

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CUENCA RÍO PAPALOAPAN (3019),
ESTADO DE VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes.....	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero	3
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFIA	6
3.1	Provincias fisiográficas.....	6
3.2	Clima.....	7
3.3	Hidrografía.....	8
3.4	Geomorfología.....	9
4	GEOLOGIA.....	9
4.1	Estratigrafía.....	10
4.2	Geología estructural	15
4.3	Geología del subsuelo	16
5	HIDROGEOLOGIA.....	17
5.1	Tipo de acuífero	17
5.2	Parámetros hidráulicos	18
5.3	Piezometría	18
5.4	Comportamiento hidráulico	18
5.4.1	Profundidad del nivel estático.....	18
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3	Evolución del nivel estático	20
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	21
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	22
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	23
7.1	Entradas	23
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	24
7.1.3	Recarga incidental (Ri).....	25
7.2	Salidas.....	26
7.2.1	Bombeo (B)	26
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	26
7.2.3	Evapotranspiración (ETR).....	26
7.2.4	Descarga por flujo base de ríos (Dfb)	28
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔV_S)	28
8	DISPONIBILIDAD	29
8.1	Recarga total media anual (R)	30
8.2	Descarga natural comprendida (DNC)	30
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	31
9	BIBLIOGRAFÍA	32

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 Cuenca Río Papaloapan, definido con la clave 3019 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Veracruz, entre los paralelos 17°31'56" y 18°26'22" de latitud norte y los meridianos 94°49'16" y 96°11'17" de longitud oeste, comprendiendo una superficie de 7,280 km².

Limita al sur norte con los acuíferos Costera del Papaloapan y Sierra de San Andrés Tuxtla; al noroeste con Los Naranjos; al este con Soteapan-Hueyapan; al sureste con

Costera de Coatzacoalcos, todos ellos pertenecientes al estado de Veracruz. Al sur y oeste limita con el acuífero Tuxtepec, del Estado de Oaxaca (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero cubre en su totalidad los municipios Cosamaloapan de Ocampo, Otatitlán, Tlacotalpan, Tuxtilla, Chacaltianguis, José Azueta, Playa Vicente, Carlos A. Carrillo, Isla y Juan Rodríguez Clara; casi la totalidad del territorio de San Juan Evangelista y Sayula de Alemán; así como de manera parcial los municipios de Acayucan, Oluta, Texistepec y Jesús Carranza; todos ellos pertenecientes al estado de Veracruz.

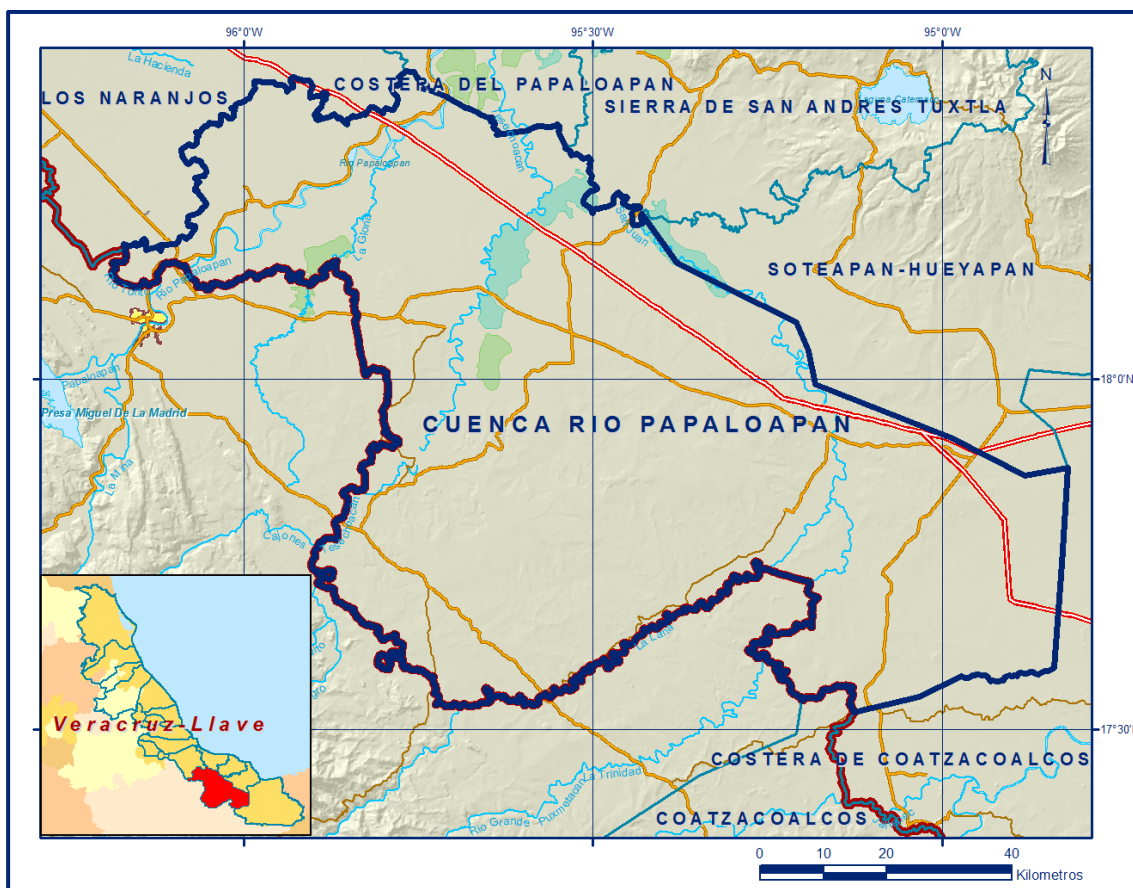


Figura 1. Localización del acuífero

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

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 él está sujeto 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.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 3019 CUENCA RÍO PAPALOAPAN

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	95	25	48.2	18	14	9.4	
2	95	22	50.3	18	9	55.6	
3	95	18	32.5	18	7	49.2	
4	95	12	31.4	18	4	49.7	
5	95	11	31.0	18	2	22.8	
6	95	10	56.5	17	59	33.7	
7	94	59	17.5	17	54	57.7	
8	94	52	55.4	17	51	41.2	
9	94	49	15.6	17	52	23.0	
10	94	49	48.3	17	44	11.4	
11	94	50	25.7	17	35	15.2	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE MUNICIPAL
12	94	58	33.7	17	34	29.4	
13	95	2	1.3	17	32	47.8	
14	95	7	35.5	17	31	26.3	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	95	12	4.9	17	32	28.5	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	96	10	12.9	18	11	8.4	DEL 16 AL 17 POR EL LIMITE MUNICIPAL
17	95	46	2.2	18	26	21.5	DEL 17 AL 18 POR EL LIMITE MUNICIPAL
18	95	32	25.2	18	19	58.1	DEL 18 AL 1 POR EL LIMITE MUNICIPAL
1	95	25	48.2	18	14	9.4	

Sólo en su extremo suroriental 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 agrícola. 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). Una pequeña área del extremo noroccidental del área de acuífero se ubica en el sitio RAMSAR “Sistema Lagunar Alvarado”, decretado el 2 de febrero de 2004.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación de cobertura regional, entre los más importantes y recientes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE COSAMALOAPAN, VERACRUZ. Realizado en 1981 para el Gobierno del Estado de Veracruz por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. Su objetivo fue determinar la condición geohidrológica de los acuíferos, analizar la calidad del agua subterránea y superficial con el propósito de definir la fuente de captación y localizar sitios adecuados para la perforación de pozos para el abastecimiento de agua potable a la zona. Proponer perforar uno o dos pozos a una profundidad máxima de 200 m para explotar un caudal de 65 lps.

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 CUENCA RÍO PAPALOAPAN, 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.

3 FISIOGRAFIA

3.1 Provincias fisiográficas

El acuífero Cuenca Río Papaloapan se ubica en la provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo de México, según la clasificación fisiográfica de Raisz (1959) modificada por el Ordoñez (1964). Por otra parte, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI (1990), pertenece a la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur, 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 km² en la zona occidental de la provincia y unos 2,000 km² en la porción oriental, formándose entre ellas el Lago de Catemaco.

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, para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región es cálido subhúmedo, con las siguientes tres variantes: $Aw_0(w)$ que registra en las zonas de elevaciones menores de 200 msnm del extremo norte; es el más seco de este tipo. $Aw_1(w)$, se presenta en la porción oriental rodeando a la zona con la variante de clima anterior, a elevaciones que varían de 0 a 100 msnm de altitud, presenta humedad intermedia dentro de este tipo. Por último, el clima $Aw_2(w)$ se registra en la mayor parte de la superficie del acuífero, a elevaciones menores de 100 msnm, es el más húmedo dentro de este tipo. La diferencia entre estos tipos es en el índice P/T, que para la primera variante es menor de 43.2, de 43.2 a 55.3 para la segunda y mayor de 55.3 para la tercera variante. En una región del extremo suroccidental se presenta el clima cálido húmedo con abundantes lluvias de verano (Am) en donde el mes más seco presenta una lluvia acumulada menor a 60 mm, con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. Los cuatro tipos de clima presentan un régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvias invernales entre 5 y 10.2% del total anual, con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 13 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero:

Cosamaloapan, Isla, Juan Rodríguez Clara, Acayucan, Jesús Carranza, Jaltipan de Morelos, Playa Vicente, Nopalapan, Otatitlán, Nuevo Ixcatlán, Santa Elena, La Florencia y San Juan Evangelista, cuyo registro comprende el periodo, 1983-2015. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración real de **1,400 mm, 25.2 °C y 1,500 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 localiza en la Región Hidrológica número 28 (RH 28) "Papaloapan", Subregión Hidrológica Río Papaloapan, en la cuenca del mismo nombre. La Región Hidrológica 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 Costera del Papaloapan comprende la porción central de esta 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.

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. Localmente, la región está dividida en 3 sistemas hidrológicos o subcuencas: el Río Blanco en el noroeste, Llanuras de los ríos Papaloapan y Tesechoacán en el centro, el Río San Juan en la porción norte y una porción de cuenca del Río Coatzacoalcos al sureste.

El Río Papaloapan nace en las inmediaciones de Coajimoloyas, en la Sierra Juárez, tomando una dirección general hacia el NW con el nombre de Río Grande, recibe las aportaciones de los ríos Las Vueltas, Tomellín, Apoala y San Pedro, labrando el cañón de Tomellín. Los principales ríos de la región tienen un patrón de escurrimiento de tipo dendrítico o ramificado bien desarrollado y en menor proporción subparalelo.

Los escurrimientos son de tipo intermitente y sólo los ríos más importantes son perennes, que mantienen un caudal base importante durante el estiaje. En el territorio del acuífero no existe infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua superficial.

3.4 Geomorfología

En la superficie del acuífero las elevaciones topográficas varían de 6 y 180 msnm. Las mayores elevaciones se localizan en la porción sur, conformado lomeríos que alcanzan a desarrollar un drenaje radial y conformar cimas redondeadas. Los escurrimientos superficiales son generalmente de régimen torrencial, que labran su curso por valles y lomeríos paralelos a las corrientes principales.

En la superficie del acuífero se distinguen dos unidades geomorfológicas: Cerros y lomeríos y planicies aluviales. Los cerros y lomeríos se presentan en la porción noroeste del acuífero, están constituidos por fragmentos angulosos a subredondeados de rocas calcáreas y volcánicas, ligeramente consolidadas, embebidos en una matriz areno-arcillosa. Presentan elevaciones promedio de 100 a 180 msnm y se caracterizan por la formación de pequeñas mesetas alargadas y paralelas que fueron labradas por la acción erosiva de las corrientes superficiales. Las planicies aluviales por su parte se distribuyen prácticamente en toda el área del acuífero, conformando la unidad geomorfológica de mayor extensión, tienen un origen exógeno acumulativo del Cuaternario y Cenozoico Superior y se componen de material acumulativo aluvial y por depósitos de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales. Presenta alturas de 6 a 50 msnm.

4 GEOLOGIA

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 la iniciación 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.

En la superficie que cubre el acuífero no existen afloramientos rocosos, con excepción de la porción occidental. De esta forma, su entorno geológico se limita a la caracterización del patrón sedimentológico de los materiales granulares que se distribuyen en la extensa planicie aluvial que caracteriza la región, el cual está directamente relacionado con la evolución del cauce del Río Papaloapan, en el que la acumulación, distribución y tipo de materiales sedimentados está gobernado por la energía de su corriente y la migración espacial de sus canales tributarios.

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).

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 con cubiertas discordantemente por la Formación Chicontepec, de edad Paleoceno.

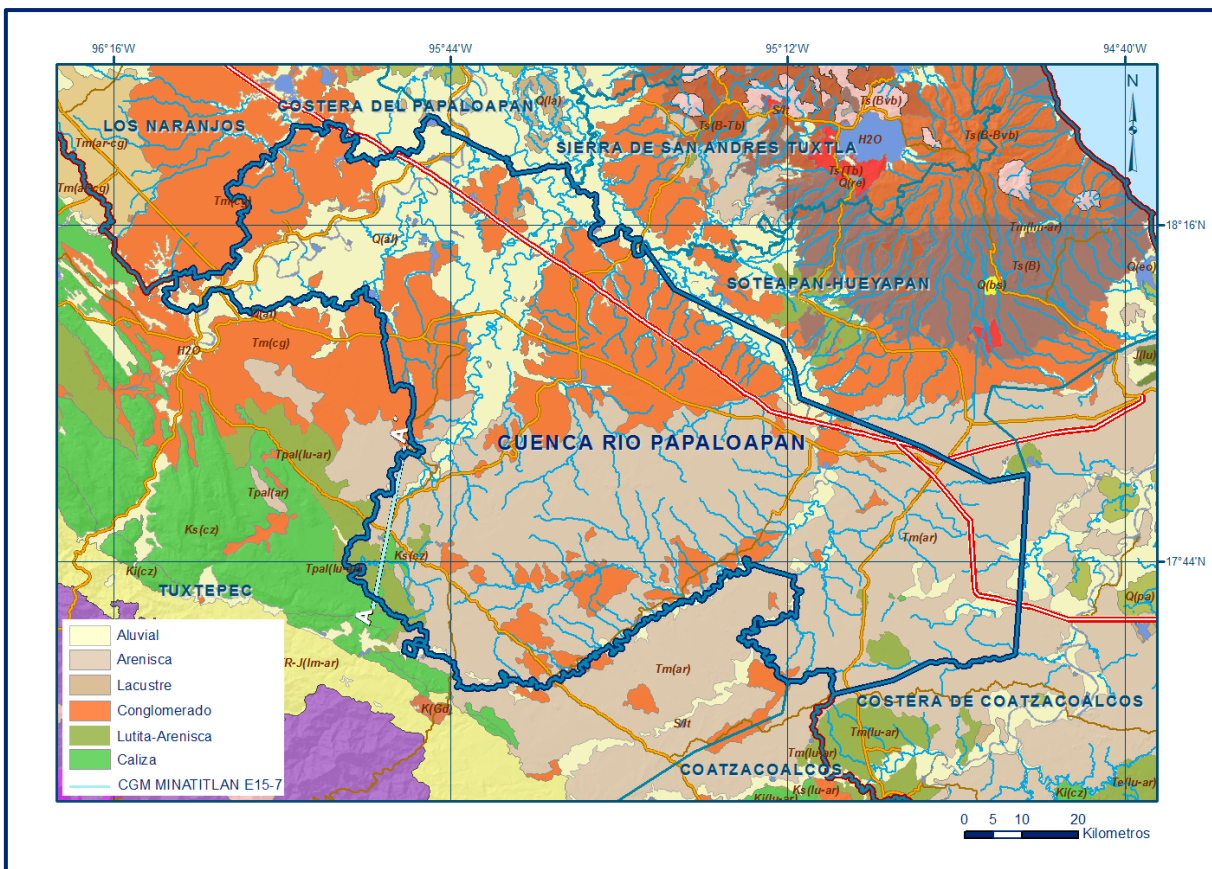


Figura 2. Geología general del acuífero

CRETÁCICO MEDIO

Formación Orizaba

Nombre propuesto F. Viniegra (1965) para denominar a una potente secuencia de calizas de plataforma ampliamente distribuida en la región de Orizaba, Ver., la cual consiste de calizas de color gris claro a café, que por su textura pueden ser divididas en dos facies, a las que nombró facies arrecifal y facies subarrecifal, localizadas en el flanco occidental del cerro Escamela, situado al nor-noreste de la ciudad de Orizaba. Consiste de un potente paquete de calizas biogénicas de hasta 2,500 m de espesor, con estratificación que varía de delgada a gruesa, en donde es común observar estratos de 40 cm hasta cuerpos tabulares muy gruesos de más de 2.5 m de espesor. Se caracteriza por presentar abundante fauna de rudistas y miliólidos que ubican su ambiente de depósito en una plataforma somera, es común que presente lentes y nódulos de pedernal negro. En el área del acuífero aflora de manera aislada en la porción suroccidental.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Atoyac

Consiste de estratos de caliza de ambientes de borde de plataforma, de color beige, dispuestos en capas gruesas y masivas, que afloran formando el núcleo de los anticlinales.

Formación Méndez

Definida por Jeffreys en 1910, al describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris y café con fractura nodular, que sobreyace a la Formación San Felipe. Su localidad tipo se ubica sobre el km 62 de la vía del ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, a 300 m al este de la estación Méndez. En el área del acuífero está constituida por una secuencia bastante homogénea de lutitas calcáreas y margas, estratificadas en capas delgadas que en ocasiones llegan a constituir paquetes masivos, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y depósitos aluviales. Su fracturamiento es típico por el intemperismo, produciéndose un intenso lajamiento y pizarroicidad, que dan origen a montículos con apariencia de dunas, subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales. Su espesor promedio es de 300 m y se correlaciona dentro del área de estudio con la unidad arcillo-arenosa del Cretácico Superior (Formación Cárdenas). Se le asigna una edad Campaniano–Maestrichtiano y aparentemente fue depositada en un fondo marino de aguas relativamente profundas, con abundante aporte de material terrígeno fino.

Sus afloramientos se encuentran distribuidos hacia la porción meridional del acuífero en donde se encuentran en los flancos de una estructura anticlinal, en cuyo núcleo se presentan las rocas de la Formación Atoyac.

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 sí 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 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. Conforman las zonas de lomeríos y llanuras aluviales que caracterizan a este acuífero, constituidos por sedimentos fluviales provenientes de los altos topográficos que fueron transportados por las corrientes del Río Papaloapan.

Depósitos Lacustres-Palustres

Esta unidad representa a los depósitos arcillosos y arenosos 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, se presentan interestratificados en capas laminares delgadas. Su expresión morfológica es de llanuras y están expuestas principalmente, en las regiones topográficamente más bajas del sureste del área. Incluye también los depósitos palustres compuestos por limos, arcillas y arenas de grano muy fino, de color oscuro y olor fétido característico, que ocupan la porción central del acuífero que forman el lecho del sistema lagunar asociado con el río Papaloapan, dando origen a la delimitación fisiográfica de sus llanuras de inundación. Se encuentran cubriendo a los sedimentos arenosos y

aluviales; su distribución es muy amplia y se le asigna un espesor promedio de 10 m, aunque en algunas zonas puede ser mayor.

4.2 Geología estructural

La presencia de los aparatos volcánicos en esta zona es el producto de una fase distensiva que adelgaza la corteza y provoca el ascenso de los magmas básicos sobre zonas de debilidad. De esta forma, considerando que los cuerpos volcánicos se encuentran orientados en una dirección NW-SE, esta dirección podría corresponder con una zona de fracturamiento profundo. No se aprecian en superficie estructuras de régimen dúctil-frágil en las rocas sedimentarias. Las estructuras están representadas por fracturas y aparatos volcánicos. 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)

A nivel local, la reducida superficie que presentan los pliegues no permite establecer con mayor precisión sus características geométricas; sin embargo, de acuerdo al estilo que se manifiesta en otros acuíferos se asocia con anticlinales amplios sensiblemente simétricos, orientados en una dirección NW-SE. Se considera que en el subsuelo los materiales cenozoicos manifiestan los efectos de una deformación extensiva, manifestada a través fallas normales lístricas con un comportamiento tipo dominó con su echado buzando hacia el NE.

4.3 Geología del subsuelo

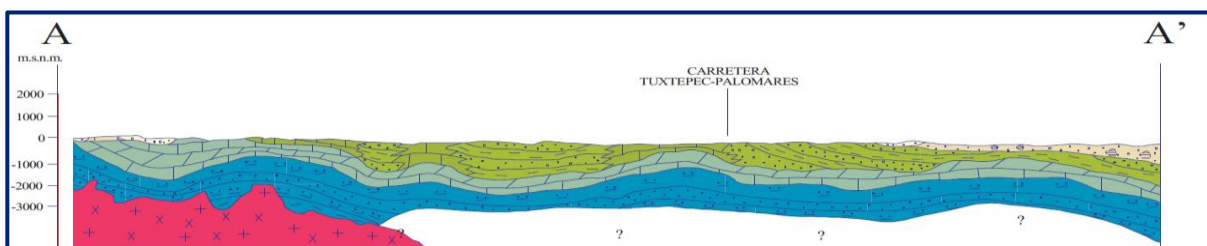
La Planicie Costera se encuentra cubierta por una cuña de rocas sedimentarias consolidadas y no consolidadas del Cenozoico, que descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía de pocos metros, hacia las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, a más de 6,000 m en el subsuelo marino.

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 Papaloapan, Tesechoacán y San Juan, entre otros, y sus arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, litorales, vulcanoclásticos, areniscas y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen algunas decenas de metros de espesor. 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, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

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.

La figura 3 muestra una sección geológica esquemática que atraviesan el acuífero de forma longitudinal en una dirección NW-SE, 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 "Minatitlán" E15-7 Esc. 1:250,000 (SGM, 2000)

Figura 3. Sección geológica esquemática

5 HIDROGEOLOGIA

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 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 Papaloapan, Tesechoacán y San Juan, entre otros 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 el acuífero. Sin embargo se pueden adoptar valores de pruebas de corta duración realizadas en abatimiento y recuperación en el 2005 en los acuíferos vecinos, al oeste el acuífero Los Naranjos y al este el acuífero Sierra de San Andrés Tuxtla, los cuales tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica. Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales reportaron valores de transmisividad que varían en un rango de **1.8 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 **3.6×10^{-5} a $1.25 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (4.0 a 11.8 m/d)**, 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, las zonas de mayor espesor saturado o los depósitos de eólicos de las dunas costeras.

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 0.15** para los depósitos clásticos de mayor granulometría, y de **0.01 a 0.06** para los sedimentos más finos.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles de agua subterránea, se cuenta con información recabada, de los estudios realizados en 2005, además de registros históricos durante el periodo de 2004-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de las aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2019 que tiene una mejor y mayor distribución espacial de los pozos. 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 del nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 3 a 50 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía desde el cauce de los ríos Papaloapan, Tesechoacán y San Juan hacia los lomeríos que conforman los límites de los valles, conforme se asciende topográficamente. Los

niveles estáticos más someros, menores de 5 m, se registran en la porción norte y noroccidental del acuífero, entre las planicies de inundación de los ríos y arroyos; en tanto que las mayores profundidades, de 30 a 50 m, se presentan en la región suroriental, en la zona ubicada entre los poblados Isla, Juan Rodríguez Clara, Villa Juanita y Los Tigres (figura 4).

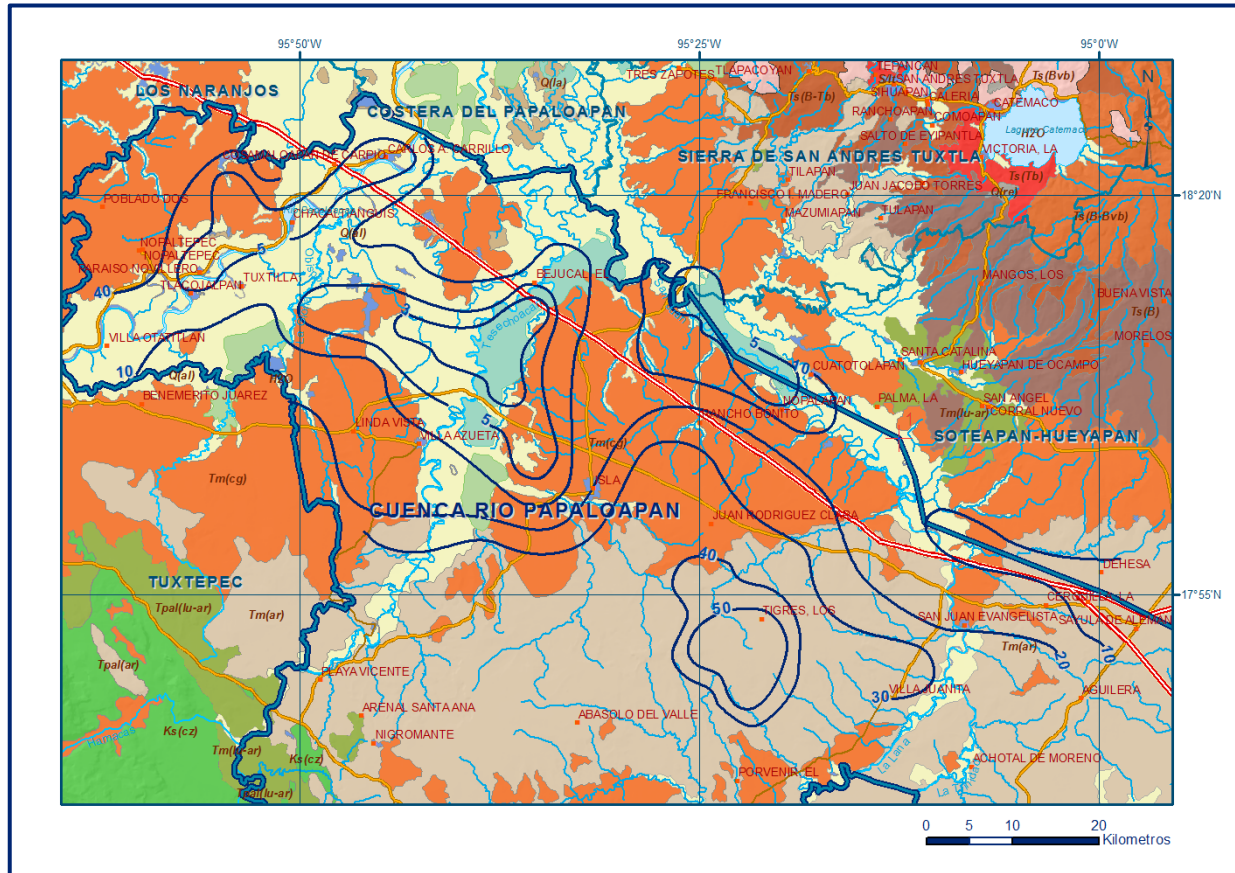


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que varían de 2 a 180 msnm, los cuales se incrementan de las planicies de inundación de los ríos Papaloapan, Tesechoacán y San Juan, donde se localizan las cargas hidráulicas más bajas, hacia los lomeríos. Las mayores elevaciones se presentan en las porciones noroccidental y suroriental del acuífero, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia las planicies, mostrando una dirección preferencial del flujo subterráneo SW-NE, con alimentaciones provenientes del flanco occidental. En la zona suroriental, entre los poblados Los Tigres y Abasolo del Valle, se observa un

domo en donde se registran las mayores elevaciones, de 100 a 180 msnm, desde donde el flujo subterráneo se desplaza de manera radial (figura 5).

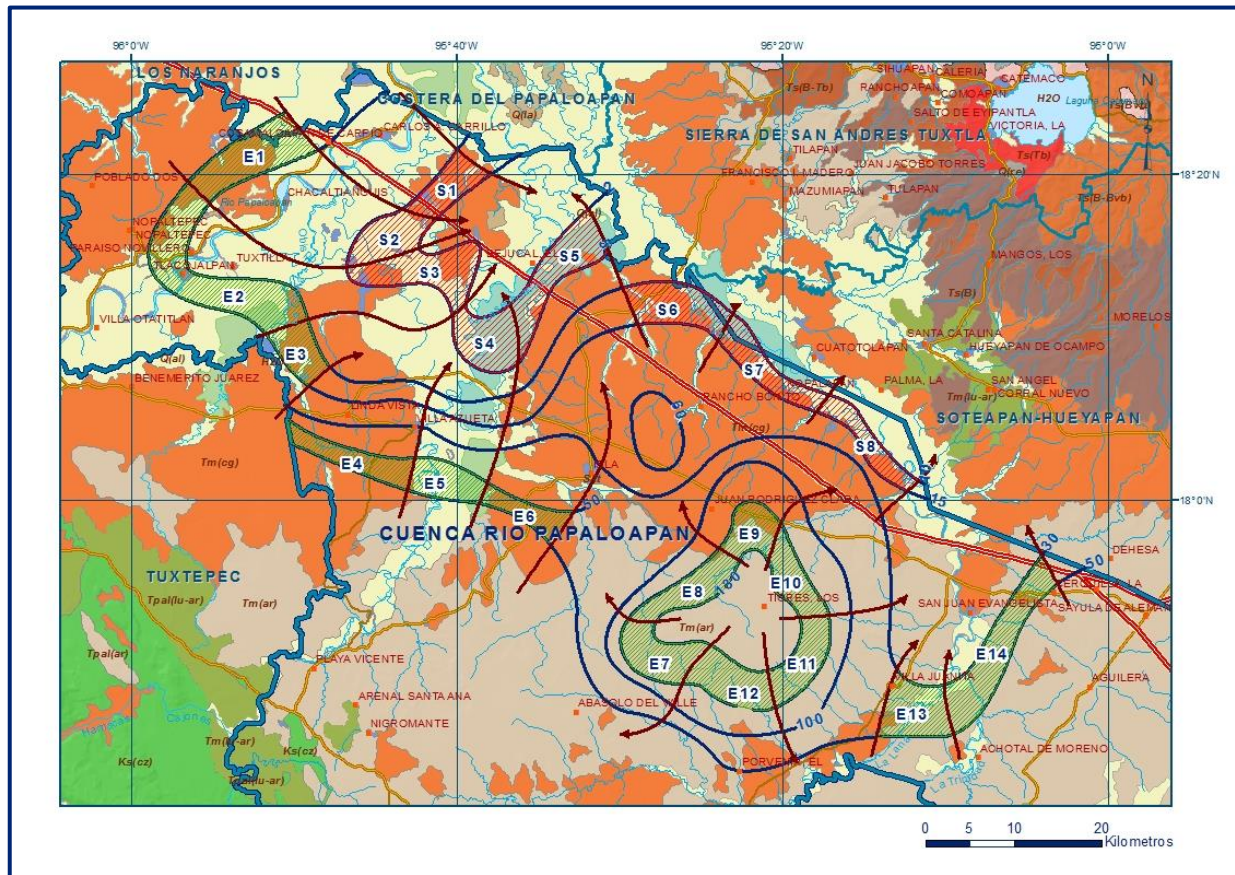


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración del nivel estático para el período 2009-2019 registró valores de recuperación y abatimiento. Los valores de abatimiento varían de 2 a 5 m, es decir 0.2 a 0.5 m anuales, con valores puntuales de 10 m, 1.0 m anuales, y se presentan en la porción noroccidental del acuífero, entre los poblados Chacaltianguis, Nopaltepec, Tuxtilla, Linda Vista y el Bejucal. Los valores puntuales de 10 m de abatimiento para el periodo analizado, se presentan localmente en el poblado Villa Juanita. Por otra parte, las recuperaciones son también de 2 a 5 m, 0.2 a 0.5 m anuales, y se observaron en la porción central y suroriental, entre los poblados Isla, Juan Rodríguez Clara, Los Tigres y San Juan Evangelista (figura 6).

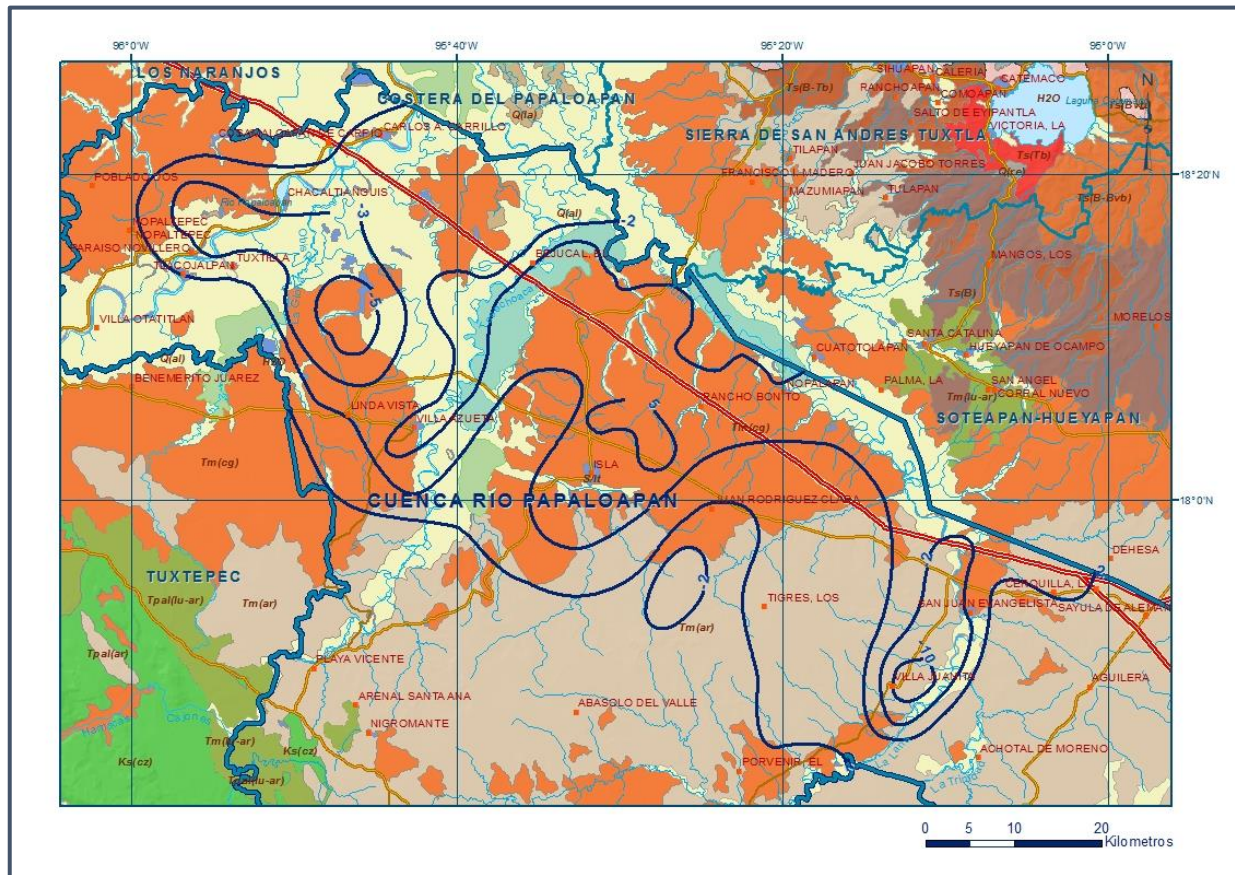


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte del estudio realizado por la CONAGUA en 2005, se colectaron 18 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 principales, sólidos totales disueltos (STD), hierro, manganeso, nitratos, fosfatos y análisis bacteriológicos.

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 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En 4 muestras la concentración de hierro rebasa el límite máximo permisible para consumo humano de 0.30 mg/l, establecido en la mencionada norma; el valor máximo fue de 1.07 mg/. Con respecto al manganeso, no se detectaron concentraciones que rebasaran el límite máximo permisible de 0.15 mg/l, establecido en la misma norma.

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 a media (C_1 a C_2) 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 identificaron varias familias del agua, destacando de manera general la bicarbonatada-cálcica y bicarbonatada-magnésica, que representan agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia.

Es evidente el riesgo de contaminación por las fuentes potenciales, principalmente por las actividades agrícolas que usan fertilizantes y agroquímicos, en menor proporción por la descarga de aguas residuales sin tratamiento y por la falta de sistemas de alcantarillado.

6 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 285 aprovechamientos más importantes del agua subterránea, ya que de acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa), existen 7,633 aprovechamientos, la gran mayoría norias. De total de obras censadas, 252 están activas y 33 inactiva; 123 son para uso agrícola, 88 para abastecimiento de agua potable, 7 para uso industrial, 15 para servicios, 21 para uso doméstico-pecuario y 31 para uso múltiple.

El volumen calculado de extracción conjunta es de tanto solo **66.0 hm³ anuales**, de los cuales 17.7 hm³ (26.8%) son para uso público-urbano, 43.7 hm³ (66.2%) corresponden al uso agrícola, 1.4 hm³ (2.1%) para uso industrial y 2.8 hm³ (4.2%) para uso múltiple, 0.3 hm³ (0.5%) para servicios y 0.1 hm³ (0.2%) para doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se plateó para el periodo 2009-2019, en un área de balance de **3,641 km²**, 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).

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 (ΔV_S) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

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

Donde:

R_v= Recarga vertical
E_h= Entradas por flujo subterráneo horizontal
R_i= Recarga incidental
B= Bombeo
S_h= Salidas por flujo subterráneo horizontal
ETR= Evapotranspiración
D_{fb}= Descarga por flujo base de ríos
ΔV(S)= Cambio en el volumen almacenado

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

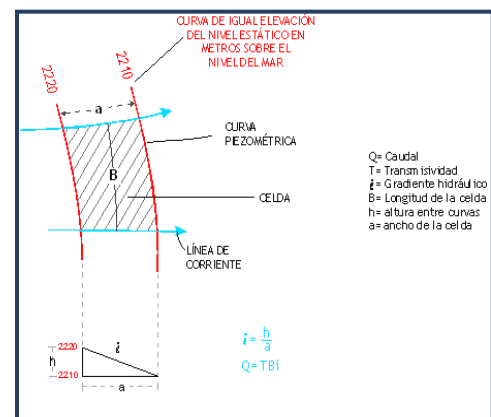
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de 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 (m³/s)
T= Transmisividad (m²/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 **54.9 hm³ anuales**.

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

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	13225	4330	5	0.0012	0.0020	0.0305	1.0
E2	22728	3593	5	0.0014	0.0050	0.1581	5.0
E3	6591	4024	5	0.0012	0.0030	0.0246	0.8
E4	14175	2215	10	0.0045	0.0030	0.1920	6.1
E5	8121	3626	10	0.0028	0.0050	0.1120	3.5
E6	9420	1910	10	0.0052	0.0030	0.1480	4.7
E7	9569	4232	20	0.0047	0.0020	0.0904	2.9
E8	12277	3251	20	0.0062	0.0020	0.1511	4.8
E9	7139	5478	20	0.0037	0.0020	0.0521	1.6
E10	9155	3794	20	0.0053	0.0020	0.0965	3.0
E11	10360	3315	20	0.0060	0.0020	0.1250	3.9
E12	9233	4504	20	0.0044	0.0020	0.0820	2.6
E13	6867	5860	20	0.0034	0.0050	0.1172	3.7
E14	19282	3240	20	0.0062	0.0030	0.3571	11.3
TOTAL							54.9

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.

7.1.3 Recarga incidental (Ri)

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

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 43.7 hm³ al aplicar el 20% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 8.7 hm³ anuales.

Por otra parte, las pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varían según la zona y su estado físico, para este caso se consideró también un coeficiente de infiltración de 20%, que aplicado al volumen destinado al uso público-urbano de 17.7 hm³ resulta un volumen de 3.5 hm³ anuales. Por lo tanto, $R_i = 8.7 + 3.5 = 12.2$. **$R_i = 12.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$.**

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 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 **66.0 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas de agua subterráneas fueron calculadas de la misma manera en que se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración del nivel estático para el año 2019, tal como se muestra en la figura 5. Los resultados se muestran en la tabla 3, en donde se determina que el valor del volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **12.6 hm³ anuales**.

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

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	8332	3567	3	0.0008	0.0050	0.0350	1.1
S2	6413	6788	3	0.0004	0.0050	0.0142	0.4
S3	12790	4233	3	0.0007	0.0050	0.0453	1.4
S4	8519	5386	3	0.0006	0.0050	0.0237	0.7
S5	14311	3830	3	0.0008	0.0050	0.0560	1.8
S6	10728	4333	5	0.0012	0.0030	0.0371	1.2
S7	13841	2309	5	0.0022	0.0030	0.0899	2.8
S8	13885	2068	5	0.0024	0.0030	0.1007	3.2
TOTAL							12.6

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración es un parámetro que cuantifica la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera, es la pérdida de agua freática somera, debido a la evaporación y transpiración de las plantas. 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.

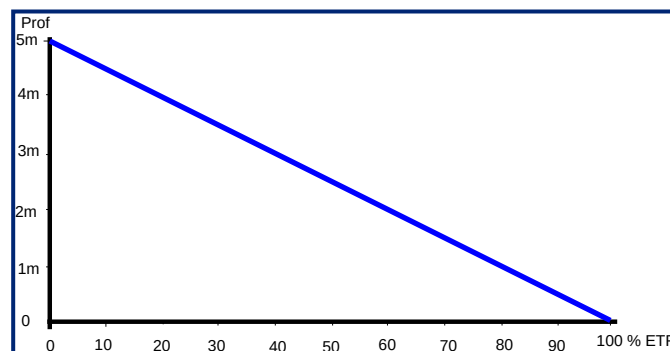
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 25.2 °C y 1,400 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de **1,122.8 mm anuales**, como se muestra a continuación:

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

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

T (°C) =	25.2		
P(mm) =	1400	P ² =	1960000
L =	1730.1504	L ² =	2993420.41
ETR (mm)	1122.8		

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 resultado obtenido se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 112.7 hm³ anuales**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

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)
4.5	4.5	222.6	1.1228	5	0.1	25.0
3 a 5	4	221.4	1.1228	5	0.2	49.7
3	3	84.6	1.1228	5	0.4	38.0
	TOTAL	528.6			TOTAL	112.7

7.2.4 Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de las estaciones hidrométricas Garro y La Ceibilla, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, los Ríos Tesechoacán y San Juan presentaron un caudal estimado de 47.13 y 81.17 m³/s de flujo base, respectivamente, medidos en el estiaje del periodo 1974-2014, que representan un volumen de 1486.3 y 2559.8 hm³ anuales, también respectivamente. Por lo tanto, **Dfb = 4,046.1 hm³ anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para el cálculo de almacenamiento se consideró la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 que se muestra en la figura 6. Considerando esa configuración y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.06$. Se determinó la variación de almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS= 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

En la tabla número 5 se puede observar los cálculos realizados para determinar el cambio de almacenamiento del periodo establecido el cual es de -201.3 hm^3 , es decir, un promedio anual de **-20.1 hm^3** .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	$\Delta V(S)$ ($\text{hm}^3/\text{año}$)
0 a 2	1	883.6	0.06	53.0
-10	-10	16.5	0.06	-9.9
-10 a -2	-6	107.7	0.06	-38.8
-2	-2	252	0.06	-30.2
-2 a 0	-1	1616.4	0.06	-97.0
-5	-5	84.6	0.06	-25.4
-5 a -3	-4	220.9	0.06	-53.0
	TOTAL	3181.7	TOTAL	-201.3
		Promedio anual		-20.1

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned}
 R_v &= S_h + B + ETR + D_{fb} - E_h - R_i \pm \Delta V(S) \\
 R_v &= 12.6 + 66.0 + 112.7 + 4,046.1 - 54.9 - 12.2 - 20.1 \\
 R_v &= 4,150.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 R &= R_v + E_h + R_i \\
 R &= 4,150.2 + 54.9 + 12.2 \\
 R &= 4,217.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}
 \end{aligned}$$

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **4,217.3 hm³ anuales**, de los cuales 4,205.1 hm³ son recarga natural y 12.2 hm³ recarga incidental.

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, su valor es 4,086.9 hm³ anuales, de los cuales 12.6 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia los acuíferos Costera del Papaloapan y Sotapan-Hueyapan, 28.2 hm³ al 25% de la evapotranspiración que debe comprometerse para preservar el ecosistema lagunar y ribereño de los ríos, y 4046.1 hm³ al flujo base de los Ríos Tesechoacán y San Juan. Por lo tanto, **DNC = 4,086.9 hm³ 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 (REPDa), 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 **113'371,206 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{MA} &= 4,217.3 - 4,086.9 - 113.371206 \\ \text{DMA} &= 17.028794 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **17'028,794 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuenca Río Papaloapan, estado de Veracruz.

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, 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, Soteapan-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 Cuenca Río Papaloapan, estado de Veracruz.

Gobierno del Estado de Veracruz, 1981. Estudio geohidrológico de fuentes de abastecimiento de agua potable a Cosamaloapan, Veracruz. Realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológico-Minera E15-7 “Minatitlán” Esc. 1:250.000.

Servicio Geológico Mexicano, 2004. Carta Geológico-Minera E15-1-4 “Coatzacoalcos” Esc. 1:250.000.