Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Copala (1233), Estado de Guerrero

Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE GUERRERO							
1233	COPALA	19.6	10.1	0.570344	2.3	8.929656	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Comisión Nacional del Agua

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Subgerencia de Evaluación y

Ordenamiento de Acuíferos

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO COPALA (1233), ESTADO DE GUERRERO

México, D.F., Mayo de 2013

CONTENIDO

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1. Localización 2
1.2. Situación administrativa del acuífero 3
2. ESTUDIOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 4
3. FISIOGRAFIA 6
3.1. Provincia fisiográfica 6
3.2. Clima 6
3.3. Hidrología superficial 7
3.4. Geomorfología 7
4. GEOLOGÌA 7
4.1. Estratigrafía 8
4.2. Geología del subsuelo 11
5. HIDROGEOLOGIA 12
5.1. Tipo de acuífero 12
5.2. Parámetros hidráulicos 12
5.3. Piezometría 13
5.4. Comportamiento hidráulico 13
5.4.1. Profundidad al nivel estático 13
5.4.2. Elevación del nivel estático 13
5.4.3. Evolución del nivel estático 15
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 15
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA 15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS 16
7.1. Entradas 16
7.1.1. Recarga vertical (Rv) 16
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 17
7.2. Salidas 18
7.2.1. Evapotranspiración (ETR) 18
7.2.2. Bombeo (B) 20
7.2.3. Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh) 20
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$ 20
8. DISPONIBILIDAD 21
8.1. Recarga total (Rt) 21
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM) 21
8.3. Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS) 22
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS) 22
9. BIBLIOGRAFÍA 22

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 Copala, definido con la clave 1233 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción suroriental del Estado de Guerrero, entre los paralelos 16^0 32' y 17^0 00' de latitud norte y los meridianos 98^0 49' y 99^0 03' de longitud oeste; abarcando una superficie aproximada de 686 km^2.

Limita al norte con los acuíferos Papagayo y Marquelia, al este con el acuífero Marquelia y al oeste con el acuífero Nexpa, todos ellos pertenecientes al Estado de Guerrero; al sur con el Océano Pacífico (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie del acuífero cubre parcialmente los municipios Ayutla de Los Libres, Cuautepec, Copala y San Luis Acatlán. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

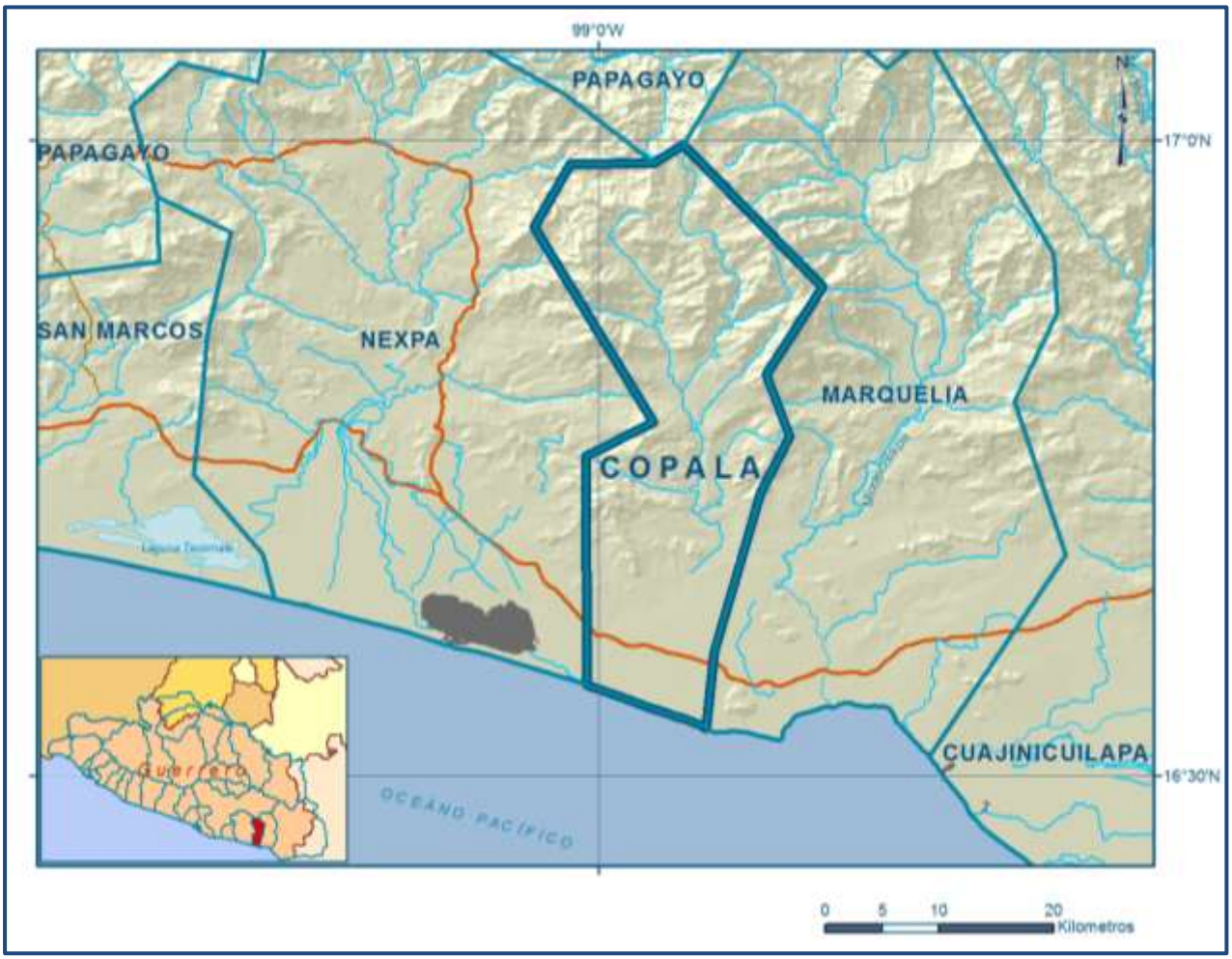


Figura 1. Localización del acuífero

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Copala pertenece al Organismo de Cuenca V "Pacífico Sur" y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guerrero. En el territorio completo que cubre el acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del "*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican",* publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la

Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1233 COPALA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	3	2.3	16	55	55.2	
2	99	1	19.9	16	58	54.0	
3	98	57	22.8	16	58	56.6	
4	98	55	58.6	16	59	47.0	
5	98	49	23.6	16	53	5.3	
6	98	52	3.2	16	48	55.6	
7	98	50	56.7	16	45	59.8	
8	98	52	19.4	16	43	21.7	
9	98	54	32.0	16	35	50.7	
10	98	54	54.9	16	32	13.2	DEL 10 AL 11 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
11	99	0	34.2	16	34	16.0	
12	99	0	36.9	16	45	3.6	
13	98	57	25.1	16	46	41.1	
1	99	3	2.3	16	55	55.2	

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2013, el municipio Copala se clasifica como zona de disponibilidad 7, Ayutla de Los Libres como zona de disponibilidad 8, Cuautepec y San Luis Acatlán como zona de disponibilidad 9.

El usuario principal del agua subterránea es el doméstico. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca “Costa de Guerrero”, instalado el 29 de marzo de 2000. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS 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 de Guerrero, fuera de la zona de estudio. A continuación se presenta un resumen de los trabajos consultados, en donde se describen de manera breve los objetivos, alcances y/o conclusiones.

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 para la Comisión Nacional del Agua**. 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 de los niveles del agua subterránea. Concluye que aunque no existen evidencias de sobreexplotación debido a la constante renovación del agua alojada en los depósitos aluviales del Río Ixtapa, es necesario tener control de las extracciones y recomienda llevar a cabo un estudio de actualización hidrogeológica que incluya el censo completo de aprovechamientos, pruebas de bombeo, cálculo de la extracción y monitoreo de la calidad del agua.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS ATOYAC Y CHILPANCINGO, 2008. Realizado por GEOPSA, S. A. DE C.V. para la Comisión Nacional del Agua. Este estudio se realizó con el objetivo de evaluar condiciones geohidrológicas del acuífero para determinar su disponibilidad de aguas subterráneas, mediante actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, piezometría, muestreo del agua subterránea, definición del modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, ejecución e interpretación de pruebas de bombeo, realización de sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM´s), nivelación de brocales fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga media anual que reciben los acuíferos.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LA UNIÓN, PETATLÁN Y TECPAN EN EL ESTADO DE GUERRERO. **Elaborado por Consultoría BETSCO en 2009, para la Comisión Nacional del Agua.** 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 hidráulicos regionales, afinar el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y elaborar el balance de aguas subterráneas.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS EL NARANJITO, COYUCA, CONCHERO, PAPAGAYO, SAN MARCOS, NEXPA, COPALA Y MARQUELIA, EN EL ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por GEOPSA, S.A. de C.V. **en el 2011 para la Comisión Nacional del Agua**. El objetivo general de este estudio fue definir las condiciones geohidrológicas de los acuíferos y la evolución de los niveles del agua para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua

subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones y de los volúmenes de extracción. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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 del acuífero se encuentra ubicado en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur (Raisz, 1964); su extremo norte en la Subprovincia Cordillera Costera del Sur, que constituye la franja central de la Provincia, y la superficie restante pertenece a la Subprovincia Costas del Sur, que se extiende a lo largo de la línea de costa (INEGI, 1991).

La región presenta dos tipos de relieve, el primero de ellos formado por elevaciones topográficas de origen ígneo y metamórfico y el segundo está representado por conglomerados y sedimentos que conforman la planicie costera, los cuales están constituidos por arenas de granulometría media a fina, así como por los depósitos aluviales producto de la desintegración de las rocas preexistentes.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de climas de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, en el acuífero Copala predomina el clima cálido subhúmedo A(w). En la zona central y norte se presenta la variante de humedad intermedia A(w1), en la transición entre selvas medianas y los bosques de encino de la Sierra Madre del Sur; en la porción sur que corresponde a la planicie costera domina la variante del clima más seco A(w0).

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 2 estaciones climatológicas ubicadas dentro del acuífero: Copala y Coacoyulichan; cuyo registro comprende el periodo 1951-2010. Con estos datos, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1397 mm** y **26.5 ºC**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor promedio de **1950 mm anuales**.

3.3. Hidrología superficial

El acuífero Copala se ubica en la Región Hidrológica 20 “Costa Chica de Guerrero”, sobre la vertiente sur de la Sierra Madre del Sur. Pertenece a la Subregión Hidrológica “Costa Chica de Guerrero” y a la cuenca denominada “Río Nexpa y Otros”, que drena hacia el Océano Pacífico.

Dentro de la superficie cubierta por el acuífero existen algunas corrientes superficiales que provienen de las regiones altas. El principal escurrimiento en la zona es el Río Copala que nace en la porción más septentrional, en la Sierra Copainola; atraviesa las poblaciones Paso de Salinas, Atlixco y Copala, primero en dirección norte-sur, luego NE-SW para finalmente retomar su dirección original, hasta desembocar en el mar, en la zona del estero Los Draguitos.

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 en la región presentan un relieve abrupto y accidentado, con presencia de drenaje dendrítico; y la planicie o llanura costera donde se ha desarrollado un drenaje de tipo paralelo. El valle y la planicie están definidos por abanicos aluviales formados por el material de acarreo del Rio Copala y arroyos, entre la zona costera y las estribaciones de la Sierra Madre del Sur.

En la superficie cubierta por el acuífero se presentan diferentes unidades geomorfológicas, entre las cuales destacan las sierras y lomeríos, cauces fluviales, estuarios, lagunas litorales, bermas, mangares y playas.

4. GEOLOGÌA

La geología del Estado de Guerrero es muy compleja, ya que 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. 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 Tectonoestratigráficos Guerrero, Oaxaca, Xolapa y otros. Campa y Coney, 1983). El acuífero Copala se ubica en el Terreno Xolapa que es el más grande, pero el menos conocido de los terrenos del sur de México. Abarca un área de 70 a 100 km de ancho y 600 km de largo, paralelo a la costa del Océano Pacífico. Su historia geológica es compleja e incluye diversos episodios de deformación, intrusión y metamorfismo regional.

La geología regional de la zona se encuentra dominada por rocas metamórficas, ígneas intrusivas y depósitos recientes. La distribución de dichas rocas se muestra en la figura 2. A nivel regional la geología general del área de estudio comprende a las rocas metamórficas del Paleozoico, las calizas y lutitas del Cretácico Inferior que no afloran en el acuífero, rocas volcánicas del Paleógeno y Neógeno 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 que ocasionó el depósito de sedimentos calcáreos que dieron origen a calizas de estructura masiva.

De acuerdo con Sabanero-Sosa (1990), el Terreno Xolapa representa un terreno metaplutónico que se formó por procesos de desarrollo de corteza cuasicontinental, al lado del margen truncado por el desplazamiento del bloque Chortis al SE, durante el Eoceno, es decir, responde a una acreción constructiva. Sedlock y colaboradores (1993) señalan que el límite por falla del Terreno Xolapa con el Terreno Guerrero está completamente destruido por las intrusiones granitoides del Terciario al este de Zihuatanejo y Petatlán.

Los intrusivos de los Terrenos Guerrero y Xolapa, según dataciones isotópicas de Rb-Sr, indican un decremento en edad hacia el sureste, presentándose los intrusivos más antiguos en la zona de Puerto Vallarta, Jalisco con edades radiométricas de 80 ± 3 Ma (Cretácico Superior) y los más jóvenes en Puerto Ángel, Oaxaca con 11.2 ± 0.3 Ma (Mioceno).

Corona-Chávez *et al*. (1997), indican que el Terreno Xolapa puede ser dividido en tres grandes unidades tectónicas. La primera compuesta por una secuencia de basamento metamórfico y una serie de intrusivos que pre-datan un evento de metamorfismo y migmatización de la secuencia. La segunda unidad está integrada por secuencias de migmatitas que a su vez se puede subdividir en dos unidades compuestas por un complejo migmatítico metasedimentario y un complejo migmatítico metaígneo. Por último se presenta un batolito granítico-granodiorítico posterior a la migmatización.

4.1. Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en la región comprende un registro cuya edad varía del Paleozoico al Reciente y está conformado por rocas ígneas y metamórficas, depósitos aluviales. En la región están presentes 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 Copala 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, tiene menos de 10 km de anchura en promedio, ampliándose a 20 km o más en algunas zonas, como sucede entre los ríos Papagayo y Verde, por ejemplo.

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

Del Paleógeno se tiene un conglomerado polimíctico bien consolidado, cubierto discordantemente por andesitas de textura fanerítica y escasamente porfídica, del 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. La secuencia estratigráfica se describe a continuación:

Rocas Metamórficas Paleozoicas

Esta unidad es un complejo de rocas metamórficas que pertenecen al Complejo Xolapa, representadas por esquistos, gneis de biotita, mármol y anfibolitas. Este complejo metamórfico consta de dos grandes grupos de rocas cuya unidad más antigua está constituida por paragneises, esquistos pelíticos, esquistos de biotita y cuarcita, cuyos protolitos sedimentarios son interpretados como interestratificaciones de grauwacas, rocas pelíticas y carbonatos. El segundo grupo es el más ampliamente distribuido y su litología consiste principalmente de ortogneises, anfibolitas y migmatitas en facies de anfibolita. En este grupo se desarrolló un metamorfismo de alto grado y una migmatización a gran escala.

Estas rocas se encuentran ampliamente distribuidas en toda la porción central y norte del acuífero, conformando una franja orientada en sentido NW-SE. Por su constitución litológica y por tratarse de una roca consolidada, esta unidad se considera impermeable, ya que funciona como una barrera natural al flujo del agua subterránea. Sólo cuando presentan alteración y fracturamiento son capaces de transmitir y almacenar agua subterránea.

Calizas, lutitas y areniscas del Cretácico Inferior

Las rocas de esta unidad no afloran en el área del acuífero. Consisten 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. También se incluye una secuencia de lutitas y areniscas. De acuerdo con su constitución litológica, su permeabilidad es baja y sólo cuando porosidad secundaria por fracturamiento permite el flujo del agua subterránea.

Rocas ígneas intrusivas

Estas rocas se emplazaron posteriormente a la acreción del Complejo Xolapa, sus principales afloramientos en las porciones norte, suroriental del acuífero y de manera aislada en la región central. Se trata de cuerpos de composición granítico-granodiorítico que afectaron la secuencia del Terreno Xolapa, cuya edad se considera que corresponde al Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Este cuerpo granítico forma parte del gran batolito de la costa de Guerrero. Se encuentran muy alteradas y fracturadas en su porción superior, razón por la cual en algunas zonas se han formado suelos como consecuencia del intenso intemperismo y la erosión a la que han sido sujetas. 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. A esta misma unidad pertenecen las rocas graníticas y granodioríticas del Terciario que afloran al sureste del acuífero.

Depósitos aluviales

Cubre a las rocas metamórficas e ígneas intrusivas ya que son producto de su alteración. Están constituidos por arenas finas-medias, transportadas 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. Tienen buena porosidad y alta permeabilidad debido a la naturaleza propia de los materiales que lo conforman; sin embargo presentan una distribución muy restringida.

Depósitos 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. Constituidos principalmente por gravas gruesas, arenas y limos, de permeabilidad alta que superficialmente facilita la infiltración del agua de lluvia; además, esta unidad es susceptible de inundarse durante las crecientes de los arroyos, razón por la cual puede llegar a funcionar como acuífero, cuando presenta un mayor espesor.

Depósitos Litorales

Esta unidad está conformada por arenas de granulometría media y fina que cubren la zona costera, depositados por la acción del oleaje y del viento. Presentan alta permeabilidad.

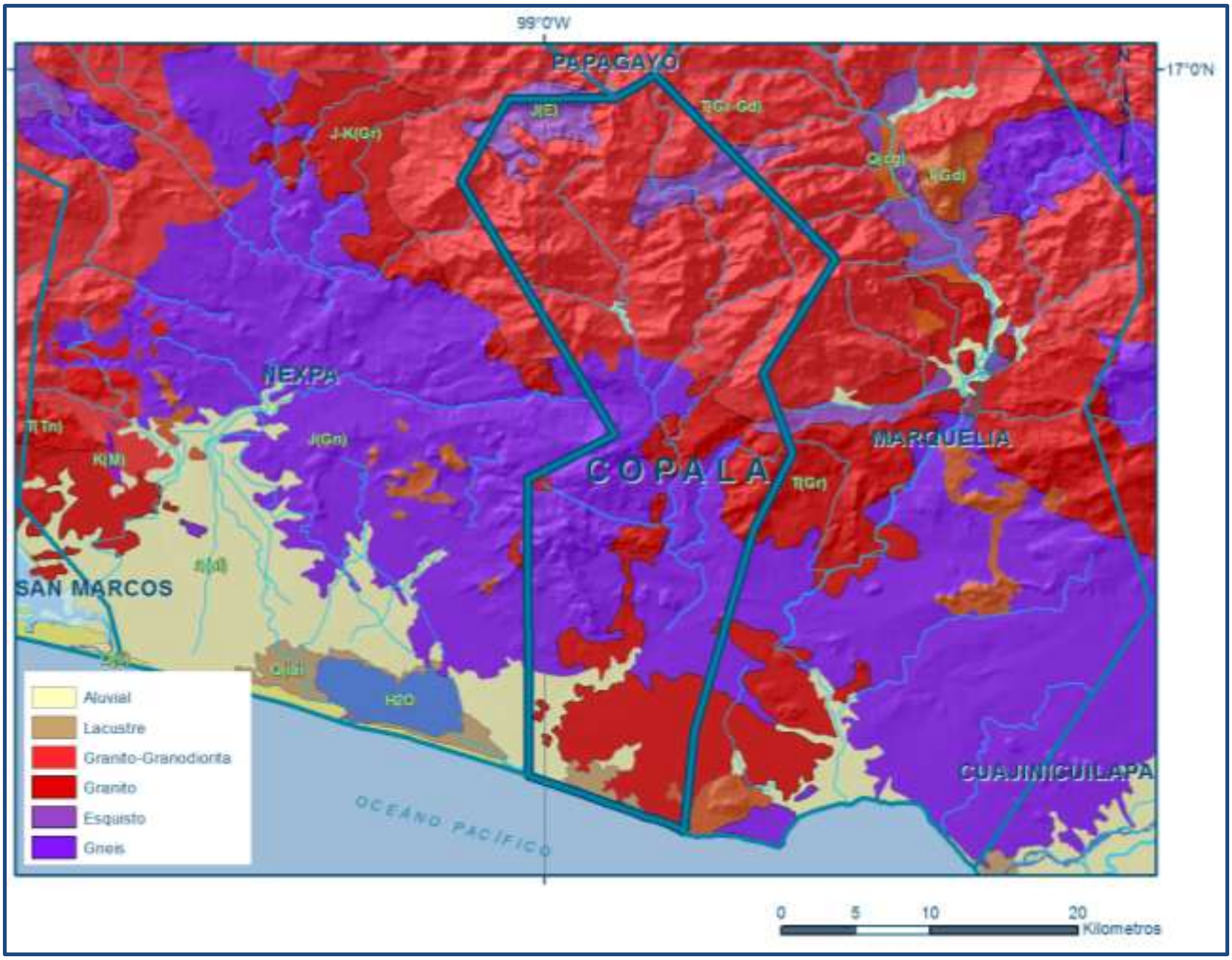


Figura 2. Geología general del acuífero

4.2. Geología del subsuelo

La geología estructural está influenciada por la complejidad tectónica que presenta la zona. 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, 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.

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, aluviales y conglomerados que constituyen el lecho y la

llanura de inundación de los arroyos y la planicie costera, cuyo espesor varía desde algunos metros en las estribaciones de la sierra, incrementándose ligeramente en las inmediaciones de los cauces de los arroyos, hasta alcanzar algunas decenas de metros en la planicie costera. La porción inferior se aloja en un medio fracturado conformado por rocas ígneas intrusivas que presentan porosidad secundaria por fracturamiento y alteración, cuyo espesor varía de unos cuantos metros hasta alcanzar 50 m en algunas zonas; sin embargo, su promedio es de 30 m. El espesor del acuífero (granular y fracturado, alcanza los 80 m, de acuerdo con las perforaciones y las exploraciones geofísicas realizadas en la región.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas ígneas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración. El basamento geohidrológico regional está constituido por las rocas metamórficas y metasedimentarias.

5. HIDROGEOLOGIA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido por dos medios: el superior de tipo granular y el inferior fracturado.

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 alta y se ubican en la proximidad del cauce de los ríos y arroyos, así como en la angosta planicie costera en donde alcanzan su mayor espesor que es de algunas decenas de metros. El medio fracturado está constituido por rocas ígneas intrusivas que presentan porosidad secundaria por fracturamiento y alteración, cuyo espesor promedio es de 30 m. Las rocas metamórficas y metasedimentarias cuando presentan fracturamiento y alteración son capaces de trasmitir y almacenar el agua de lluvia.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2011, se realizaron 10 pruebas de bombeo de corta duración, la mayoría de ellas en norias, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 8 a 11 horas, en aprovechamientos que extraen agua, tanto de los materiales granulares como los de las zonas alteradas de las rocas ígneas que afloran en la región.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **4.96 x10^{-4} a 3.71 x10^{-3} m^2/s (42.8 a 320.5 m^2/d)**. De acuerdo con el espesor saturado la conductividad hidráulica varía de **9.92 x10^{-6} m/s (0.9 m/d)** a **7.93 x 10^{-5} m/s (6.8 m/d)**, consistentes con los valores obtenidos en los acuíferos vecinos. Los valores más altos corresponden a los depósitos granulares de granulometría gruesa y los más bajos se asocian a la parte alterada, con presencia de arcillas, de las rocas graníticas y metamórficas.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor el coeficiente de almacenamiento.

5.3. Piezometría

No existe registro piezométrico histórico consistente debido a que no se tiene definida una red de monitoreo. Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró únicamente la información recabada durante el estudio realizado en 2011.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La configuración de la profundidad al nivel estático presenta valores, medidos principalmente en norias, que varían de 1 a 5 m conforme se asciende topográficamente de la zona costera hacia las estribaciones de las sierras y hacia Copala. Los valores más someros se registran en la zona más cercana a la costa (figura 3).

5.4.1. Elevación del nivel estático

De acuerdo a la configuración de elevación del nivel estático para el año 2011, se registran valores que varían de 30 a 1 msnm, decreciendo desde las partes altas del acuífero, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando la dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur, hacia la zona costera (figura 4).

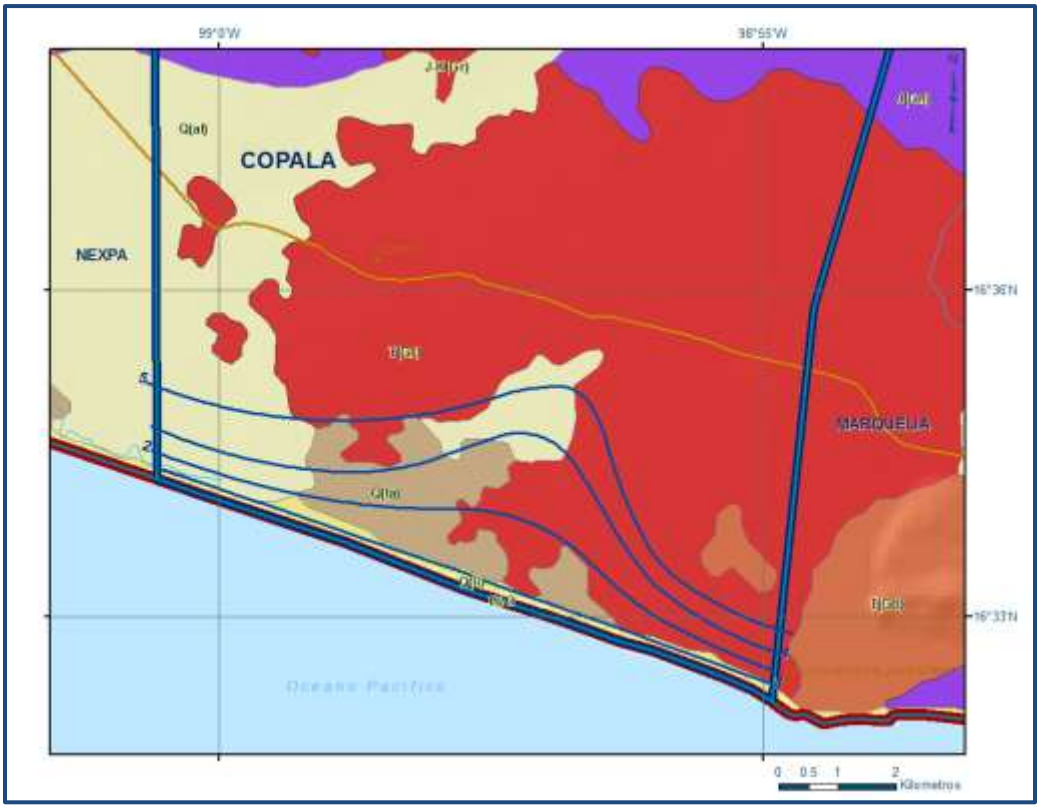


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2011)

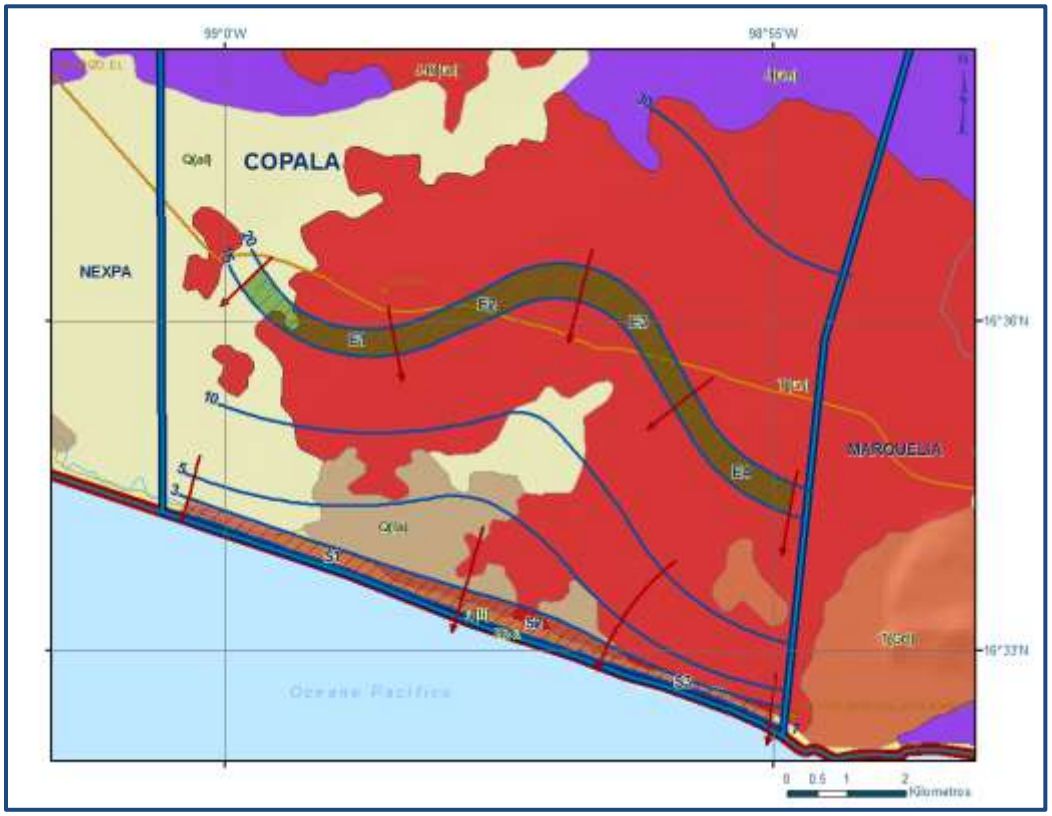


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

5.4.2. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en algunos recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio. Además, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción. 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.

Las mediciones realizadas en el año 2011 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2011, se tomaron 15 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), nitratos, dureza, sólidos totales disueltos (STD) y dureza total.

De los resultados de los análisis se determina que las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de STD para el agua destinada al consumo humano y por lo tanto para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos varía de 85 a 725 mg/lt. Sólo la muestra 5 registró una concentración de STD de 1020 mg/lt.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion predominante, la familia dominante es la cálcica-mixta

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2011, se registraron un total de 80 aprovechamientos del agua subterránea, todos ellos activos: 51 pozos (la mayoría de ellos “puyones” de PVC generalmente de 2 a 4 pulgadas de diámetro) y 29 norias.

El volumen total de extracción asciende a **2.3 hm^3/año**, de los cuales 2.0 hm^3 (87.0%) se destina al uso doméstico y 0.3 hm^3 (13.0%) para uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2011, en una superficie de **65 km^2** 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:

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de masa

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

Recarga total - Descarga total = 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, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en la red de distribución de agua potable, constituye otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Debido a que el volumen destinado al uso agrícola es muy pequeño, no se considera la recarga inducida.

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:

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

Donde:

Rv: Infiltración por lluvia

Eh: Recarga por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real

∆V(S): Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del 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.

Para el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2011, mostrada en la figura 4. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{Q = T \cdot B \cdot i}$$

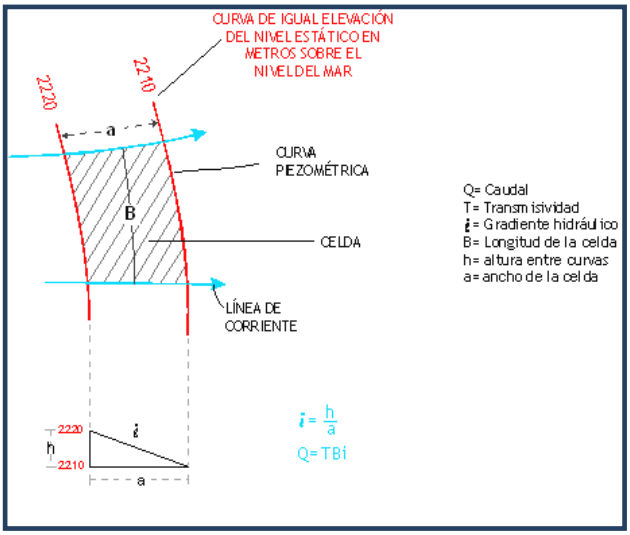
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

T = Transmisividad (m^2/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda, el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **8.0 hm^3 anuales.**

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 2011 y otros previos en acuíferos vecinos, adaptados al espesor saturado.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas (2011)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
E1	2885	460	5	0.0109	0.0015	0.0470	1.5
E2	2820	590	5	0.0085	0.0015	0.0358	1.1
E3	2620	525	5	0.0095	0.0035	0.0873	2.8
E4	2620	555	5	0.0090	0.0035	0.0826	2.6
						Total entradas	**8.0**

7.2. Salidas

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

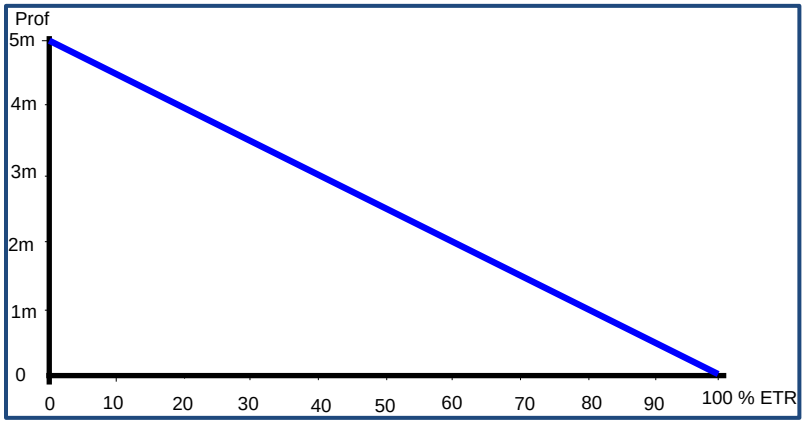
7.2.1. Evapotranspiración (ETR)

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 = 26.5 °C y precipitación=1397 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 1162.3 mm.

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

T (°C) =	26.5		
P(mm) =	1397	P^2 =	1951609
L =	1892.98125	L^2 =	3583378.01
ETR (mm)	**1162.3**		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



Considerando que en una superficie de 25.0 km^2, a lo largo de la zona costera, la profundidad media al nivel estático es de 2.5 m, de acuerdo con la relación lineal mostrada, le corresponde un 50% de la lámina de ETR obtenida. Por lo tanto ETR = (25 km^2) (1.1623 m) (0.5) = 14.5 hm^3

ETR = 14.5 hm^3/año

7.2.2. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción por bombeo es de **2.3 hm^3/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 para el año 2011, presentada en la figura 4. Su valor es de **2.8 hm^3 anuales**, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas (2011)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
S1	5050	395	2	0.0051	0.0015	0.0384	1.2
S2	2690	460	2	0.0043	0.0015	0.0175	0.6
S3	2820	260	2	0.0077	0.0015	0.0325	1.0
						Total salidas	**2.8**

7.3. Cambio de almacenamiento ∆V(S)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no existe información piezométrica histórica para la elaboración de la configuración de la evolución del nivel estático. Las escasas mediciones se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la superficie aluvial. Los niveles del agua subterránea tienen cambios estacionales: durante las lluvias responden de manera muy rápida al efecto de la recarga y tienen una recuperación, en tanto que durante la época de estiaje se producen abatimientos.

Por lo tanto, para fines del balance de aguas subterráneas, se considera que no existen variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea. **ΔV(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:

$$Rv = Sh + B + ETR \pm \Delta V(S) - Eh$$
$$Rv = 2.8 + 2.3 + 14.5 - 0.0 - 8.0$$
$$Rv = 11.6\ hm^3 \text{ anuales}$$

Por lo tanto, la recarga total (Rt) es igual a al asuma de todas las entradas

$$\mathbf{Rt = Rv + Eh}$$

$$\mathbf{Rt = 11.6 – 8.0}$$

$$\mathbf{Rt = 19.6\ hm^3\ anuales}$$

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:

$$\mathbf{DAS = Rt – DNCOM- VCAS \qquad (3)}$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica.

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida.

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

8.1. Recarga total (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. En este caso, su valor es de **19.6 hm^3/año**.

8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)

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 **10.1 hm^3** anuales, de los cuales 2.8 hm^3 corresponden a la salidas por flujo subterráneo hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina y 7.3 hm^3 al 50 % de la evapotranspiración en la zona costera que deben preservarse para proteger la vegetación ribereña y el ecosistema costero.

8.3. Volumen concesionado de agua subterránea (VCAS)

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 **31 de marzo de 2013** es de **359,666 m^3/año.**

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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 aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

$$\mathbf{DAS = Rt - DNCOM - VCAS}$$
$$\mathbf{DAS = 19.6 - 10.1 - 0.359666}$$
$$\mathbf{DAS = 9.140334\ hm^3/año}$$

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **9’140,334 m^3** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2003. Actualización de las Mediciones Piezométricas en los acuíferos Ixtapa, Bahía de Zihuatanejo y Bahía de Acapulco, Estado de Guerrero. Elaborado por Consultoría BESTCO, S.A de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2009. Actualización Geohidrológica de los Acuiferos Atoyac y Chilpancingo. Elaborado por GEOPSA, S.A. de C.V.

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.

Comisión Nacional del Agua, 2011. Estudio Geohidrológico para Determinar la Disponibilidad de los Acuiferos El Naranjito, Coyuca, Conchero, Papagayo, San Marcos, Nexpa, Copala y Marquelia, en el Estado de Guerrero. Elaborado por GEOPSA, S.A. de C.V.