 | 3.0 | 40 | 0.001389 | 0.0066 | 0.2 |
| | | | | | | | | 17.8 |

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio por zona de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2009, adaptadas al espesor saturado.

7.1.3 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.

Para este caso, se consideró que un 20% de este volumen retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea y que se utiliza el riego por gravedad y 10% del volumen destinado al abastecimiento de agua potable.

Uso público-urbano: $6 \text{ hm}^3 (0.10) = 0.6$

Uso Agrícola: $3 \text{ hm}^3 (0.20) = 0.6$

Considerando lo anterior, **Ri = 1.2 hm³ /año.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el mar (Sh), descarga por flujo base (Dfb) y por la evapotranspiración en la zona de niveles freáticos someros (ETR).

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

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

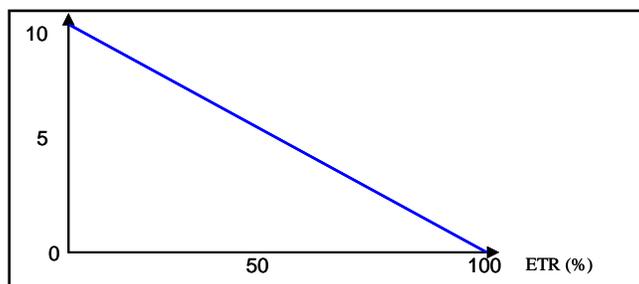
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 25.6 °C y precipitación= 1067 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 950.6 mm.

| | | | |
|--|-----------|------------------|------------|
| $ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$ | | | |
| T (°C) = | 25.6 | | |
| P(mm) = | 1067 | P ² = | 1138489 |
| L = | 1778.8608 | L ² = | 3164345.75 |
| ETR (mm) | 950.6 | | |

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 10 m, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 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 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



Existen dos zonas del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas.

Una de ellas, A1 de 12 km² de extensión, se localiza en torno de la población de Petatlán, donde la profundidad promedio al nivel del agua subterránea es de 4 m. La segunda, A2 con una superficie de 8 km², se ubica en la franja costera entre el Estero Valentín y la Laguna Salada El Cuajo, donde la profundidad promedio al nivel freático es de 3 m.

Si consideramos estas áreas donde se registran niveles freáticos someros, con cobertura vegetal cuyas raíces son suficientemente largas y susceptibles de evapotranspirar, su profundidad promedio al nivel del agua subterránea, de acuerdo con el valor de la lámina de ETR obtenida y la gráfica anterior:

$$ETR_{A1} = 12 \text{ km}^2 (0.9506 \text{ m}) (0.6) = 6.8$$

$$ETR_{A2} = 8 \text{ km}^2 (0.9506 \text{ m}) (0.7) = 5.3$$

$$\mathbf{ETR = 12.1 \text{ hm}^3/\text{año}}$$

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción por bombeo es de **9.1 hm³/año**.

7.2.3 Salidas subterráneas por flujo 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 presentado en la figura 5. Su valor es de **0.8 hm³ anuales**, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas

| No.de Celda | Largo(l) (m) | Ancho (a) (m) | Gradiente hidráulico i=Dif/l | K(media) m/día | Espesor m | Trasmisividad m ² /s | Caudal Q=Tai m ³ /s | Volumen entradas hm ³ /anual |
|-------------|--------------|---------------|------------------------------|----------------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| S1 | 380 | 1,100.00 | 0.002632 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0007 | 0.02 |
| S2 | 440 | 410.00 | 0.002273 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0002 | 0.01 |
| S3 | 430 | 550.00 | 0.002326 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0003 | 0.01 |
| S4 | 460 | 280.00 | 0.002174 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0001 | 0.00 |
| S5 | 480 | 200.00 | 0.002083 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0001 | 0.00 |
| S6 | 470 | 700.00 | 0.002128 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0003 | 0.01 |
| S7 | 200 | 570.00 | 0.025000 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0033 | 0.10 |
| S8 | 230 | 410.00 | 0.021739 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0021 | 0.07 |
| S9 | 280 | 157.00 | 0.017857 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0006 | 0.02 |
| S10 | 600 | 1,270.00 | 0.008333 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0024 | 0.08 |
| S11 | 500 | 1,220.00 | 0.006 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0017 | 0.05 |
| S12 | 570 | 570.00 | 0.005 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0007 | 0.02 |
| S13 | 70 | 280.00 | 0.024 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0016 | 0.05 |
| S14 | 60 | 190.00 | 0.028 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0012 | 0.04 |
| S15 | 75 | 410.00 | 0.023 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0022 | 0.07 |
| S16 | 75 | 380.00 | 0.023 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0020 | 0.06 |
| S17 | 80 | 140.00 | 0.021 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0007 | 0.02 |
| S18 | 70 | 185.00 | 0.024 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0010 | 0.03 |
| S19 | 90 | 350.00 | 0.019 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0015 | 0.05 |
| S20 | 190 | 400.00 | 0.021 | 0.5 | 40.00 | 0.000231 | 0.0019 | 0.06 |
| | | | | | | | | 0.8 |

7.2.4 Descargas naturales (Dn)

De acuerdo con los aforos del flujo base medidos en la estación hidrométrica Petatlán, ubicada sobre el cauce del río del mismo nombre, para el periodo 1953-2002, su valor promedio es de 1,129 lps, que equivalen a una descarga de **35.6 hm³ anuales**. El río San Jeronimito y Petatlán son los colectores principales de la cuenca al que confluyen gran parte de los arroyos. En el caudal base está considerada la descarga de pequeños manantiales.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Adicionalmente, la configuración de elevación del nivel estático no muestra alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento, que pudieran ser causadas por la concentración del bombeo y/o de aprovechamientos. Por ello se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto, $\Delta V(S) = 0$

Solución a 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:

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + D_{fb} + ETR \pm \Delta V(S) - R_i - E_h \quad (2) \\ R_v &= 0.8 + 9.1 + 35.6 + 12.1 - 0.0 - 1.2 - 17.8 \\ R_v &= 38.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la recarga total (R) es igual:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 38.6 + 17.8 + 1.2 \\ R &= 57.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que, en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la siguiente expresión:

$$DMA = R - DNC - VEAS \quad (3)$$

Donde:

DMA= Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

R= Recarga total media anual;

DNC= Descarga natural comprometida;

VEAS=Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA;

8.1 Recarga total (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 inducida. Para este caso, su valor es de **57.6 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos 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 particular, se considera un volumen de descarga natural comprometida de **39.1 hm³ anuales**, que corresponde a la salida por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina, la descarga del flujo base y el 50 % de la evapotranspiración en la zona costera (A₂) que deben preservarse para proteger la flora ribereña y el ecosistema costero.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **30 de diciembre de 2022** es de **16,443,369 m³/año**.

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, de acuerdo con la expresión 3, 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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 57.6 - 39.1 - 16.443369 \\ \text{DMA} &= 2.056631 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **2,056,631 m³ anuales**.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación.

No se descarta la posibilidad de que su valor sea mayor; sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2007. Determinación de Agua en el Acuífero San Jeronimito, Estado de Guerrero.

Comisión Nacional del Agua, 2009. Actualización Geohidrológica de los Acuíferos La Unión, Petatlán y Tecpan en el Estado de Guerrero. Elaborado por la empresa Consultoría BESTCO, S.A. de C.V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1983. Estudio de Actualización Hidrogeológica de la Cuenca de La Sabana, estado de Guerrero, Elaborado por la empresa Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.