



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LA SABANA (1227) 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 TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	7
3.1	Provincia fisiográfica.....	7
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía	9
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGÍA	10
4.1	Estratigrafía.....	11
4.2	Geología estructural	13
4.3	Geología del subsuelo	14
5	HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1	Tipo de acuífero	14
5.2	Parámetros hidráulicos.....	15
5.3	Piezometría	15
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 HIDROMETRÍA	20
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1	Entradas	21
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	22
7.2	Salidas.....	23
7.2.1	Extracción por bombeo (B).....	23
7.2.2	Salidas subterráneas (Sh).....	23
7.2.3	Salidas por flujo base (fb)	24
7.2.4	Evapotranspiración (ETR).....	24
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	27
8	DISPONIBILIDAD	27
8.1	Recarga total media anual (R).....	28
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	28
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	29
9	BIBLIOGRAFÍA	30

1 GENERALIDADES

Antecedentes

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

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

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

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

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

1.1 Localización

El acuífero La Sabana, definido con la clave 1227 por la Comisión Nacional del Agua, abarca una superficie de **986 km²** del extremo sur del estado de Guerrero, el acuífero se localiza entre el Océano Pacífico y la Sierra Madre del Sur, en la región conocida como Costa Grande de Guerrero (Figura 1).



Figura 1. Localización del acuífero

La zona de estudio se encuentra delimitada por los paralelos $16^{\circ} 42'$ y $17^{\circ} 11'$ de latitud norte y los meridianos $99^{\circ} 54'$ y $99^{\circ} 37'$ de longitud oeste Colinda al norte y oriente con el acuífero Papagayo, al occidente con El Conchero, al suroccidente con el acuífero Bahía de Acapulco y al sur con el Océano Pacífico. 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

ACUÍFERO 1227 LA SABANA							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	37	29.7	16	50	19.8	
2	99	40	59.6	16	48	25.5	
3	99	40	59.9	16	42	18.4	DEL 3 AL 4 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
4	99	50	18.4	16	47	1.9	
5	99	49	34.9	16	48	31.1	
6	99	49	55.2	16	49	43.9	
7	99	49	45.7	16	51	20.4	
8	99	50	5.5	16	52	19.7	
9	99	51	0.0	16	52	21.5	
10	99	52	38.8	16	53	18.0	
11	99	53	29.4	16	52	43.0	
12	99	51	52.7	16	55	15.7	
13	99	51	7.5	16	58	5.5	
14	99	49	6.8	16	58	50.7	
15	99	53	38.9	17	8	17.8	
16	99	53	23.7	17	9	59.0	
17	99	48	18.4	17	10	25.3	
18	99	45	6.9	17	10	41.1	
19	99	42	58.0	17	10	19.7	
20	99	41	19.7	17	9	33.7	
21	99	39	14.9	17	4	56.9	
22	99	40	36.8	17	0	57.2	
23	99	37	47.1	16	57	14.6	
1	99	37	29.7	16	50	19.8	

El acuífero se localiza casi totalmente dentro del municipio de Acapulco de Juárez, con una pequeña porción dentro de Coyuca de Benítez, destacando en él las poblaciones de Acapulco, La Sabana, Xaltianguis y Tres Palos.

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece a la región Hidrológico-Administrativa V Pacífico Sur y se encuentra sujeto a la disposición del decreto de veda, tipo II, "Municipios de Acapulco, Coyuca de Benítez, Juan R. Escudero, San Marcos, Mochitlán y Chilpancingo", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 13 de febrero de 1975. De acuerdo con el, sólo se permiten extracciones para usos prioritarios "únicamente en los casos en que de los estudios relativos se concluya que no se causarán los perjuicios que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse" y establece que, "excepto cuando se trate de extracciones para uso doméstico y de abrevadero que se realicen por medios manuales, desde la vigencia del decreto nadie podrá ejecutar obras de alumbramiento aguas del subsuelo dentro de la zona vedada sin contar con la autorización" de la Autoridad del Agua.

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

Tanto la zona turística del puerto de Acapulco como la población urbana y la localidad La Sabana tienen como fuente principal de abastecimiento de agua potable y para servicios los pozos radiales localizados en las márgenes del Río Papagayo, localizado en el acuífero Papagayo, así como una toma directa de este río.

El principal usuario del agua subterránea es el organismo operador de agua potable del municipio: Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del municipio de Acapulco (CAPAMA). En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero y la región aledaña se han realizado algunos estudios hidrogeológicos con el fin de evaluar el potencial tanto para abastecimiento de agua potable a los centros urbanos como para los servicios de la zona turística. A continuación mencionan los más relevantes y sus principales conclusiones.

“Estudio de Actualización Geohidrológica en la Cuenca del Río La Sabana, en Acapulco, Gro.”. 1983. realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S. A. Consultores para la SARH En este estudio se definen las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas que rigen el funcionamiento hidrodinámico del acuífero localizado en el acuífero La Sabana, con el propósito de determinar la variación temporal de la recarga y analizar la posibilidad de extraer un caudal mínimo de 500 lps para el abastecimiento del Puerto de Acapulco.

Se lleva a cabo un análisis de la situación actual de la batería de pozos y se propone un programa de rehabilitación, reposición y operación de pozos para la extracción de 480 lps que garantizaban el abastecimiento de la población y la zona turística.

Como parte de sus recomendaciones se propone un programa bimestral de piezometría de los pozos y muestreo de aguas, tanto subterráneas como del Río la Sabana, con el propósito de contar con un registro de la evolución de la cantidad y calidad del agua. El valor de la recarga media anual que el acuífero fue calculada en 7.8 hm³.

“Definición de Fuentes de Abastecimiento y Anteproyecto para el Puerto de Acapulco.”. 1987. Realizado por Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S. A. de C. V. para la SARH Se analiza el problema de abastecimiento y se definen alternativas de solución.

Se concluye que el Río Coyuca tiene el potencial para el suministro de agua potable, pero para garantizar plenamente el gasto de diseño sería necesaria la construcción de una presa de almacenamiento. Esta alternativa tiene la gran desventaja de no contar con infraestructura.

Por otra parte, se dice que la solución al problema de azolves en la obra de toma directa del Río Papagayo, se resolvería con la construcción de galerías filtrantes que captarían un volumen de diseño de $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Esta es la opción que se elige y se elabora el anteproyecto para construcción y funcionamiento.

“Estudio geohidrológico del Valle de la Sabana-La Zanja, Punta Diamante, Municipio de Acapulco, Guerrero.”. 1999. Realizado por Ingeniería y Procesamiento Electrónico, S.A de C. V. para la CNA En este estudio se define la actualización de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas que rigen el funcionamiento hidrodinámico del acuífero, determinando sus características de recarga y descarga, así como su capacidad de almacenamiento. Contempla actividades de geofísica, muestreo de agua, censo de aprovechamiento, piezometría y pruebas de bombeo

“Evaluación Hidrogeológica del Acuífero La Sabana, Guerrero.” 2003. Realizado por la empresa Proyectos Antares, S.A. de C.V. para la CNA. El estudio concluye no existe cambio de almacenamiento en el acuífero, por lo que las entradas son de la misma magnitud que las salidas. Se estima que la recarga total media anual que recibe el acuífero es de 92 hm^3 , con un bombeo del orden de los 28 hm^3 . La disponibilidad calculada es de 64 hm^3 anuales.

Entre sus recomendaciones principales destaca las campañas de cloración y de toma de muestras para análisis de las aguas subterráneas; completar el censo de aprovechamientos; realizar sondeos eléctricos verticales y el diseño de una red de monitoreo para la medición de los niveles del agua subterránea.

“Actualización de las mediciones piezométricas en los acuíferos de Ixtapa, Bahía de Zihuatanejo y Bahía de Acapulco, estado de Guerrero”.2003 Realizado por la empresa Consultoría BETSCO, S. A. de C.V. para la CNA. 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.

Concluye que, aunque no existen evidencias de sobreexplotación debido a la constante renovación del agua alojada en los depósitos aluviales, si es necesario tener control de las extracciones.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El área se localiza dentro de la provincia fisiográfica denominada “Sierra Madre del Sur” (Raisz, 1964), la cual comprende desde el estado de Nayarit hasta el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca y constituye una región de enorme complejidad estructural debido a la presencia de varios dominios tectónicos yuxtapuestos.

Su segmento más septentrional está constituido por afloramientos de secuencias mesozoicas, tanto sedimentarias de plataforma como volcánico-sedimentarias de tipo arco insular. Limita al norte con la cadena montañosa de origen volcánico conocida como Eje Neovolcánico, al oriente con la subprovincia de la Plataforma Cretácica de Morelos y Guerrero.

De manera particular, la zona en donde se ubica el acuífero La Sabana pertenece a las subprovincias de la Vertiente Meridional y Planicie Costera del Pacífico. La región pacífica de la Sierra Madre del Sur, correspondiente al norte del estado de Guerrero, presenta afloramientos extensos de rocas volcánicas andesíticas interestratificadas con capas rojas de limonita, conglomerado volcánico y capas de caliza arrecifal, rocas metamórficas del Paleozoico, así como rocas intrusivas de composición granítica.

La planicie costera está conformada por materiales clásticos del Cenozoico (boleos, gravas, arenas, limos y arcillas), formando depósitos de litoral, aluviales, deltáicos y eólicos. En lo que respecta al valle, está representado por una llanura aluvial, limitada por macizos montañosos esculpados por el cauce, del río La Sabana.

En la zona costera destaca la presencia de la Laguna de Tres Palos. Es posible distinguir tres zonas fisiográficas en toda esta porción del estado: La primera se localiza en la zonas de bahías y corresponde con la zona montañosa constituida por rocas metamórficas; las depresiones graníticas que forman pequeños valles que han sido rellenados por los productos de la erosión de las rocas preexistentes y las corrientes aluviales. La tercera zona corresponde con los depósitos de barra que forman las lagunas de Coyuca o Pie de la Cuesta y la Laguna de Nahuala o de Tres Palos.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de climas de Köppen, modificados por E. García (1964), el clima imperante dentro del área de estudio es del tipo (Awgi), que corresponde a clima de sabana, cálido por su temperatura y subhúmedo por su precipitación. Varía desde cálido subhúmedo en la planicie costera, hasta subhúmedo semicálido en las partes altas de la cuenca. Esta clasificación se basa en que la temperatura media anual del mes más frío es mayor de 18° C, con lluvias en verano y oscilación de temperatura menor de 5 °C, siendo junio el mes más cálido.

Para el análisis de las condiciones climáticas de la región, se analizó la información de 8 estaciones climatológicas, ubicadas tanto dentro del acuífero como en su entorno cercano: San Marcos, Laguna de Tres Palos, Acapulco, Kilómetro 21, Tuncingo, Laguna de Coyuca, Chacalapa y La Sabana, con un registro que comprende el periodo 1981-2002.

La precipitación pluvial presenta su temporada principal de lluvias en verano, extendiéndose hasta el otoño (mayo-octubre) y la del estiaje de noviembre a mayo. Los valores registrados varían de 1017 a 1295 mm, con una media anual de **1,035.5 mm**, calculada por el método de isoyetas. La temperatura media mensual varía entre los 25 y 33 °C, con los valores más bajos hacia las porciones montañosas y los más altos hacia la costa, siendo junio el mes más caluroso. Los valores medios anuales varían entre los 25 y 28 °C, con valores extremos de 25 y 34 °C, dependiendo de la altura sobre el nivel medio del mar, y un promedio de **26.5 °C**. El valor de la evaporación potencial varía de los 1,100 a 2,900 mm anuales, con una media anual de **2,480 mm** mayor que la precipitación, excepto para los meses de junio a septiembre cuando se registran los valores más altos de lluvia.

3.3 Hidrografía

El área de estudio, sobre la cual se vierten las aguas del río La Sabana, pertenece a la Región Hidrológica No. 19 denominada Costa Grande de Guerrero, cuenca "A" Río Atoyac y Otros, subcuenca del Río La Sabana. Dicha cuenca abarca a todos los ríos comprendidos entre la desembocadura del Río Balsas y hasta el límite con la cuenca "A" Río Atoyac y otros, en el estado de Guerrero. En esta cuenca los escurrimientos más importantes tienen su origen en las partes altas de la Sierra Madre del Sur; entre ellos se encuentran los ríos La Sabana, Papagayo, Atoyac, Tecpan, San Luis y Coyuca. El río La Sabana tiene origen en el cerro de San Nicolás de la Sierra Madre del Sur, a una altura de 1,600 msnm, con el nombre de Aguacatillo y recorre una longitud de casi 57 km hasta su confluencia en la laguna de Tres Palos.

A lo largo de la zona, desde el ejido La Venta, pasando por las localidades de La Sabana, El Cayaco y Tres Palos, el cauce del río se ensancha, en su entrada al valle, lo que origina un abanico aluvial que, a su vez, produce numerosos meandros a través de su recorrido. En la región de Acapulco y La Sabana los principales elementos hidrográficos que la rodean son los ríos La Sabana y Papagayo, y las lagunas de Coyuca y de Tres Palos. Sin embargo, en la zona de la bahía no existen elementos hidrográficos importantes; ya que sólo existen escorrentías intermitentes a lo largo de las rocas graníticas que generalmente son captadas por el sistema de drenaje de la ciudad. Salvo los pozos radiales que abastecen al complejo turístico de Acapulco y a la zona urbana de la bahía, así como el acueducto que conduce el agua extraída, no existe infraestructura hidráulica de mayor importancia en la zona. Actualmente se encuentra en proceso construcción la presa hidroeléctrica "La Parota", sobre el río Papagayo.

3.4 Geomorfología

Geomorfológicamente, la región de estudio está situada dentro de la llamada "Planicie Costera Sudoccidental", misma que pertenece a las estribaciones de la Sierra Madre del Sur, formada por la acreción de rocas de muy diferentes edades y ambientes geológicos de origen distinto; que por el estado actual de erosión origina un paisaje de llanura aluvial, con pendiente hacia el Océano Pacífico; el agua superficial drena, naturalmente, a través de múltiples arroyos que existen en la zona, mientras que el río La Sabana confluye en la laguna de Tres Palos, situada en la porción suroriental de la misma.

Rodeada por serranías con morfología irregular, las sierras de El Veladero y Timuchal, limitan a la región hacia la porción surponiente, dando origen a la bahía de Puerto Marqués, formada cuando el mar se introdujo al continente; mientras que el valle, de origen aluvial, se formó por el río La Sabana, con relieve plano en casi toda el área de estudio y ligeramente ondulado en algunos sitios.

La región se encuentra en continuo rejuvenecimiento por la intensa actividad a la que se encuentra sujeta por la posición que guarda con respecto a los movimientos tectónicos recientes. Las partes altas tienen un perfil agudo, con escarpes profundos y afilados que el valle es amplio. La red fluvial está bien integrada, de tipo dendrítico, cuyo colector principal es el río La Sabana.

El relieve es juvenil y sumamente accidentado debido a que la región se encuentra en continuo rejuvenecimiento por la intensa actividad derivada de los movimientos tectónicos recientes y constantes.

4 GEOLOGÍA

La geología general del área de estudio comprende a las rocas metamórficas del Paleozoico, las rocas volcánicas del Terciario, 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. Con excepción de los materiales del granulares que rellenan la bahía, las demás unidades se consideran impermeables para fines hidrogeológicos (Figura 2)

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.

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, Tehuantepec y otros).

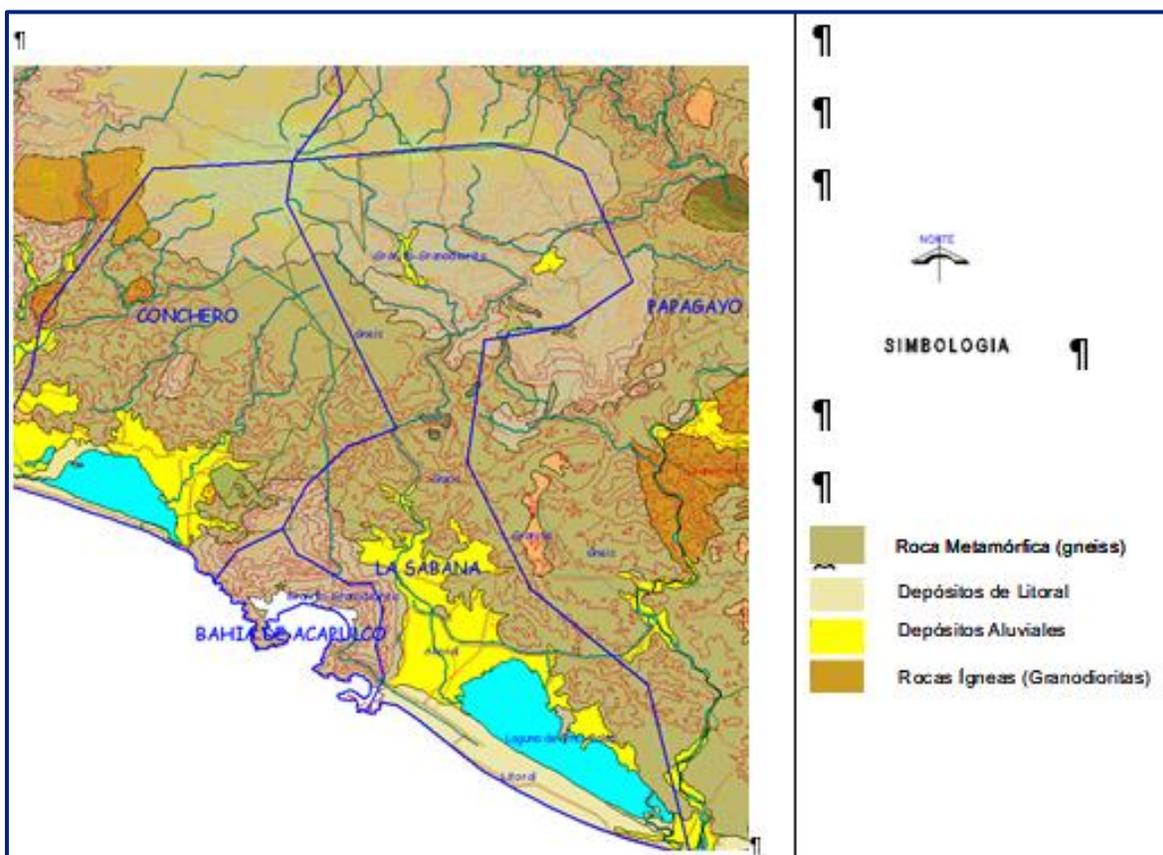


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

El registro estratigráfico comprende del Precámbrico al Reciente y está conformado por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias. A continuación, se describe la columna estratigráfica local, de la unidad más antigua a la más reciente.

Rocas Metamórficas Precámbricas (Pmet)

Esta unidad es un complejo de rocas metamórficas representado cuya edad ha sido motivo de discusión. Para algunos autores pertenece al Precámbrico (Fernando Ortega et al. 1976) y para otros al Paleozoico (Zoltán De Cserna, 1965, G. Tolson, 1997), quienes las asocian al Complejo Xolapa.

Este complejo metamórfico se presenta formando una banda de 50 a 100 km de ancho en los estados de Guerrero y Oaxaca, con características de estar afectado por intrusiones de numerosos plutones graníticos paleogenéticos. Consta de dos grandes grupos de rocas de distinta edad.

La 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. Su edad se considera que es de 1000 a 1,300 Ma. El segundo grupo es el más ampliamente distribuido, cuya litología consiste principalmente de ortogneises, anfíbolitas y migmatitas en facies de anfíbolita. En este grupo se desarrolló un metamorfismo de alto grado y una migmatización a gran escala, que ocurrió entre 66 y 46 Ma.

Estas rocas afloran en la parte norte de la Bahía de Acapulco formando la zona montañosa que rodea a la Bahía de Acapulco. 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.

Rocas ígneas intrusivas (Kig)

A este grupo pertenecen las rocas ígneas intrusivas emplazadas después de la acreción del complejo Xolapa, como producto del magnetismo que formó el batolito de Acapulco. Se caracteriza por presentar una serie de cuerpos intrusivos de composición granítica, granodiorítica y diorítica, cuyas edades se han calculado en el periodo Eoceno (43-48 Ma). Presenta sistemas de fracturamiento que al penetrar a profundidad puede llegar a separarlas en bloques individuales. Se encuentran aflorando al norte de la bahía y al estar inclinado hacia el sur formó la depresión en la que actualmente se aloja la ciudad de Acapulco.

Al presentarse alterada y fracturada en la porción superior, se ha visto que es capaz de almacenar pequeñas cantidades de agua y transmitirlos hacia los depósitos granulares que constituyen la planicie costera.

Depósitos Aluviales (Qal)

Esta unidad aflora ampliamente en la zona de menor elevación de la cuenca, cubriendo a las rocas metamórficas del Complejo Xolapa y a las rocas ígneas intrusivas, de las cuales se originan. Están conformados por arcillas, limos, arenas y gravas, formadas como producto de la erosión de la secuencia metamórfica y granítica descrita previamente. Están constituidos por depósitos de arenas, cuando se originan de la desintegración de las rocas graníticas, y de limos y arcillas cuando proceden de la erosión de rocas metamórficas.

Los depósitos derivados de las rocas ígneas tienen una mayor distribución en el área de la Bahía de Acapulco; estos se encuentran en las partes protegidas de los valles principales y en la región costera y en las desembocaduras de ríos y arroyos pequeños que descienden de las partes altas; mientras que los depósitos derivados de las rocas metamórficas se limitan a la región de la laguna de Tres Palos. Por su constitución, buena porosidad y permeabilidad, se considera a esta unidad como la principal unidad acuífera de la bahía.

Depósitos de playa (Qp)

Corresponden con los sedimentos depositados por la acción del viento y las olas marinas que forman los depósitos de barra adyacentes a las lagunas de Pie de la Cuesta y de Tres Palos. También se incluyen dentro de esta unidad a los depósitos de playa. Por su buena porosidad y permeabilidad, se consideran de interés hidrogeológico ya que son capaces de almacenar y transmitir el agua subterránea.

4.2 Geología estructural

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 y que le imprimen un particular rasgo a toda esta región del sur del país.

Una de las regiones de mayor complejidad tectónica y estructural es el complejo Xolapa, que se encuentra conformado por gneiss, esquisto, granito, granito gneissico y augeneisses típicos del metamorfismo de grado medio, de facies anfibolítica, migmatita de grado alto y un cuerpo granítico de dimensiones batolíticas; todos ellos se encuentran afectados por diques pegmatíticos y peridotíticos de carácter sinplutónico. Además, se observa en este complejo fracturamiento multidireccional e intemperismo profundo en las rocas más antiguas, y somero en las más recientes.

Como resultado de los procesos geológicos que han conformado la secuencia litológica en la zona de interés, 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 en la cuenca.

Cabe aclarar que, aunque es una provincia fisiográfica que tiene cierta unidad, la geomorfología de la Sierra Madre del Sur es diferente según las unidades de que se trate, así en la porción sur de Michoacán y oeste de Guerrero aparecen grandes batolitos mesozoicos que intrusionaron a rocas metasedimentarias y metavolcánicas paleozoicas, las que están cubiertas por rocas extrusivas (andesitas), que forman el parteaguas de la sierra de Guerrero.

Los pliegues de los bloques tectónicos de las cuencas de Balsas, Morelos, Guerrero y Tlaxiaco, que limitan a la Sierra Madre, al norte, presentan un rumbo norte-sur, así como grandes fallas con dirección E-W. En general, la Sierra Madre del Sur ha sido afectada por diferentes orogenias, desde las Pre-Cámbricas: Cascadiana y Grenvilliana, la equivalente a la Taconiana (Ordovícico), Apalachiana (fines del Paleozoico); la Nevadiana (Jurásico-Cretácico), y la Laramídica (Cretácico Superior-Terciario).

4.3 Geología del subsuelo

Con base en la información geológica, la integración de los sondeos geofísicos realizados en el área de interés y algunos cortes litológicos de los pozos exploratorios perforados como parte del estudio realizado en 1999, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado en los sedimentos fluviales y aluviales depositados por el río La Sabana y sus afluentes principales; y de litoral que constituyen el subsuelo de la región costera. Su espesor varía de algunos metros en las estribaciones de las sierras, hasta algunas decenas de metros, en la planicie costera. Dependiendo de la naturaleza de los materiales o rocas con los que se encuentra en contacto, hacia la parte alta de la cuenca los límites lateral e inferior del acuífero están constituidos por las rocas metamórficas y graníticas que constituyen el basamento y las barreras al flujo subterráneo.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero es de **tipo libre**, permeabilidad media a alta, alojado en los sedimentos aluviales y fluviales depositados por el río La Sabana, y de litoral en la zona costera; de reducidas dimensiones tanto en sentido horizontal como vertical y poca capacidad de almacenamiento, que tiene como principal fuente de recarga a la lluvia y a los escurrimientos superficiales que se producen durante la temporada de lluvias.

Su espesor varía desde algunos metros, en las estribaciones de los piedemonte, hasta algunas decenas de metros en la planicie costera y tiene como basamento y fronteras laterales al flujo subterráneo a las rocas graníticas.

Este es el acuífero en explotación en la región y constituye la fuente principal de abastecimiento para uso público-urbano, no sólo de las poblaciones asentadas dentro del acuífero, sino también de la población y zona turística de Acapulco. Tanto el basamento como las fronteras laterales al flujo subterráneo están conformados por las rocas metamórficas y graníticas. Este es el acuífero en explotación y la única fuente de abastecimiento de la población y del sector agrícola en este acuífero.

5.2 Parámetros hidráulicos

La información de los parámetros hidráulicos procede de la interpretación de 29 pruebas de bombeo previas (5 del estudio realizado por Proyectos Antares, S. A. de C.V.) y 22 más de estudios previos a ese. En ambos casos se interpretaron por los métodos convencionales de Neuman, Jacob y Hantush. Las pruebas se ejecutaron tanto en etapa de abatimiento como de recuperación y el tiempo de bombeo varió de 1 a 6 horas.

Los resultados de su interpretación reportan valores de transmisividad varían de 1.5 a $120 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, dependiendo de la granulometría de los depósitos donde se alojan los aprovechamientos, con un valor medio de **$10 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** .

En cuanto a la conductividad hidráulica, se reportan valores que oscilan entre 0.12 y $9.12 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, con un valor promedio de **$3.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$** . Ninguna de las pruebas de bombeo realizadas contó con pozo de observación, por lo que esta limitación no permitió determinar los valores del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se tomó en cuenta la información recabada durante trabajos previos realizados en los años 1983, 1987, 1999 y 2003, pero la numeración de los aprovechamientos utilizada no es correlacionable entre los censos respectivos. Mediante su ubicación con geoposicionamiento global fue posible lograr identificar algunos de ellos para registrar la variación de los niveles del agua subterránea en el tiempo.

Las configuraciones del nivel estático no presentan alteraciones importantes en los años analizados, razón por la cual sólo se describirá la correspondiente al 2003.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático varía estacionalmente mostrando rápida respuesta a la recarga por infiltración de la lluvia. De esta manera, de acuerdo con el mes en que se tomen las lecturas, se hará evidente que los niveles estén influenciados por la recuperación de la temporada de lluvias o el abatimiento durante el estiaje. Al comparar lecturas realizadas en diferentes años para el mismo mes, o muy próximos entre sí, es notorio que los niveles no registran cambios importantes en su posición (Figura 3).

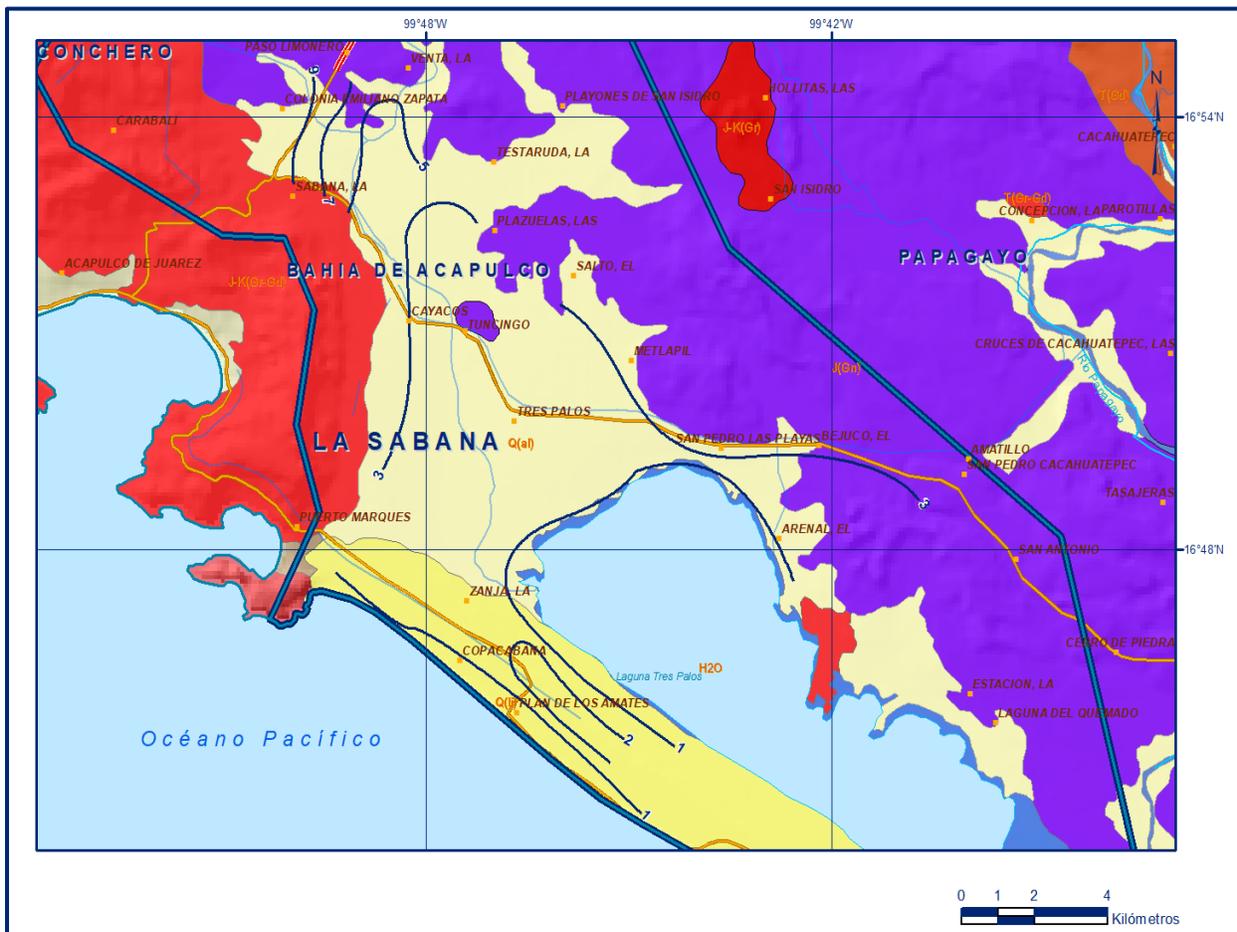


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (agosto 2003)

Por ello sólo describiremos la piezometría más reciente que corresponde a agosto de 2003. La profundidad al nivel estático para esta fecha muestra valores que oscilan entre algunos centímetros y 9 m, controlada por la configuración de la topografía, más que por la concentración de los aprovechamientos. Los valores más someros se localizan hacia la Laguna de Tres Palos y los más altos hacia las poblaciones El treinta, km 22 y los órganos de San Agustín

En los bulevares localizados en la franja costera existen más de 300 pozos pequeños (puyones), situados entre sí a menos de 50 m, que son utilizados para el riego de las áreas verdes, aprovechando los niveles someros. Debido al régimen de operación intermitente, a los bajos caudales de extracción y a que los niveles se recuperan rápidamente durante la temporada de lluvias, estas obras no causan alteración alguna en el equilibrio de la interfase salina.

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de curvas de igual elevación del nivel estático para agosto de 2003 presenta elevaciones que varían de 1 hasta 35 msnm. para la mayor parte del acuífero. Elevaciones superiores a los 100 y 250 msnm se localizan hacia los poblados Km veintidós y El Treinta, influenciados por la topografía de la zona. En la figura No. 4 se observa que la dirección preferencial del flujo subterráneo es de norte a sur, paralela al curso del río La Sabana, para desembocar en el Océano Pacífico. Hacia la porción centro-oriental del acuífero se observa una entrada de agua subterránea proveniente de la zona montañosa que descarga en la laguna de Tres Palos. Los “puyones” que están situados a lo largo de los bulevares están interceptando un volumen significativo del flujo que, originalmente, salía hacia el mar.

Debido a su litología y estructura geológica, los macizos montañosos que rodean al valle y que constituyen el parteaguas geográfico de la región, funcionan como barrera al flujo del agua subterránea. Pese a la falta de apoyo piezométrico para describir las características del flujo subterráneo en las partes topográficamente más altas de la zona, se infiere que su circulación del agua subterránea es muy tortuosa, debido a la heterogeneidad de la masa rocosa y por la compleja estructura geológica. Los gradientes hidráulicos varían de 0.0019 a 0.031 debido a los cambios de permeabilidad en los depósitos granulares más arcillosos, en contraste con las arenas gruesas, y la proximidad con las rocas graníticas de muy baja permeabilidad

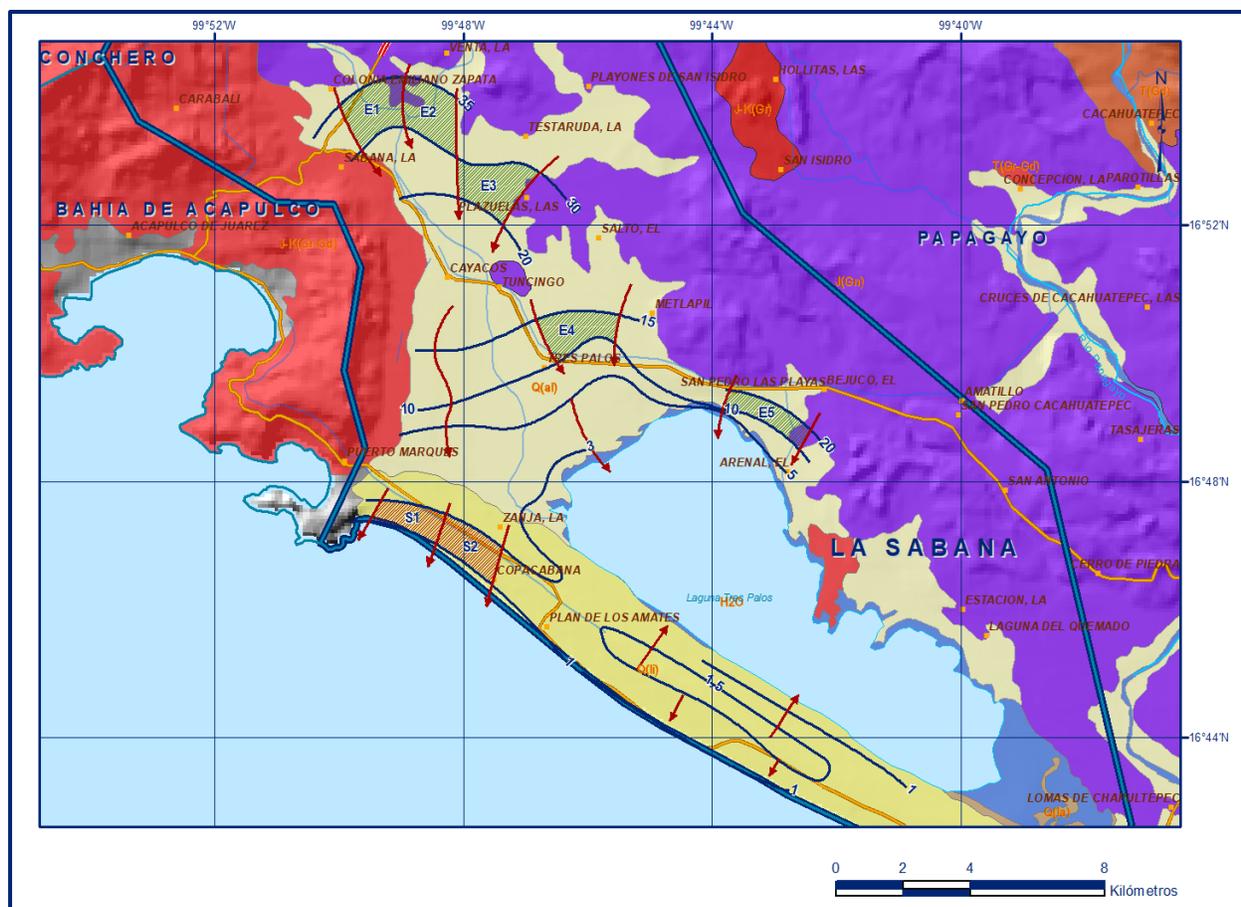


Figura 4. Elevación del nivel estático en m.s.n.m. (agosto de 2003)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de la evolución del nivel estático para los periodos 1975-2003 y 1992-2003 no registra cambios significativos en la profundidad de los niveles del agua subterránea.

Para este tipo de acuíferos es importante comparar mediciones piezométricas realizadas para las mismas fechas, ya que de lo contrario se pueden hacer interpretaciones falsas que no reflejan el funcionamiento real del acuífero para una misma temporada, ya sea la de lluvias o el estiaje.

El comportamiento de los niveles muestra abatimientos durante la época de estiaje, que al producirse las lluvias se recuperan rápidamente. Para los periodos analizados, las variaciones, tanto positivas como negativas, son puntuales y son de sólo algunos centímetros anuales, situación que refleja la condición de estabilidad del acuífero.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Las muestras de agua que se han tomado en pozos y norias, tanto por el organismo operador como por parte de la CONAGUA indican que, salvo algunas restricciones, la calidad química del agua es apta para todo uso. Las concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) no superan las 900 partes por millón (ppm), por debajo de las 1000 ppm que establece la 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. El incremento de la salinidad en el sentido de la dirección de flujo subterráneo: de N-NW hacia el sur.

Valores de salinidad superiores a las 1,000 ppm se registran en norias localizadas en la zona comprendida entre las poblaciones Las Plazuelas y Colonia Mariano Molina, muy distante de la zona costera -que seguramente están asociados a la descarga de aguas residuales o la presencia de fosas sépticas- y en las inmediaciones de San Pedro de las Playas, muy cerca de las Laguna de Tres Palos. En la zona comprendida entre esta laguna y la zona costera las concentraciones de STD no superan las 700 ppm.

Se han detectado concentraciones que superan los límites permisibles de bicarbonatos, cloruros, hierro, manganeso y nitratos. Respecto a la contaminación bacteriológica, la mayoría de los aprovechamientos muestreados presenta concentraciones altas de coliformes, por arriba de las normas establecidas por la SSA y la OMS para el consumo humano.

Las familias de agua subterránea predominantes son las Sódico-Bicarbonatada y Sódico-Sulfatada; la primera diseminada en el acuífero y la segunda hacia las porciones norte y oriente.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media (C2) y contenido bajo de sodio (S1), para la mayoría de los aprovechamientos características que no imponen restricción alguna ni para el riego de los cultivos ni para los suelos de la región. Existen también algunos sitios donde predomina alta salinidad (C3) y alto contenido de sodio (S3) En las últimas tres décadas la población del puerto de Acapulco ha crecido considerablemente, alcanzando cifras de 250,000 habitantes asentados en las márgenes del río La Sabana.

Consecuentemente, las aguas de este río han sufrido un grave deterioro de su calidad debido a las descargas contaminantes de los desechos de la zona conurbada de Acapulco y de las industrias ahí enclavadas, antes de su desembocadura en la Laguna de Tres Palos.

Es por ello que en la porción costera de la cuenca la calidad del agua es una seria limitante para su explotación; por un lado, porque el río La Sabana (una de las fuentes principales de recarga del acuífero) es receptor de aguas residuales crudas de numerosas comunidades, y por otro, porque la Laguna de Tres Palos contiene agua marina mezclada con los escurrimientos contaminados del río.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con cifras del último censo realizado en el año 2003, existen dentro del acuífero un total de 457 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 309 son pozos y 148 norias de bajo rendimiento que abastecen las necesidades del uso doméstico-abrevadero. Se desconoce cuántos de ellos se encuentran activos debido a que una gran cantidad de norias tiene equipos de bombeo móviles que pueden desplazar de un lado hacia otro y otras no contaban con equipo cuando se realizó el censo.

Adicionalmente, se estima que existe un número considerable de aprovechamientos, aproximadamente un 30% más, que no fueron incluidos en el último censo. De esta manera, el total de obras de extracción puede ser del orden de 600. De acuerdo con el uso del agua subterránea, el 73.5% de los aprovechamientos se destina al uso doméstico-abrevadero, el 20% uso público-urbano, el 4% para riego, 2% para servicios y el 0.5 % restante para uso industrial.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **27.8 hm³/año** (Millones de metros cúbicos anuales), de los cuales 20.5 se destinan al uso doméstico-abrevadero, 5.6 para uso público-urbano, 1 para uso agrícola, 0.6 para servicios y los 0.1 restantes se destina al uso industrial.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

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

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

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 de una unidad hidrogeológica:

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

Considerando que la información previa disponible no permite plantear un balance para un periodo de tiempo mayor que corresponda a la misma temporada del ciclo climatológico, se decidió plantear el balance para el periodo 1992 a noviembre de 2003.

El área de balance definida es de 85 km² que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica, en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos y en la que los niveles freáticos están a profundidades menores a los 10m.

7.1 Entradas

La recarga total (R) al acuífero Bahía de Zihuatanejo está integrada básicamente por las entradas subterráneas (Eh) y la recarga vertical por lluvia (Rv) que se infiltra en las zonas no cubiertas por la capa impermeabilizante de la zona urbana.

Recarga natural

Esta recarga está constituida por recarga por flujo horizontal subterráneo que se presenta a través de las zonas de pie de monte y por la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle.

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.

$$Eh + Rv - B - Sh - ETR - fb = \pm \Delta V(S) \text{ ----- (1)}$$

De esta manera:

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

Donde:

- Rv:** Recarga Vertical
- Eh:** Entradas subterráneas por flujo horizontal
- B:** Extracción por bombeo
- Sh:** Salidas subterráneas por flujo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración
- Fb** Salidas por flujo base
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que fluyen hacia La Laguna de Tres Palos y hacia el mar.

Para su cálculo se utilizó la configuración de las curvas de igual elevación del nivel estático correspondiente a agosto de 2003, 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" que recarga al acuífero.

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 y el total de **19.1 hm³/año**.

$$Q = B * i * T$$

Donde

B: Ancho (m) del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo

T: Transmisividad (m^2/s) en el canal de flujo

Tabla 2. Entradas por flujo subterráneo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2 - h_1$ (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
E1	2600	1500	5	0.00333	0.0120	0.1040	3.3
E2	2200	1750	5	0.00286	0.0120	0.0754	2.4
E3	3250	1850	5	0.00270	0.0130	0.1142	3.6
E4	3750	1750	5	0.00286	0.0140	0.1500	4.7
E5	3250	1000	5	0.00500	0.0100	0.1625	5.1
TOTAL							19.1

Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son valores promedio obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizada en el estudio "Evaluación Hidrogeológica del Acuífero La Sabana, Guerrero", 2003.

7.2 Salidas

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

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

La extracción de agua subterránea en el área de estudio ha variado a través del tiempo y de acuerdo con la estimación más reciente, dicha extracción efectuada por bombeo es del orden de **27.8 $hm^3/año$** , destinado principalmente a los usos doméstico-abrevadero y público-urbano.

7.2.2 Salidas subterráneas (Sh)

Las salidas subterráneas que ocurren como descarga hacia el mar fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del NE presentado en la figura 4. El Valor estimado es de **1.2 $hm^3/año$** , tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Salidas por flujo subterráneo horizontal

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
S1	1800	1250	2	0.00160	0.006	0.0173	0.545
S2	2200	1350	2	0.00148	0.006	0.0196	0.617
TOTAL							1.16

7.2.3 Salidas por flujo base (fb)

Para conocer el caudal por flujo base del río La Sabana, es decir, el volumen que aporta el acuífero al río en los meses de estiaje, se analizaron varios años del volumen de escurrimiento en las estaciones Kilómetro 21+000 y Tuncingo, que se localizan en el cauce del río La Sabana, una a la entrada, al norte de la zona y la otra a la salida del mismo.

Desafortunadamente, no se contó con información suficiente para hacer el análisis de estas estaciones en los años subsecuentes al huracán Paulina, ya que, probablemente, quedaron inhabilitadas o desaparecieron por la acción de dicho fenómeno climatológico.

La estimación del caudal de escurrimiento se realizó para el periodo de observación más representativo que cuenta con información en la estación hidrométrica Tuncingo (1981-1994), determinándose que éste es del orden de los 350 lps, equivalente a **11 hm^3 /año**.

7.2.4 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). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración

En toda el área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m de profundidad, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración.

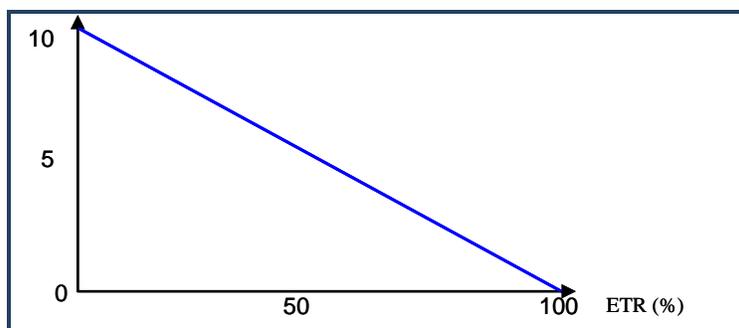
Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 945 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 26.5 °C y precipitación de 1035 mm.

$ETR (mm) = \frac{P (mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2 (mm)}{L^2}\right)}}$		$L = 300 + 25T + 0.05T^3$
T (°C) =	26.5	
P(mm) =	1035	P ² = 1071225
L =	1892.98125	L ² = 3583378.01
ETR (mm)	945.2	

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 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.



De la configuración de profundidad al NE mostrada en la figura 3, correspondiente a agosto de 2003, se consideran las curvas menores e iguales a 10 m, se calcula el área entre ellas y se toma el valor promedio (entre las curvas de 3 y 5 metros en valor promedio será 4, por ejemplo).

El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, deberá ponderarse de acuerdo a la relación lineal mencionada anteriormente, en este caso particular como el valor medio de profundidad es de 4 m, se multiplicará por 0.6 (que significa que, a esta profundidad, el 60 % es susceptible de evapotranspirarse).

Lo mismo se hace para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 10 m. Al final se obtendrá la suma de los volúmenes evapotranspirados.

El resultado de este proceso se presenta en la tabla 2, en la que se muestra que el valor de la evapotranspiración real calculado es de **52.0 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
0 A1	0.5	3.7	0.945	10.00000	0.9500	3.3
2	2	3.5	0.945	10.00000	0.8000	2.6
1 A2	1.5	4.1	0.945	10.00000	0.8500	3.3
1 A3	2	36.4	0.945	10.00000	0.8000	27.5
3 A5	4	16	0.945	10.00000	0.6000	9.1
5 A7	6	11.3	0.945	10.00000	0.4000	4.3
7 A9	8	10	0.945	10.00000	0.2000	1.9
TOTAL		85				52.0

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

Para el cálculo del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la evolución del nivel estático registrada para el periodo 1992-2003 y considerando un coeficiente de almacenamiento $S = 0.02$ a 0.005 ; el valor obtenido tiende a ser nulo debido a que el trazo de las curvas de igual evolución está apoyado en valores puntuales, tanto positivos como negativos.

Además, como ya se ha explicado anteriormente, el cambio de almacenamiento varía estacionalmente en respuesta a la recarga por infiltración de la lluvia.

En la época de estiaje se abaten los niveles para después recuperarse rápidamente una vez iniciada la temporada de lluvias.

Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, $\Delta V(S) = 0$.

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia y por las infiltraciones a lo largo del cauce del río, mediante la expresión (2):

$$R_v = S_h + B + ETR + f_b - \Delta V(S) - E_h \text{ ---- (2)}$$

$$R_v = 1.2 + 27.8 + 52.0 + 11.0 - 0.0 - 19.1.0$$

$$R_v = 72.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

De esta manera la recarga total media anual $R = R_v + E_h$

$$R = 92 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso particular, su valor es de **92.0 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 está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero La Sabana, el volumen de las descargas naturales comprometidas es de **21.2 hm³/año** que corresponde a las salidas subterráneas hacia el mar, las descargas naturales por flujo base del Río La Sabana, que probablemente están concesionados como agua superficial, y los destinados al gasto ecológico para sostenimiento de la flora ribereña.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **35,579,939 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 92.0 - 21.2 - 35.579939 \\ \text{DMA} &= 35.220061 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **35,220,061 m³ anuales**.

Cabe hacer la aclaración de que este volumen se refiere a todo el acuífero y dado que existe una fuerte demanda de agua subterránea para el pujante desarrollo urbano y turístico en dos polos importantes de desarrollo, localizados en la ribera norte de la Laguna de Tres Palos y entre ésta y la costa, las concesiones para la extracción de volúmenes adicionales mediante nuevos aprovechamientos deberá tomar en cuenta que éstos deben ser adecuadamente localizados, diseñados, construidos, equipados y operados para no inducir el agua de mala calidad, ya sea por intrusión salina y/o migración del agua de mala calidad de la Laguna de Tres Palos.

9 BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) " Estudio de Actualización Geohidrológica en la Cuenca del Río La Sabana, en Acapulco, Gro". Realizado por la empresa Ingenieros Civiles y Geólogos Consultores, S. A. de C.V. (1983).