

**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO SIERRA DE SAN ANDRÉS-TUXTLA  
(3016), ESTADO DE VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
Antecedentes .....	2
1.1. Localización .....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero .....	3
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>4</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
3.1. Provincias fisiográficas .....	5
3.2. Clima.....	6
3.3. Hidrografía .....	7
3.4. Geomorfología.....	8
<b>4. GEOLOGÍA .....</b>	<b>9</b>
4.1. Estratigrafía .....	10
4.2. Geología estructural .....	13
4.3. Geología del subsuelo.....	14
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
5.1. Tipo de acuífero.....	15
5.2. Parámetros hidráulicos.....	16
5.3. Piezometría.....	16
5.4. Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1. Profundidad al nivel estático .....	17
5.4.2. Elevación del nivel estático .....	18
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	18
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	19
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....</b>	<b>20</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>20</b>
7.1. Entradas.....	21
7.1.1. Recarga vertical (Rv) .....	21
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) .....	22
7.2. Salidas.....	23
7.2.1. Bombeo (B) .....	23
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	23
7.2.3. Evapotranspiración (ETR) .....	24
7.2.4. Descarga a través de manantiales (Dm) .....	25
7.2.5. Descarga por flujo base de ríos (Dfb).....	25
7.3. Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ).....	25
<b>8. DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>27</b>
8.1. Recarga total media anual (R).....	27
8.2. Descarga natural comprendida (DNC).....	27
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	28
8.4. Disponibilidad de agua subterránea (DMA) .....	28
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>29</b>

## **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 Sierra de San Andrés-Tuxtla, definido con la clave 3016 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Veracruz, entre los paralelos 18°12'35" y 18°42'48" de latitud norte y entre los meridianos 94°51'47" y 95°32'38" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 2,239 km<sup>2</sup>.

Limita al noroeste con el acuífero Costera del Papaloapan, al suroeste con Costera del Papaloapan, y al sur y este con el acuífero Soteapan-Hueyapan, todos ellos del estado de Veracruz. Al norte su límite natural es el Golfo de México (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero abarca de forma total a los municipios Santiago Tuxtla, San Andrés Tuxtla y Catemaco.



Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	95	25	48.2	18	14	9.4	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE MUNICIPAL
2	95	32	25.2	18	19	58.1	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE MUNICIPAL
3	95	17	6.8	18	42	48.7	DEL 3 AL 4 POR LA LINEA DE BAJA MAR A LO LARGO DE LA COSTA
4	94	54	5.9	18	32	55.4	DEL 4 AL 1 POR EL LIMITE MUNICIPAL
1	95	25	48.2	18	14	9.4	

## 1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca X Golfo Centro y al Consejo de Cuenca Río Papaloapan, instalado el 16 de junio de 2000. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; la mayor parte de su territorio está sujeta a las disposiciones del "Decreto que declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Acuacultura Número Dos Cuenca del Papaloapan para preservar,

*fomentar y explotar las especies acuáticas, animales y vegetales, así como para facilitar la producción de sales y minerales”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de agosto de 1973. Esta veda es tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.*

En la superficie restante, que comprende la franja costera, no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada está sujeta a las disposiciones del *“ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”,* publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En su región costera se localiza la Reserva de la Biosfera “Los Tuxtlas”, decretada el 23 de noviembre de 1998, y el sitio RAMSAR “Manglares y humedales de la Laguna de Sontecomapan”, decretado el 2 de febrero de 2004.

## **1. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS DE LA CAÑADA POBLANA-OAXAQUEÑA EN LOS ESTADOS DE PUEBLA Y OAXACA, Y SIERRA DE SAN ANDRÉS EN EL ESTADO DE VERACRUZ, elaborado por Ariel Consultores, S.A., para la Comisión Nacional de Agua, en 2001.** Incluye actividades como censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, piezometría y pruebas de

bombeo. Plantea el balance de aguas subterránea para estimar la recarga media anual.

**ESTUDIO DE EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS DE LA CUENCA DEL RÍO PAPALOAPAN, LOCALIZADOS EN LOS ESTADOS DE VERACRUZ, OAXACA Y PUEBLA. Realizado en 2005 para la Comisión Nacional del Agua Gerencia Regional Golfo Centro, por Consorcio de Ingeniería Mexicana, S.A. de C.V.** Su objetivo general fue conocer las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, así como contar con información necesaria para determinar la recarga media anual del agua subterránea y calcular su disponibilidad. Mediante actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, hidrometría, piezometría, nivelación de brocales, pruebas de bombeo y toma de muestras para análisis fisicoquímicos, plantea el balance de aguas subterráneas para determinar su disponibilidad.

**ESTUDIO DE REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS TECOLUTLA, MARTINEZ DE LA TORRE, VALLE DE ACTOPAN, OMEALCA-HUIXCOLOTLA, PEROTE-ZALAYETA, COSTERA DE COATZACOALCOS, SIERRA DE SAN ANDRÉS TUXTLA, LOS NARANJOS, SOTEAPAN-HUEYAPAN, COSTERA DEL PAPALOAPAN Y ÁLAMO-TUXPAN, EN EL ESTADO DE VERACRUZ, realizado en 2011 por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua.** Los objetivos del estudio fueron establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información piezométrica y de calidad del agua de los acuíferos, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, conocer su evolución en el tiempo y la condición actual de los niveles del agua subterránea, como resultado de las variables que intervienen en el proceso de recarga y descarga. Elabora mapas de configuración del nivel estático.

**INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA CENSO E HIDROMETRÍA DEL ACUÍFERO SIERRA DE SAN ANDRÉS-TUXTLA, VERACRUZ. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2019.** Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático, el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones y aforo del flujo base.

## **2. FISIOGRAFÍA**

### **3.1. Provincias fisiográficas**

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la provincia fisiográfica Planicie Costera del Golfo, subprovincia Región de los Tuxtlas. Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del INEGI, se localiza en provincia fisiográfica Llanura

Costera del Golfo Sur; la mayor parte en la Discontinuidad Sierra de los Tuxtlas y la región noroccidental en la subprovincia Llanura Costera Veracruzana.

La provincia Llanura Costera del Golfo, abarca la mayor parte del estado y se caracteriza por la presencia de dos cuencas sedimentarias donde se depositaron rocas del Paleógeno-Neógeno, formadas principalmente por lutitas y areniscas, cuyas características litológicas varían de acuerdo al ambiente de depósito que varían desde continental (deltas y barras) hasta marino somero. Presenta una morfología variada en la que predomina el relieve de superficies planas, inclinadas al oriente, originadas por la acumulación fluvial y marina; también existen superficies onduladas, formadas por una erosión diferencial; localmente se levantan grandes montañas, como la sierra de Tamaulipas, que limita la zona de estudio al occidente y al poniente por el frente montañoso de la Sierra Madre Oriental. Las planicies que se extienden transversalmente hasta las inmediaciones de la Sierra Madre Oriental están constituidas por lomeríos, superficies onduladas y estratos ligeramente inclinados al oriente, de acuerdo al buzamiento de las capas de roca. Las elevaciones menores locales corresponden, por lo general, a las crestas de los anticlinales que están coronados por remanentes de erosión en donde afloran los conglomerados recientes. La fisiografía de la llanura costera es interrumpida por grandes elevaciones cuyas secciones casi circulares cubren superficies de 1,500 km<sup>2</sup> en la zona occidental de la provincia y unos 2,000 km<sup>2</sup> en la porción oriental, formándose entre ellas el Lago de Catemaco.

La Discontinuidad Sierra de Los Tuxtlas tiene una extensión de 3,682 km<sup>2</sup>, interrumpe en forma abrupta la continuidad de la Llanura Costera del Golfo Sur. Presenta laderas tendidas en el oeste y escarpadas en el este, asociada siempre con lomeríos. Sobre la costa y hacia el sur, en la porción central de Los Tuxtlas, existen las grandes calderas gemelas de Sontecomapan y Catemaco. La mayor parte del resto de la zona es de lomeríos, conformados por diversos tipos de materiales basálticos, asociados con cañadas.

La subprovincia Llanura Costera Veracruzana se distingue por la presencia de lomeríos suaves ubicados al este y noroeste, y en una mayor extensión se identifican llanuras con sistemas lagunares permanentes que ocupan extensas superficies. De los rasgos fisiográficos representativos del acuífero, se distinguen zonas de llanuras inundables, barras, dunas, llanuras costeras con dunas y en el extremo oriental, lomeríos suaves con llanos asociados.

### **3.2. Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, en la región domina el clima cálido

húmedo en dos variantes: Am y Am(f), con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C, precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual, para la primera variante, y mayor al 10.2% del total anual, para la segunda. En las porciones occidental, suroccidental y oriental, hacia el límite con los acuíferos Costera del Papaloapan, Cuenca Río Papaloapan y Sotepan-Hueyapan, respectivamente, se registra el clima cálido subhúmedo Aw2, con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C, precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm, régimen de lluvias de verano con índice P/T mayor de 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se analizó la información de 3 estaciones ubicadas dentro de los límites del acuífero: Catemaco, con información de 37 años, San Andrés Tuxtla, 55 años y Santiago Tuxtla 33 años. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración real de **2,077.5 mm, 24.5 °C y 1,650 mm**, respectivamente.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia, uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales que abarca de enero a marzo, con precipitaciones menos significativas provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, junio es el mes más cálido, en tanto que los meses de enero y diciembre registran la menor temperatura media.

### **3.3. Hidrografía**

El área cubierta por el acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH) RH-28 "Papaloapan", Subregión Hidrológica y Cuenca Río Papaloapan; se localiza en la porción sur de la llanura costera del Golfo de México, ocupando la región sur del estado de Veracruz, y está integrada por las cuencas de los ríos Actopan, La Antigua, Jamapa y Papaloapan, que desembocan en el Golfo de México y tienen su origen fuera de la entidad. El acuífero Sierra de San Andrés Tuxtla comprende la porción central de la región hidrológica, cuyos principales ríos tienen su origen en los límites entre los estados de Veracruz y Puebla, hasta su desembocadura en el Golfo de México. Limita al norte con la cuenca del río Nautla, al este con el Golfo de México y la cuenca del río Coatzacoalcos, al sur con la cuenca del río Alto Verde y al oeste con la cuenca del río Atoyac. Abarca una amplia superficie de 57,272 km<sup>2</sup> del territorio de los estados de Veracruz (28,166 km<sup>2</sup>), Oaxaca (23,482 km<sup>2</sup>) y Puebla (5,654 km<sup>2</sup>).

La cuenca del Río Papaloapan está dividida en tres zonas: La Cañada o Alto Papaloapan, Medio Papaloapan y Bajo Papaloapan. De acuerdo con esta división, el acuífero se encuentra ubicado en el Bajo Papaloapan.

El río Papaloapan es una de las corrientes superficiales más importantes del país, ya que su escurrimiento medio anual es de 47,000 hm<sup>3</sup>, con una cuenca de aproximadamente 46,000 km<sup>2</sup>, donde se desarrollan los numerosos afluentes que lo alimentan. Nace en las inmediaciones de Coajimoloyas, Oaxaca, en la Sierra Juárez, tomando una dirección general hacia el NW con el nombre de Río Grande, recibe los ríos Las Vueltas, Tomellín, Apoala y San Pedro, labrando el cañón de Tomellín. Desemboca directamente en la Laguna de Alvarado y finalmente en el Golfo de México.

Los principales ríos de la región tienen un patrón de escurrimiento de tipo dendrítico o ramificado bien desarrollado y en menor proporción subparalelo. En el territorio del acuífero no existe infraestructura hidráulica para el almacenamiento del agua superficial.

### **3.4. Geomorfología**

En la superficie del acuífero las elevaciones topográficas varían de 0 y 1,560 msnm. Las mayores elevaciones se localizan al noroccidental y oriental, conformado sierras volcánicas asociadas principalmente con la presencia de conos volcánicos y derrames de lava. Se caracterizan por presentar un drenaje radial y conforman de cimas redondeadas, en donde se registran las mayores precipitaciones, generado los escurrimientos que fluyen hacia la planicie costera, dando lugar a corrientes generalmente de régimen torrencial y algunos con caudales de flujo base durante el estiaje, que labran su curso por valles y lomeríos paralelos a las corrientes principales.

Las características geomorfológicas de la región permiten identificar tres unidades:

Laderas de montaña que se localizan en toda la región norte del acuífero, presentan un origen endógeno volcánico que ocurrió durante el Neógeno, asociado principalmente con la presencia de conos volcánicos y derrames de lava. Se caracterizan por presentar drenaje radial y conforman cumbres redondeadas, registran una altitud media que varía de 700 a 1,600 msnm y una altura relativa de 500 a 1,000 m.

Cerros y lomeríos altos, se encuentran bordeando los aparatos volcánicos, tienen un origen endógeno volcánico asociado con flujos de escombros, flujos de piroclásticos y acumulaciones de materiales vulcanoclásticos. Presentan un drenaje que varía de radial a dendrítico y altitudes medias que varían de 300 a 1,000 msnm, con una altura relativa de 300 a 400 m.

Planicies aluviales que se distribuyen principalmente en los sectores centro-oriental y occidental del acuífero, tienen un origen exógeno acumulativo del Cuaternario, se componen de material acumulativo aluvial y por depósitos de ladera originados por procesos gravitacionales y fluviales, así como depósitos de caída. Presentan una altitud media de 50 a 180 msnm con una altura de 40 m.

### **3. GEOLOGÍA**

La región se encuentra ubicada en la Cuenca de Veracruz, cubierta parcialmente por el Campo Volcánico Los Tuxtlas. De acuerdo a la interpretación de la imagen de satélite y a la cartografía de la Carta Geológico-Minera, Coatzacoalcos, escala 1:250,000 editada por el Servicio Geológico Mexicano, en la zona del acuífero se encuentran expuestas rocas volcánicas asociadas tanto con flujos de lava como flujos de escombros y de piroclastos, en las zonas topográficamente más bajas se localizan depósitos vulcanoclásticos y depósitos de caída.

El territorio del acuífero se encuentra dentro de una región representada por una sucesión de eventos volcánicos que generaron grandes volúmenes de rocas de composición básica a intermedia, emitidos mediante episodios volcánicos tanto efusivos como explosivos. La presencia de estos aparatos volcánicos dentro de la planicie costera, se considera que corresponden a una zona de debilidad cortical, de tal forma que la llanura aluvial del Golfo de México se ve interrumpida por una zona volcánica de composición básica del Paleógeno-Cuaternario que sobreyace a sedimentos arenosos y arcillosos paleógenos-neógenos.

La zona estuvo cubierta durante el Paleógeno-Neógeno por mares someros, donde se depositaron sedimentos arenosos de cuarzo y se desarrollaron sistemas de fracturamiento intenso que a su vez provocaron el levantamiento de la corteza con el inicio de la actividad ígnea de la zona, misma que continuó durante el Cuaternario.

De manera general, el área está representada por rocas volcánicas extrusivas, representadas por derrames de lava y unidades piroclásticas; el Paleógeno-Neógeno está representado por afloramientos pequeños de areniscas y lutitas y en mayor extensión superficial por conglomerados, en tanto que el episodio volcánico está representado por derrames de lavas basálticas y andesíticas y un

conjunto de brechas y tobas. El Cuaternario está presente a través de unidades volcánicas conformadas por brechas y derrames de lavas de composición basáltica, mientras que los sedimentos no consolidados conforman depósitos eólicos, palustres y aluviales.

#### 4.1. Estratigrafía

En la región en la que se ubica el acuífero aflora una secuencia estratigráfica constituida por rocas sedimentarias e ígneas, cuya edad comprende del Jurásico Superior al Reciente. A continuación, se describen de manera general las distintas unidades litológicas, comenzando con la más antigua (figura 2).

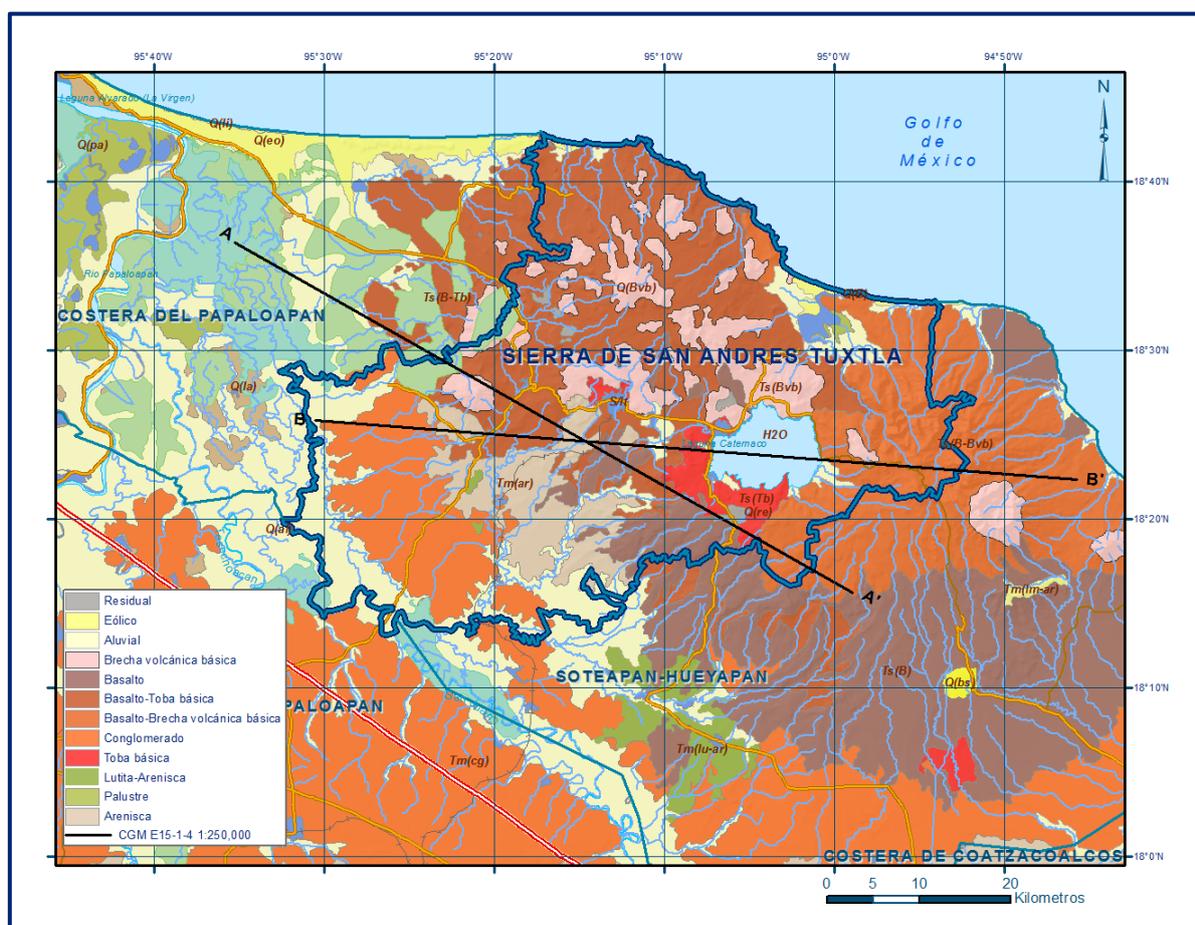


Figura 2. Geología general del acuífero

### JURÁSICO SUPERIOR

#### Formación Chimaneca

Es la unidad sedimentaria más antigua que aflora en la región y está constituida por una secuencia de calizas con pedernal y lutitas, que se infiere son cubiertas discordantemente por la Formación Chicontepec, de edad Paleoceno.

### CENOZOICO

#### Grupo Chicontepec

Definida formalmente por Dumble et al. en 1918 y posteriormente elevada al rango de Grupo Chicontepec. Nuttall (1930) fue el primero en dividir al Grupo Chicontepec en tres miembros; Inferior, Medio y Superior, que hasta ahora prevalece por la buena diferenciación que se puede hacer con la prospección sísmica y con micropalontología. Se presenta desde el sureste de San Luis Potosí hasta Tezihutlán, Puebla, paralelamente a la margen oriental de la Sierra Madre Oriental, aunque su mayor desarrollo se tiene en la Cuenca de Chicontepec; también se ha reportado en el subsuelo de la Cuenca de Veracruz. Su localidad tipo se ubica a 2.5 km al este de Chicontepec, Veracruz, donde está integrado por una alternancia de areniscas arcillosas con limolitas y lutitas de color gris verdoso con estratificación rítmica e intercalaciones delgadas de margas arenosas de color gris oscuro (Nava y Alegría 2001).

Las tres biozonas del Grupo Inferior o Basal, Medio y Superior o Canal, actualmente son consideradas como formaciones por si solas, ya que reúnen las características estratigráficas que permiten su separación y son cartografiables; además, se pueden separar en el subsuelo por sus contactos discordantes que se identificaron mediante prospección sísmica. Las dos primeras corresponden al Paleoceno Superior, mientras que Chicontepec Superior o Canal se ubica en el Eoceno Inferior. Su espesor en el subsuelo es variable y se incrementa de sur a norte; en Poza Rica tiene un promedio de 370 m; 796 m en Furbero y 935 m en Palmasola; registrando como espesor máximo 3,300 m (SGM, 2007). Los sedimentos que las conforman se caracterizan por ser de origen turbidítico, depositados primero por corrientes submarinas que erosionaron el sustrato para dar forma a la cuenca y después por un depósito volumétricamente importante en las depresiones formadas por la erosión en abanicos submarinos.

## **NEÓGENO**

Está representado por un conjunto de unidades del Mioceno conformadas por una secuencia de areniscas y lutitas, y lutitas y tobas riolíticas. Corresponden a unidades constituidas por materiales finos consolidados que forman un paquete de lutitas y areniscas dispuestas en capas delgadas a medias que afloran en pequeñas áreas del acuífero, así como a un conglomerado del plioceno.

Discordantemente a la secuencia del Grupo Chicontepec, se depositó una secuencia de lutitas, tobas y areniscas que constituyen la **Formación Depósito**, de edad Mioceno Inferior. Sobreyace la **Formación Encanto** constituida por una alternancia de lutitas y areniscas, sobre las cuales se depositó en forma concordante la **Formación Concepción** de edad Mioceno Superior, constituida por areniscas y lutitas. Sobreyaciendo concordantemente, aflora la **Formación Filisola** constituida por arenas y lutitas, sobre la cual se depositó un

conglomerado polimíctico y areniscas que constituyen la **Formación Jaltepec**, considerada de edad Plioceno. La Formación Filisola también es cubierta transicionalmente por la **Formación Paraje Solo** de edad Plioceno, constituida por areniscas y lutitas; que a su vez es sobreyacida concordantemente por la **Formación Cedral** de edad Plioceno-Pleistoceno, la cual está conformada por areniscas y conglomerado polimíctico. Las tres últimas formaciones tienen también una relación de cambios laterales de facies.

Las rocas volcánicas que afloran en el área pertenecen al Complejo Volcánico Los Tuxtlas, que se encuentra cubriendo parcialmente a las rocas sedimentarias anteriormente descritas. Se identifican en este campo tres eventos: Evento Cerro San Martín-El Vigía y Volcán San Martín. En su base presenta rocas basálticas del Mioceno ubicadas en el cerro San Martín, sobreyacidas por una serie de coladas de lavas de composición basáltica y en menor proporción andesíticas. El evento Sierra de Santa Martha está representado por andesitas y tobas andesíticas de edad Plioceno. A este evento pertenecen también las brechas volcánicas basálticas y basaltos, las andesitas y basaltos. Por último, el evento La Nueva Victoria está representado por conos cineríticos compuestos por tobas basálticas, basaltos, arenas y cenizas de composición basáltica cuya edad radiométrica indica que pertenece al Pleistoceno.

## **CUATERNARIO**

### **Depósitos vulcanoclásticos**

Se agruparon con esta nomenclatura al conjunto de sedimentos que se distribuyen hacia la zona de la planicie, que consisten de materiales volcánicos retrabajados, así como depósitos fluviales y aluviales, que manifiestan una gran variabilidad en su granulometría, ya que son producto de la erosión, transporte y acumulación de las rocas que constituyen las elevaciones topográficas; varían desde arcillas, limos y arenas, hasta gravas, los cuales cambian de facies tanto lateral como verticalmente. Se presentan en toda la superficie del valle y se estima que su espesor varía de 100 a 400 m.

### **Depósitos Aluviales**

Están constituidos por un conjunto de materiales clásticos de tamaño que varía desde gravas hasta arcillas que forman depósitos lenticulares con alto grado de heterogeneidad tanto lateral como vertical debido a los depósitos sucesivos de las principales corrientes superficiales. Estos materiales descansan indistintamente sobre las rocas más antiguas, su espesor es variable, desde unos cuantos metros hasta un máximo de 30 m. Los aluviones se presentan masivos al pie de las sierras, en estratos mal definidos y en lentes en las terrazas fluviales. Las gravas y arenas rellenan los valles fluviales y los materiales más finos forman planicies aluviales,

principalmente en las zonas de influencia de los ríos.

### **Depósitos Lacustres**

Esta unidad representa a los depósitos arcillosos y arenosos finos de las lagunas marginales y los de pequeñas cuencas endorreicas. Las arcillas son generalmente plásticas y de color oscuro, las arenas son de grano fino, que se presentan interestratificadas en capas laminares delgadas. Su expresión morfológica es de llanura y está expuesta principalmente en las regiones topográficamente más bajas del sureste del área. Se desconoce su espesor. Incluye también los depósitos palustres compuestos por limos y arcillas de color oscuro y olor fétido característico.

### **Depósitos Eólicos**

Esta unidad está restringida a la zona litoral y está constituida por la acumulación de arenas de grano fino y medio y de fragmentos de conchas, transportados por el viento a partir de los depósitos de playa. Forman barras y dunas orientadas hacia el norte, en ocasiones con estratificación cruzada. En algunas zonas forman dunas fijas formadas por fragmentos de conchas y cementadas por carbonatos.

### **Depósitos de litoral**

Sus afloramientos se restringen a la zona costera y están constituidos por fragmentos de conchas de diversos organismos y por arenas de cuarzo y feldespato de grano fino a medio, sujetos a la acción del oleaje. Su acumulación es la evidencia directa del retroceso del mar.

## **4.2. Geología estructural**

La presencia de aparatos volcánicos dentro del territorio del acuífero se ha considerado como producto de una fase distensiva que adelgazó la corteza y provocó el ascenso de los magmas básicos sobre zonas de debilidad. Así, la zona está formada por estructuras volcánicas antiguas y recientes orientados en una dirección NW-SE, que puede corresponder con una zona de fracturamiento profundo, que tiene forma de conos truncados cuyos derrames tienen inclinaciones entre 5° y 10° hacia el sur. No se distinguen rasgos estructurales que puedan evidenciar los procesos estructurales que moldearon la superficie del acuífero, sin embargo, la interpretación geológica del subsuelo hace suponer que los sedimentos paleógeno-neógenos presentan sistemas de fallamiento que favorecieron el ascenso del magma.

De las observaciones al modelo digital de elevación, la imagen de satélite y el mapeo de aparatos volcánicos, se deduce que el vulcanismo dominante es de origen fisural controlado por una estructura regional de rumbo NW y una

longitud aproximada de 62 km. La región está relacionada con la apertura y evolución tectónica del Golfo de México. En el Triásico Superior inicia la ruptura del supercontinente Pangea en la margen sur de la Placa de Norteamérica, que continuó durante el Jurásico Inferior y Medio. La comunicación entre el Golfo de México y el Océano Atlántico pudo haberse iniciado durante el Kimmeridgiano (Amos S., 1991). En este periodo ocurrió una invasión de aguas marinas del golfo que acumularon los carbonatos bajo condiciones someras y de alta energía. En el Tithoniano se depositaron las facies de carbonatos arcillosos, en el Cretácico Inferior en aguas más o menos profundas se depositan calizas batiales y es en este lapso entre el Kimmeridgiano y el Cretácico Medio y Superior, que se deposita la Formación Chinameca. Entre el Cretácico Medio y el Superior se manifiesta una estabilidad tectónica aunada a una gran transgresión marina que permitió el depósito de potentes espesores de carbonatos en una plataforma que se entendió por casi todo México, así fue como se depositaron grandes espesores al sur de la cuenca, mientras que la parte que forma propiamente la cuenca parece haberse encontrado en estado de emersión. A finales del Maastrichtiano y Eoceno Inferior se produce el levantamiento causado por la Orogenia Laramide, como resultado de los movimientos tectónicos de convergencia entre la Placa de América del Norte y la Placa Farallón. En el Paleoceno se manifiesta un cambio en el régimen de depósito, de cuenca a plataforma, y se depositó la Formación Chicontepec. El Eoceno y el Oligoceno no afloran en el área, sin embargo, hacia el sur, en el pozo Sayula No. 5, fueron identificados estos sedimentos (Ríos Macbeth F., 1959). Durante el Mioceno se depositan las formaciones Depósito y Encanto evidenciando que los depósitos no fueron continuos, sino que se llevaron a cabo en mares que recibían aportaciones periódicas de arenas y arcillas, debido al cambio de régimen de sedimentación provocados por el ascenso de intrusiones salinas, posteriormente se depositaron las formaciones Concepción, Filisola y Paraje Solo. Finalmente se inicia el vulcanismo en la zona de Los Tuxtlas, mientras que continúa la retirada paulatina del mar con el depósito de rocas conglomeráticas y tobas pseudoestratificadas en mares someros de la Formación Cedral y rocas continentales de la Formación Jaltepec (Carta Geológico-Minera Coatzacoalcos E15-1-4. Escala 1:250,000. SGM, 2004).

#### **4.3. Geología del subsuelo**

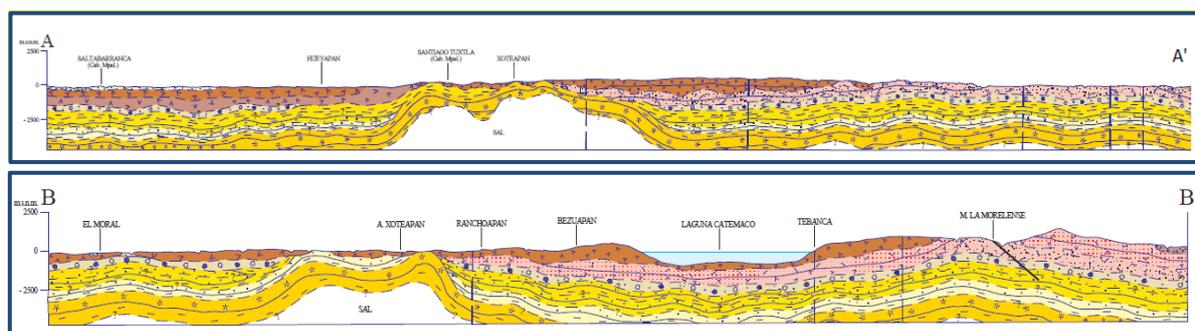
La Planicie Costera se encuentra cubierta por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas del Cenozoico, que descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía de pocos metros, hacia las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, a más de 6,000 m en el subsuelo marino.

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica 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 aluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos y arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, lacustres, vulcanoclásticos, areniscas y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen decenas de metros de espesor.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas principalmente sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan intercalaciones de areniscas, lutitas, calizas y tobas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de lutitas y areniscas que constituyen la Formación Chinameca del Jurásico Superior-Cretácico Inferior. Las areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento o semiconfinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

La figura 3 muestra dos secciones geológicas que atraviesan el acuífero de forma longitudinal en una dirección NW-SE y W-E, el acuífero se encuentra alojado en los materiales granulares que se ubican a lo largo de las planicies de inundación de ríos y arroyos y en la planicie costera.



Fuente: Carta Geológico-Minera F15-1-4 "Coatzacoalcos" Esc. 1:250.000 (SGM, 2004)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

## 4. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1. Tipo de acuífero

A partir de la información geológica superficial y del subsuelo, recabada en el acuífero, así como lo observado en otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen y constitución geológica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, de

baja capacidad de almacenamiento, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado. El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales de granulometría que varía de gravas a arcillas, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Guazinapa, Coxcoapan, Tepango, Isletilla, Tuxtla y Bodegas, y sus arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, litorales, vulcanoclásticos y conglomerados que conforman la planicie costera. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan intercalaciones de areniscas, basaltos, andesitas, tobas y brechas volcánicas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de **confinamiento o semiconfinamiento**, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas.

## **5.2. Parámetros hidráulicos**

Existe muy poca información de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en este acuífero. Sólo tres pruebas de corta duración en abatimiento y recuperación realizadas en 2005, cuyos resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales reportaron valores de transmisividad que varían de  **$1.8 \times 10^{-3}$  a  $10.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (155.5 a 864  $\text{m}^2/\text{día}$ )**. Los valores de conductividad hidráulica varían de **4.0 a 11.8 m/d ( $3.6 \times 10^{-5}$  a  $1.25 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ )**, considerando un espesor saturado variable, de 50 a 80 m. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos, o a zonas de mayor espesor saturado.

En cuanto a los valores del rendimiento específico, ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento. De acuerdo con la constitución geológica de los materiales que conforman el acuífero, se estima un valor de **0.1 a 0.2** para los depósitos clásticos de mayor granulometría, y de **0.01 a 0.05** para los sedimentos más finos y las lutitas. Se considera un valor representativo de **0.06** para las lutitas y areniscas y **0.15** para los conglomerados y basaltos.

## **5.3. Piezometría**

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2005 además de registros históricos durante el periodo 2005-2019,

obtenidos por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2014-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

## 5.4. Comportamiento hidráulico

### 5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 3 a 40 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la planicie del cauce del Río San Juan hacia el noreste en dirección a las estribaciones de las sierras y aparatos volcánicos que limitan los valles, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, de 2 a 5 m, se registran en la porción suroccidental del acuífero, entre las poblaciones Cerro de los Vázquez, Paso del Amate, La Pitahaya, Camacho y Lauchapan, a lo largo del Río San Juan; en tanto que las mayores profundidades, de 30 a 40 m, se presentan hacia las elevaciones topográficas, entre los poblados El Potrero, Ahuacapan y Dos Aguajes (figura 4).

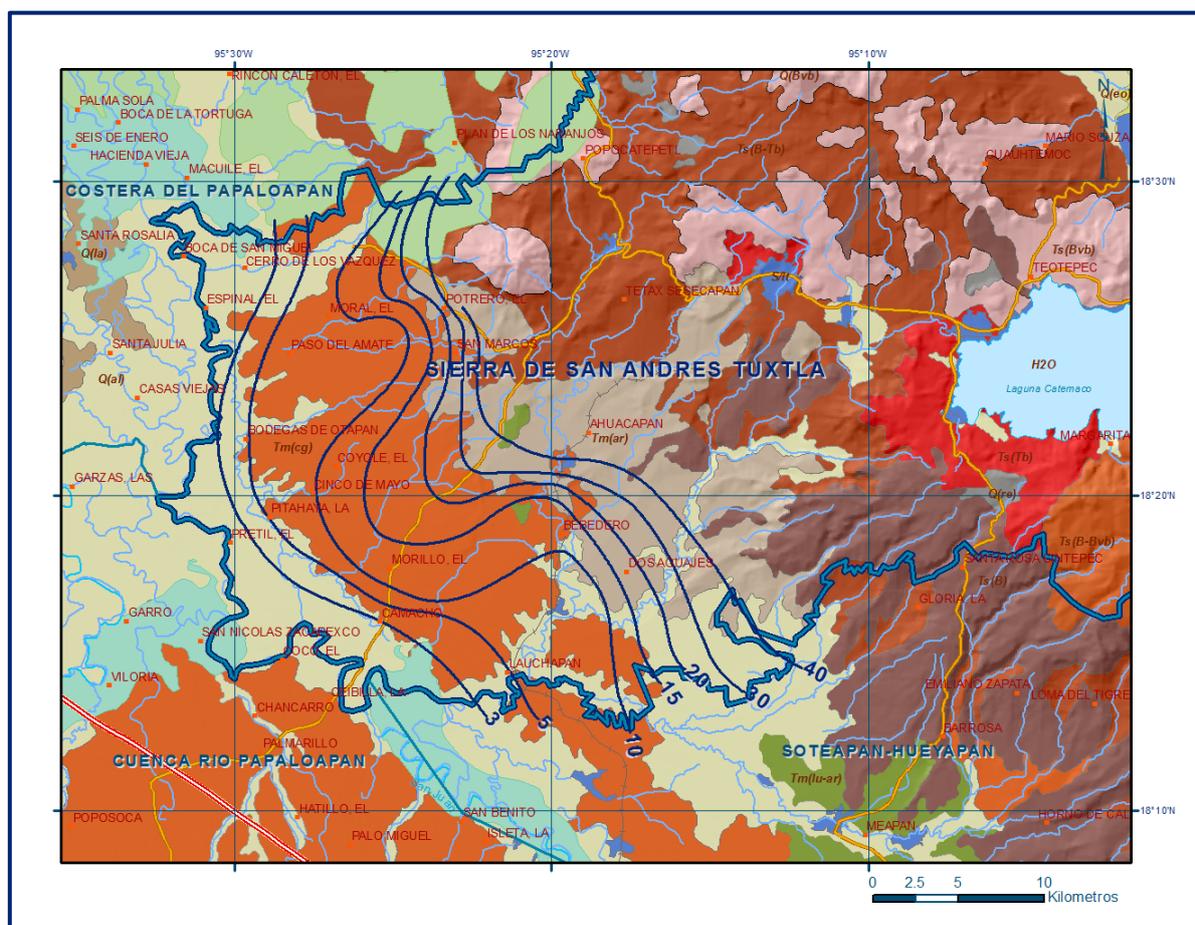


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)



Ahuacapan y en el poblado El Moral; en tanto que las recuperaciones son de 1 a 5 m, es decir de 0.2 a 1.0 m anuales, y se presentan en torno de los abatimientos hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas y hacia al río San Juan. En la mayor parte de la zona de explotación no se registran cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6). Debido a que la recarga es muy superior al volumen de extracción, no se observan alteraciones o distorsiones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

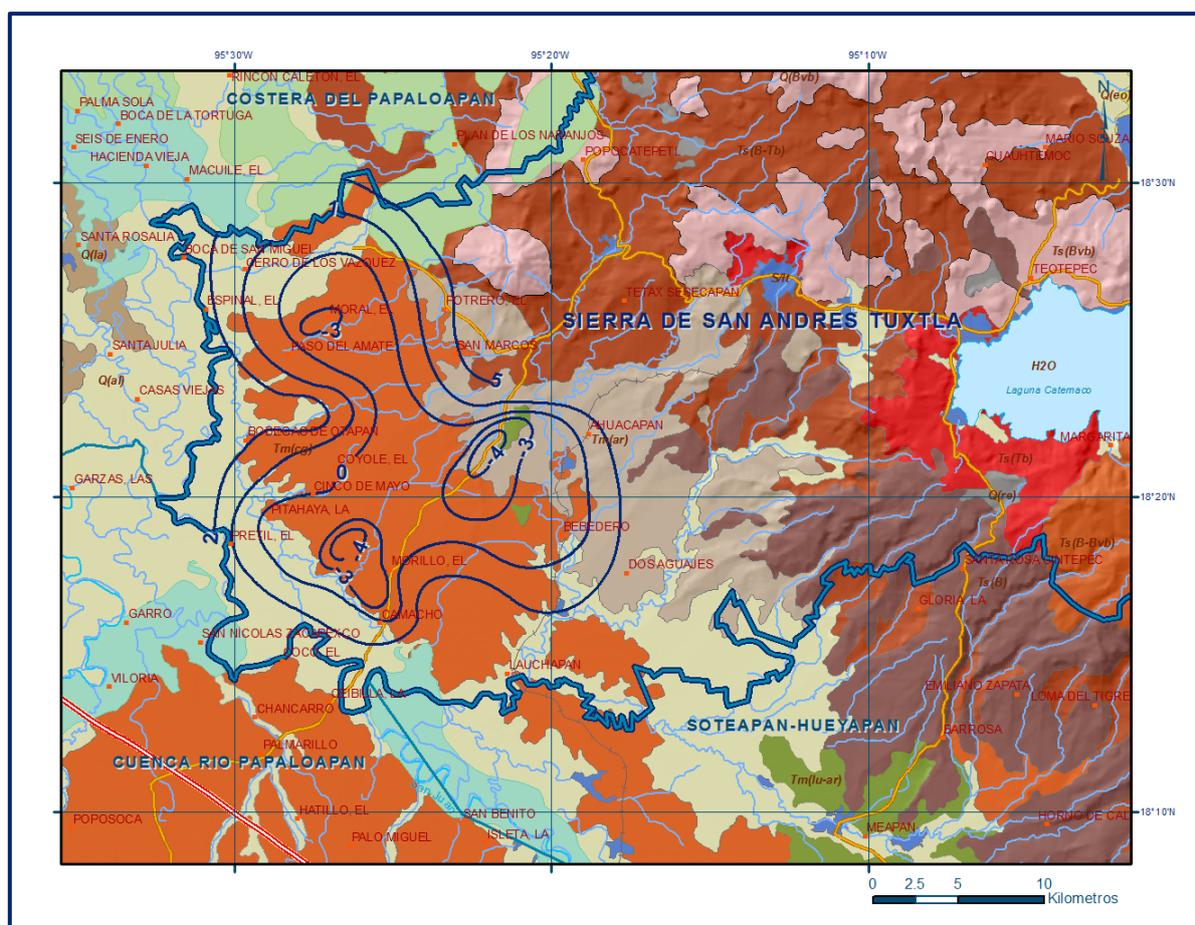


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2014-2019)

### 5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2005, se tomaron 4 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, iones mayoritarios y sólidos totales disueltos (STD).

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos presenta valores que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm

establecido en la modificación Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores son inferiores a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

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 baja ( $C_1$ ) y contenido bajo de sodio intercambiable ( $S_1$ ), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones. Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada-sódica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas volcánicas.

## **5. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA**

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2017, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Norte, se registró la existencia de 41 aprovechamientos más importantes del agua subterránea, ya que de acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), existen 1363 aprovechamientos, la gran mayoría norias. De total de obras censadas, 39 están activas y 2 inactivas temporalmente; respecto al uso del aprovechamiento, 3 son utilizadas para uso agrícola, 31 para abastecimiento de agua potable, 1 para uso industrial, 4 para servicios, 1 para uso doméstico y 1 para uso múltiple.

Debido a la abundancia de agua superficial, el volumen calculado de extracción conjunta es de **2.5 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 1.3 hm<sup>3</sup> (53.1%) son para uso público-urbano, 1.1 hm<sup>3</sup> (44.9%) corresponden al uso agrícola y 0.1 hm<sup>3</sup> (2.0%) para otros usos.

Adicionalmente, a través de **3 manantiales** identificados se descarga un caudal conjunto de 1,297 lps, que equivalen a **40.9 hm<sup>3</sup> anuales**, destinados a diferentes usos.

## **6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2014-2019, en un área de balance de **578 km<sup>2</sup>**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

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

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

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 en el acuífero:

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

## **7.1. Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del 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 las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Debido a que los volúmenes de agua subterránea para uso público-urbano y agrícola son pequeños, para fines del balance la recarga incidental se considera despreciable.

### **7.1.1. Recarga vertical (Rv)**

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V(S)$ ) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance.

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

Donde:

- Rv**= Recarga vertical
- Eh**= Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B**= Bombeo
- Sh**= Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR**= Evapotranspiración
- Dm**= Descarga a través de manantiales
- Dfb**= Descarga por flujo base de ríos
- $\Delta V(S)$** = Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene lo siguiente:

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

### 7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

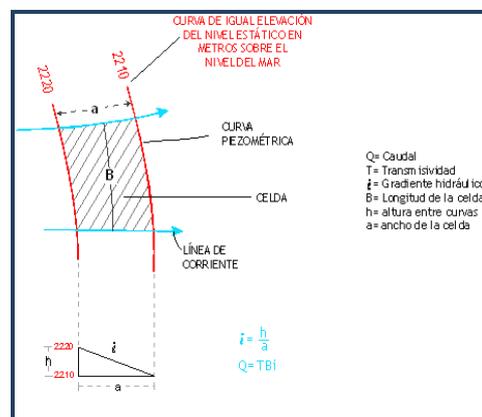
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

- Q**= Caudal ( $m^3/s$ )
- 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 una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **30.1 hm<sup>3</sup> anuales**.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	3600	3300	5	0.003	0.016	0.5
E2	3950	3420	5	0.003	0.017	0.5
E3	3540	1490	20	0.003	0.143	4.5
E4	1480	1350	20	0.003	0.066	2.1
E5	2785	1520	20	0.003	0.110	3.5
E6	6900	1000	20	0.003	0.414	13.1
E7	7960	1655	10	0.003	0.144	4.6
E8	3825	2685	10	0.003	0.043	1.3
TOTAL						30.1

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

## 7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros, a través de manantiales (Dm) y por flujo base de ríos (Dfb).

### 7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **2.5 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **10.7 hm<sup>3</sup> anuales**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$ (m)	T ( $m^2/s$ )	CAUDAL Q ( $m^3/s$ )	VOLUMEN ( $hm^3/año$ )
S1	3890	1900	3	0.006	0.037	1.2
S2	3200	1545	3	0.004	0.025	0.8
S3	7080	1360	3	0.003	0.047	1.5
S4	4860	3300	3	0.003	0.013	0.4
S5	5060	2970	3	0.006	0.031	1.0
S6	5540	1875	3	0.006	0.053	1.7
S7	3780	1540	3	0.005	0.037	1.2
S8	3040	1700	3	0.006	0.032	1.0
S9	6600	1660	5	0.003	0.060	1.9
<b>TOTAL</b>						<b>10.7</b>

### 7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

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

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 24.5 °C y 2,077.5 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de **1,316.7 mm anuales**, como se muestra a continuación:

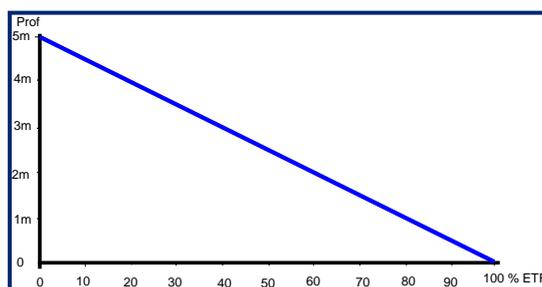
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	24.5		
P(mm) =	2077.5	P <sup>2</sup> =	4316006.25
L =	1647.80625	L <sup>2</sup> =	2715265.44
ETR (mm)	1316.7		

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



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 66.7 hm<sup>3</sup> anuales.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm <sup>3</sup> /año)
3	3	97.0	1.3167	0.4	51.1
3 a 5	4	59.3	1.3167	0.2	15.6
	<b>TOTAL</b>	<b>156.3</b>		<b>TOTAL</b>	<b>66.7</b>

#### 7.2.4. Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 3 manantiales importantes: El Tular, Yuribia y El Platanillo, que en conjunto descargan un caudal de 1,297 lps, que equivalen a 40.9 hm<sup>3</sup> anuales. Por lo tanto, **Dm = 40.9 hm<sup>3</sup> anuales.**

#### 7.2.5. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de la estación hidrométrica Puente Grande, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, el Río Los Tuxtlas presentó un caudal estimado de 2.49 m<sup>3</sup>/s de flujo base, en el estiaje del periodo 1973-2014, que representan un volumen de 78.5 hm<sup>3</sup> anuales. Por lo tanto, **Dfb = 78.5 hm<sup>3</sup> anuales.**

### 7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2014-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento

específico  $S_y = 0.06$  para las lutitas y areniscas y  $0.15$  para los basaltos y conglomerados se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

**$\Delta VS$** = Cambio de almacenamiento en el período analizado

**S**= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

**A**= Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

**h**= Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de  $-7.9 \text{ hm}^3$ , es decir, un promedio anual de  $-1.6 \text{ hm}^3$ .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2014-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	$S_y$	$\Delta V(S)$ (hm <sup>3</sup> /año)
-4	-4.0	5.2	0.06	-1.2
-3 a -4	-3.5	26.7	0.06	-5.6
-3	-3.0	2.3	0.06	-0.4
0 a -3	-1.5	145.5	0.06	-13.1
1 a 0	0.5	135.5	0.06	4.1
5 a 1	3.0	27.7	0.06	5.0
2 a 1	1.5	36.2	0.06	3.3
	<b>TOTAL</b>	<b>379.2</b>	<b>TOTAL</b>	<b>-7.9</b>
	<b>Promedio anual</b>			<b>-1.6</b>

### 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:

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

$$R_v = 10.7 + 2.5 + 66.7 + 40.9 + 78.5 - 30.1 - 1.6$$

$$R_v = 167.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h \\ R &= 167.6 + 30.1 \\ R &= 197.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

## 7. 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:

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

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

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

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **197.7 hm<sup>3</sup> anuales**, todos son recarga natural.

### 8.2. Descarga natural comprendida (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 Sierra de San Andrés-Tuxtla, su valor es 163.5 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 10.7 hm<sup>3</sup> corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia los acuíferos vecinos Cuenca de Río Papaloapan, Costera del Papaloapan y

Soteapan-Hueyapan, 78.5 hm<sup>3</sup> al flujo base del río Los Tuxtlas, 40.9 hm<sup>3</sup> a la descarga de los manantiales y 33.4hm<sup>3</sup> al 50% de la evapotranspiración que debe comprometerse para preservar el ecosistema ribereño del Río San Juan, Por lo tanto, **DNC = 163.5 hm<sup>3</sup> anuales.**

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

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **13'824,816 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

### **8.4. Disponibilidad 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 197.7 - 163.5 - 13.824816 \\ \text{DMA} &= 20.375184 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **20'375,184 m<sup>3</sup>** para otorgar nuevas concesiones.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua. 2001. Estudio geohidrológico de los acuíferos de la Cañada Poblana-Oaxaqueña en los estados de Puebla y Oaxaca, y Sierra de San Andrés, en el estado de Veracruz. Realizado por Ariel Consultores, S.A.

Comisión Nacional del Agua. 2005. Estudio de evaluación hidrogeológica de los sistemas acuíferos de la cuenca del río Papaloapan localizados en los estados de Veracruz, Oaxaca y Puebla. Realizado por Consorcio de Ingeniería Mexicana, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua. 2010. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Sierra de San Andrés-Tuxtla, estado de Veracruz.

Comisión Nacional del Agua, 2011. Estudio de reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos Tecolutla, Martínez de la Torre-Nautla, Valle de Actopan, Omealca-Huixcolotla, Perote-Zalayeta, Costera de Coatzacoalcos, Sierra de San Andrés Tuxtla, Los Naranjos, Sotepan-Hueyapan, Costera del Papaloapan y Álamo-Tuxpan en el estado de Veracruz. Realizado por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2019. Información piezométrica, censo e hidrometría del acuífero Sierra de Andrés-Tuxtla, estado de Veracruz.

Servicio Geológico Mexicano, 2004. Carta Geológica-Minera E15-1-4 "Coatzacoalcos" Escala 1:250.000.