

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO COSTERA DE COATZACOALCOS
(3012), ESTADO DE VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	2
1. Antecedentes	2
1.1. Localización	2
1.2. Situación administrativa del acuífero	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	6
3.1. Provincias fisiográficas	6
3.2. Clima	8
3.3. Hidrografía	9
3.4. Geomorfología	10
4. GEOLOGÍA	11
4.1. Estratigrafía	11
4.2. Geología estructural	16
4.3. Geología del subsuelo	17
5. HIDROGEOLOGÍA	18
5.1. Tipo de acuífero	18
5.2. Parámetros hidráulicos	19
5.3. Piezometría	19
5.4. Comportamiento hidráulico	20
5.4.1. Profundidad al nivel estático	20
5.4.2. Elevación del nivel estático	20
5.4.3. Evolución del nivel estático	21
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	24
7.1. Entradas	24
7.1.1. Recarga vertical (Rv)	24
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	25
7.1.3. Recarga incidental (Ri)	26
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 (ΔVS)	28
8. DISPONIBILIDAD	30
8.1. Recarga total media anual (R)	30
8.2. Descarga natural comprendida (DNC)	30
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	31
8.4. Disponibilidad 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 Costera de Coatzacoalcos, definido con la clave 3012 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (SIGMAS), se localiza en el extremo suroriental del estado de Veracruz, en el límite con los estados de Oaxaca, Chiapas y Tabasco, entre los paralelos 17°08'11" y 18°12'45" de latitud norte y entre los meridianos 93°36'27" y 95°09'45" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 12,214 km².

Limita al noroeste con el acuífero Soteapan-Hueyapan; al oeste con Cuenca Río Papaloapan; ambos pertenecientes al estado de Veracruz; al sur y suroeste con Coatzacoalcos, del estado de Oaxaca; al sureste con los acuíferos Cintalapa y Ocozocuautla, pertenecientes al Estado de Chiapas; el este con Huimanguillo y al

noreste con La Chontalpa, pertenecientes al estado de Tabasco. Al norte su límite natural es el Golfo de México (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero comprende totalmente los siguientes municipios: Minatitlán, Cosoleacaque, Ixhuatlán del Sureste, Moloacán, Agua Dulce, Las Choapas, Uxpanapa, Hidalgotitlán, Jaltipan, Zaragoza y Oteapan; casi la totalidad del territorio de los municipios Jesús Carranza, Coatzacoalcos y Texistepec; y de manera parcial Sayula de Alemán, Oluta, Soconusco, Chinameca y Pajapan; todos ellos pertenecientes al estado de Veracruz.

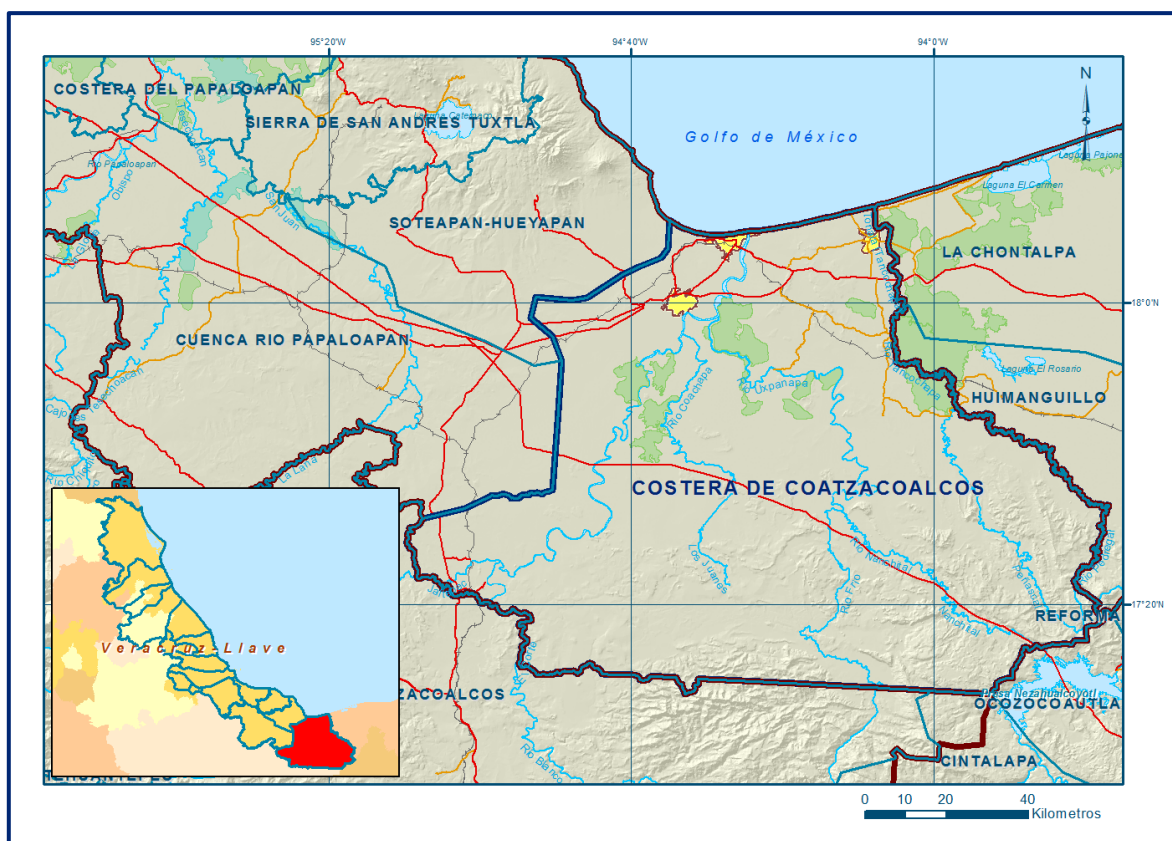


Figura 1. Localización del acuífero

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 Golfo Centro y al Consejo de Cuenca Río Coatzacoalcos, instalado el 16 de junio de 2000. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; en su porción central y norte rige el *“Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos mencionados en el presente ordenamiento, en el Estado de Veracruz”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 30 de noviembre de 1976. En una pequeña área del

extremo suroriental está en vigor el “Acuerdo que establece el Distrito de Riego, Drenaje y Control de Inundaciones del Bajo Río Grijalva, en el Estado de Tabasco”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de octubre de 1957. Ambos decretos de veda son de tipo II, en los que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones para usos domésticos.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 3012 COSTERA DE COATZACOALCOS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	94	50	25.7	17	35	15.2	
2	94	49	48.3	17	44	11.4	
3	94	49	15.6	17	52	23.0	
4	94	50	25.7	17	55	37.4	
5	94	53	19.6	17	58	3.6	
6	94	52	36.9	18	0	46.2	
7	94	47	54.3	18	0	20.0	
8	94	45	55.6	18	0	40.9	
9	94	41	6.7	18	3	49.6	
10	94	38	59.9	18	4	48.7	
11	94	36	0.6	18	6	1.2	
12	94	35	10.4	18	7	15.0	
13	94	34	58.8	18	10	55.2	DEL 13 AL 14 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
14	94	7	46.5	18	12	42.6	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	94	4	0.7	17	59	31.2	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	93	36	27.8	17	18	50.6	DEL 16 AL 17 POR EL LIMITE ESTATAL
17	94	0	36.8	17	8	39.6	DEL 17 AL 18 POR EL LIMITE ESTATAL
18	95	7	35.5	17	31	26.3	
19	95	2	1.3	17	32	47.8	
20	94	58	33.7	17	34	29.4	DEL 20 AL 1 POR EL LIMITE MUNICIPAL
1	94	50	25.7	17	35	15.2	

En la superficie restante, 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).

2. 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:

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA PLANICIE COSTERA DEL RÍO COATZACOALCOS, VERACRUZ. Realizado en 1981 por Ariel Construcciones, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Su objetivo fue evaluar la condición de explotación de los acuíferos, conocer su volumen de extracción, su geometría y funcionamiento hidráulico, para proponer zonas favorables para la explotación. Entre sus actividades relevantes destacan el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, muestreo de aguas para análisis fisicoquímicos, nivelación de brocales de pozos y ejecución de pruebas de bombeo. Concluye que el acuífero tenía una sobreexplotación local e incipiente, propone perforar algunos pozos a 200 m de profundidad en localidades diseminadas en la planicie y realizar exploraciones geofísicas en la zona de la Laguna El Ostión.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO HUAZUNTLÁN-CANTICAS, FUENTES DE ABASTECIMIENTO, COATZACOALCOS, VERACRUZ. Realizado en 1984 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. Su objetivo fue localizar nuevas fuentes subterráneas de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Coatzacoalcos y proponer el volumen adecuado de explotación. Propone perforar pozos a profundidades mayores de 150 m en las localidades de Barrancas, Mapachapa, Chapopote, Minatitlán. Cosoleacaque, Oteapa y Chimaneca.

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 COSTERA DE COATZACOALCOS, 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. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo con 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 Subprovincia Llanura Costera Veracruzana y una superficie menor, ubicada al noreste, pertenece a la Subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños.

La región suroriental que limita con el estado de Chiapas pertenece a la Provincia Fisiográfica Sierra de Chiapas y Guatemala, Subprovincia Sierra del Norte de Chiapas; en tanto que la región que se ubica al sur, en el límite con el estado de Oaxaca, pertenece a la Provincia Fisiográfica Cordillera Centroamericana, Subprovincia Sierra del Sur de Chiapas (Raisz, 1964).

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 con el 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.

La Subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños es surcada por los ríos Grijalva y Usumacinta que son los más caudalosos del país, así como por los ríos Tonalá, Chumpán y Candelaria, al este, cuyos cursos han sido inestables. Las zonas inundables abarcan amplias extensiones del oriente, lugar donde abundan las lagunas y pantanos permanentes. Sobre la margen occidental del Río Tonalá se localiza la penetración de esta provincia en territorio veracruzano, del cual comprende una superficie de 373 km² en dos municipios. En esta porción los sistemas de topoformas representativos son llanura costera inundable y valle de laderas tendidas

La Provincia Fisiográfica Sierra de Chiapas y Guatemala en México abarca parte de los estados de Tabasco, Chiapas y Veracruz. Las sierras que la conforman están plegadas y constituidas principalmente por rocas sedimentarias marinas del Mesozoico; orientadas preferentemente en dirección E-W y afectadas por fallamiento en este mismo sentido. En territorio mexicano es una sierra relativamente baja, con elevaciones inferiores a 2000 msnm. La Subprovincia

Sierras del Norte de Chiapas, en Veracruz ocupa una superficie de 1,557 km², que corresponden a la porción sureste del municipio Las Choapas. Los sistemas de topoformas representativos son denominados sierra compleja, lomerío suave y valle abierto.

La Provincia Cordillera Centroamericana inicia en el Istmo de Tehuantepec y se extiende en dirección sureste hasta la República de Nicaragua, atravesando los territorios de Guatemala, Honduras y El Salvador, es otro gran batolito ígneo emergido sobre el sitio de subducción de la placa de Cocos. En casi todo Chiapas, el cuerpo intrusivo ígneo está plenamente expuesto, pero a partir del volcán Tacaná, compartido entre México y Guatemala, queda casi todo sepultado por los productos de los numerosos volcanes juveniles de los países centroamericanos. En México abarca parte de los estados de Chiapas y Oaxaca, así como una pequeña porción de Veracruz. En la Subprovincia Sierras del Sur de Chiapas afloran las rocas graníticas del batolito, integrando sierras de orientación noroeste-sureste que se internan en territorio de Guatemala; sólo al norte de Santiago Niltepec, Oaxaca, se presenta un afloramiento de rocas volcánicas seguido por otro de rocas metamórficas con manchones calcáreos. Esta subprovincia forma parte de la zona conocida regionalmente como Sierra Atravesada.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, clima de la región es cálido húmedo (Am, Am(f) y A(f)) con lluvias abundantes en verano. Tiene una estación corta, seca, en la mitad fría del año, pero posee una cantidad total de lluvia suficiente para mantener el terreno húmedo durante todo el año. Presenta 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; y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total anual para las dos primeras variantes, y mayor de 10.2% para la variante A(f).

En una porción ubicada al noroeste del acuífero el clima se clasifica como cálido subhúmedo (Aw2), el más húmedo de este tipo, con lluvias en verano y un % de lluvias menores de 5% del total anual, con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. Al sur del acuífero, en pequeñas zonas de mayor elevación topográfica, se registra el clima (A)C(m)(f) semicálido húmedo, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. La precipitación anual es mayor de 500 mm y precipitación del mes más seco

mayor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 12 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Pajaritos, Minatitlán, Agua Dulce, Hidalgotitlán, Jaltipan de Morelos, San José del Carmen, Cuitláhuac, Tecuanapa, Tanchoapa, Nanchital, Coatzacoalcos y Barra de Tonalá, cuyo registro comprende el periodo, 1983-2013. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evapotranspiración real de **2400 mm, 26.0 °C y 2067 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-29 "Río Coatzacoalcos, Subregión Costera de Coatzacoalcos, en la cuenca del mismo nombre. La Región Hidrológica Coatzacoalcos se localiza en la porción sur de la llanura costera del Golfo de México, ocupando el extremo suroriental del estado de Veracruz, y está integrada por las cuencas A "Río Tonalá, Laguna del Carmen y Machona", y B "Río Coatzacoalcos", que desembocan en el Golfo de México y tienen su origen fuera de la entidad. El acuífero Costera de Coatzacoalcos comprende la porción central y norte de la región hidrológica.

El río Coatzacoalcos nace en la Sierra Atravesada, ubicada en el estado de Oaxaca, tiene 325 km de longitud y drena una cuenca de 17,369 km². Fluye en dirección oeste y en su recorrido recibe los aportes de los ríos Jaltepec, Chalchijalpa, Chiquito, Uxpanapa y Calzadas; dos terceras partes de su longitud son navegables. Desemboca en el punto más austral del golfo de México; junto a la población y en el puerto que llevan su mismo nombre.

Por otro lado, el río Tonalá nace en la Sierra de Chiapas y drena una cuenca de 5,697 km² que también es navegable durante el estiaje en más de 300 km de su recorrido total. En la planicie costera y antes de cambiar de nombre a Tonalá

recibe el nombre de Tancochapa, que sirve de límite entre los estados de Veracruz y Tabasco.

Los principales ríos de la región tienen un patrón de escurrimiento de tipo dendrítico o ramificado bien desarrollado. 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 sólo la presa La Cangrejera, ubicada al norte del poblado Teapa. No existe distrito o unidad de riego alguna.

3.4. Geomorfología

En la superficie del acuífero las elevaciones topográficas varían de 0 y 850 msnm. Las mayores elevaciones se localizan en la porción sur, conformado sierras plegadas que presentan drenaje radial y conforman cimas escarpadas, en donde se registran las mayores precipitaciones y generan 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.

En la superficie del acuífero se distinguen dos unidades geomorfológicas: Cerros y lomeríos, Sierras y Planicies aluviales. Los cerros y lomeríos ocupan la porción central y sur abarcando las partes más altas, hasta elevaciones de 150 msnm. Dicha porción corresponde a estructuras plegadas cuyos afloramientos están formados por sedimentos arenosos donde se ha desarrollado un drenaje dendrítico que se integra a los ríos Uxpanapa, Coatzacoalcos y Tonalá. Las sierras se ubican en los extremos sur y suroriental, hacia los límites con los estados de Oaxaca y Chiapas, respectivamente, y están conformadas por rocas sedimentarias plegadas cuyas elevaciones alcanzan 850 msnm. Por último, las planicies aluviales se distribuyen prácticamente en toda el área del acuífero, conformando la unidad geomorfológica de mayor extensión, tienen un origen exógeno acumulativo del Cuaternario y Terciario Superior y se componen de material acumulativo aluvial y por depósitos de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales. Presenta alturas menores de 50 msnm. Esta región es drenada por los ríos Coatzacoalcos y Tonalá hasta su desembocadura en el Golfo, en las partes más bajas se distinguen áreas pantanosas e inundables.

4. GEOLOGÍA

La mayor parte de la superficie del acuífero se ubica en el Terreno Maya (Campa y Coney, 1983) y su basamento está constituido por esquistos de clorita, sericita y cuarzo, metasedimentos cuarzopelíticos, rocas verdes y gabroicas, metamorfizadas en facies de esquistos verdes, y en ocasiones serpentinitas y franjas milonitizadas. A partir del Pérmico hasta el Triásico se desarrolla un arco magmático continental en la margen pacífica que origina rocas graníticas y granodioríticas con variaciones a dioritas y tonalitas, que constituyen el Macizo de Chiapas (Carta Geológica-Minera E15-7 "Minatitlán", escala 1:250,000. SGM, 2000). En la región afloran secuencia de rocas sedimentarias depositadas en las cuencas de Zongolica, Depresión Istmica y de la Sierra de Chiapas (figura 2).

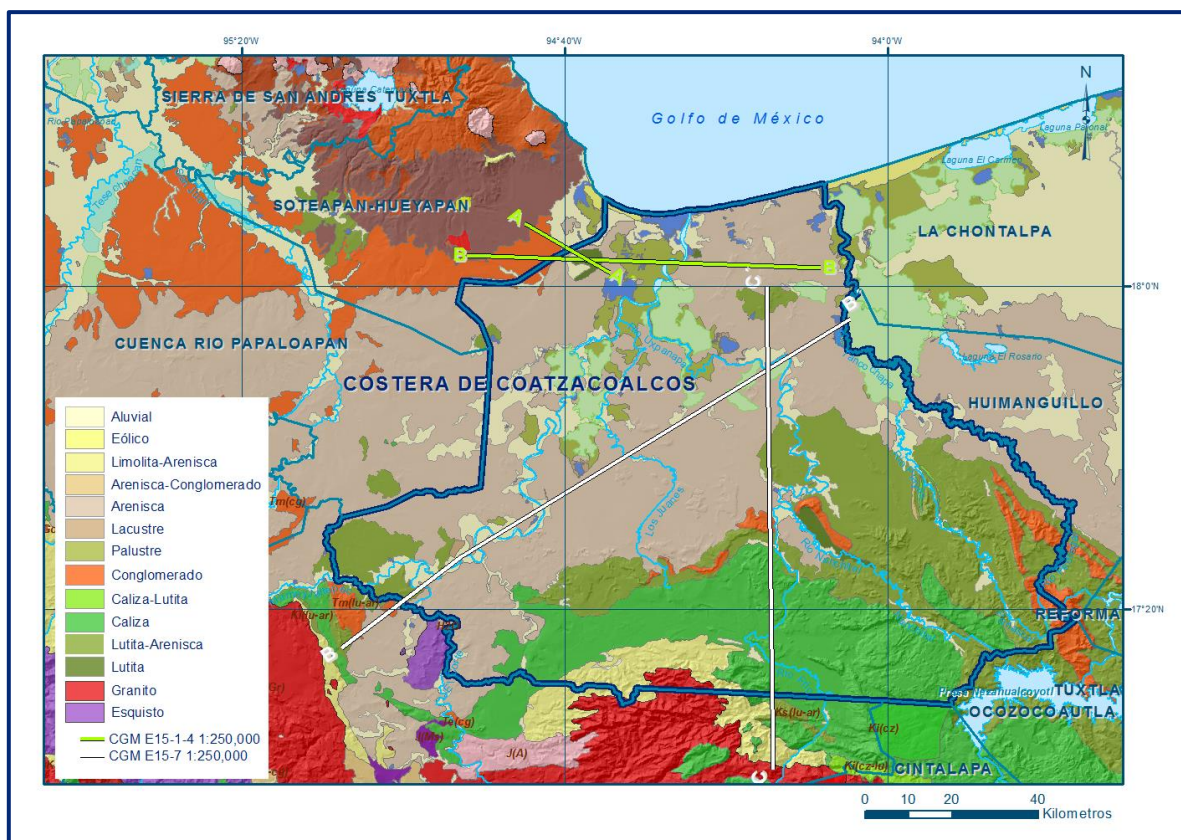


Figura 2. Geología general del acuífero

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 Medio al Reciente. A continuación, se describen de manera general las distintas unidades litológicas, comenzando con la más antigua.

JURÁSICO MEDIO

Formación Todos Santos

Sobreyace a las rocas intrusivas, como cobertura de traslape, y está constituida por limolitas, y areniscas y conglomerados, con intercalaciones de coladas andesíticas. Sobre esta formación se depositó la cobertura mesozoica del Terreno Maya, constituida por varias secuencias relacionadas a cuencas jurásicas (Depresión Ístmica), jurásicas-cretácicas (Cuenca de Zongolica y Sierra de Chipas) y Terciarias (Cuenca Terciaria del Golfo).

JURÁSICO MEDIO-SUPERIOR

CUENCA SALINA DEL ISTMO

No aflora, pero en el subsuelo los depósitos salinos que la conforman han sido identificados por gravimetría y perforaciones. Se presentan en forma de diapiros y estructuras dómicas cuya edad es aún controversial, ya que existen argumentos para ubicarlos en el Jurásico Superior y en el Jurásico Inferior y hasta el Triásico.

JURÁSICO SUPERIOR

CUENCA DEPRESIÓN ÍSTMICA

Se caracteriza por secuencias sedimentarias de distribución muy restringida, cuya unidad basal es la Formación Mogoñe constituida por calizas y lutitas apizarradas, que es cubierta por la Formación Porvenir conformada por calizas oolíticas arenos-conglomeráticas, sobre la cual descansa la Formación Potrerillos que presenta brechas calcáreo-terrágenas. Esta última es cubierta por la Formación Paso de Buques formada por calizas, que presenta un cambio de facies a la Formación Victoria, constituida por calizas y areniscas.

CUENCA SIERRA DE CHIAPAS

Se desarrolló sobre la Formación Todos Santos y su unidad basal la constituye la Formación Uxpanapa formada por calizas y dolomías, sobre la cual se depositó en forma concordante la Formación Edén constituida por calizas arcillosas, margas y lutitas; la que a su vez es sobreyacida discordantemente por la Formación San Ricardo, conformada por areniscas y limolitas

CRETÁCICO MEDIO

Formación Sierra Madre

Está conformada por calizas y dolomías que cubren indistintamente y de manera discordante a las secuencias de la Sierra de Chiapas y a Depresión Ístmica.

CUENCA DE ZONGOLICA

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 facie subarrecifal, localizadas en el flanco occidental del cerro Escamela, situado al nor-noreste de la ciudad de Orizaba. Consiste de un potente paquete potente de calizas biógenas 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 pizarrosidad, 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.

TERCIARIO

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.

CUENCA TERCIARIA DEL GOLFO

Las secuencias sedimentarias que la conforman cubren parcialmente a las rocas de las cuencas de Zongolica y de la Sierra de Chiapas. Está constituida en su unidad basal por los conglomerados polimícticos y lutitas de la Formación Conglomerado Uxpanapa y por las lutitas y conglomerados de la Formación Lutitas Nanchital, ambas de edad Eoceno; cubriendo a estas unidades se tiene a la Formación La Laja de edad Oligoceno, formada por lutitas y areniscas.

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.

La secuencia inicia con el depósito de una sedimentación continua que inició con la **Formación Depósito** del Mioceno Inferior, conformada por una secuencia de lutitas micacíferas con intercalaciones de tobas y cenizas volcánicas, sobre la cual descansa la **Formación Encanto** constituida por una alternancia de lutitas y areniscas, sobreyacida en forma concordante por 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.

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-Palustres

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, que ocupan la porción central del acuífero y que forma el lecho del sistema lagunar asociado con el río Coatzacoalcos, dando origen a la delimitación fisiográfica de sus llanuras de inundación. Se encuentran cubriendo a los sedimentos arenosos y aluviales; se le asigna un espesor promedio de 10 m, aunque en algunas zonas puede ser superior.

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

Estructuralmente en la región se observa una serie de anticlinales y sinclinales orientados simétricamente en dirección norte-sur. En la porción occidental se encuentra el anticlinal simétrico de Moloacan que posiblemente presente fallas en su flanco poniente; en la porción central se localiza el anticlinal de Cuichapa y en el extremo oriental se localiza el anticlinal Las Choapas que es una estructura de inclinación suave con traza definida sobre materiales arenosos.

De acuerdo con el marco tectónico, la región está relacionada con la apertura y evolución tectónica del Golfo de México que inicia con la separación de la zona sureste de México del supercontinente Pangea. Algunos autores consideran que durante el Triásico Tardío-Jurásico Medio, el Bloque Yucatán localizado para este tiempo en la porción que ocupa el Golfo de México, se movió hacia el sur hasta llegar a su posición actual a través de una falla transformante que permitió la

expansión del Golfo y deriva del Bloque Yucatán. Otros autores consideran que esta falla transformante de movimientos dextral cruzaba el Istmo de Tehuantepec; discrepan en el sentido de rotación del Bloque Yucatán. Dickinson y Coney (1980) suponen que el bloque se separó de Norteamérica mediante un “megashear” izquierdo que conectaba el sistema de expansión del Golfo de México con una zona de subducción, que actuaba a lo largo de la Costa del Pacífico y consideran que este bloque durante su separación de Norteamérica permanecía unido al bloque noroccidental de América del Sur, del cual se separó al terminar el movimiento del “megashear”, ocurrido entre 150 y 125 Ma. En la porción noroccidental se observa un estilo de deformación compresivo. Por una parte, un sistema de fallamiento transcurrente sinistral orientado NW-SE representado por las fallas Valle Nacional, Santa Cecilia, San Juan, Río Grande y Villa Alta; ese sistema transcurrente es el responsable del levantamiento del Bloque Guichicovi y su cubierta de lechos rojos. En el extremo suroriental se presenta un estilo de deformación discontinua de fallas de transcurrencia sinestrales, representado por las fallas Malpaso, Tuxtla y La Venta-Grijalva. Según Meneses Rocha, 1985, este sistema de fallas transcurrentes tuvo actividad a partir del Cretácico Medio y continuó hasta el Terciario, como resultado del movimiento sinistral del Bloque Chiapas-Yucatán con respecto al Bloque Honduras-Nicaragua, a través del sistema Motagua-Polochic. Mora O. (op cit.) considera que tuvo su inicio a partir del Mioceno Medio-Superior (Carta Geológica-Minera E15-7 “Minatitlán”, escala 1:250,000. SGM, 2000).

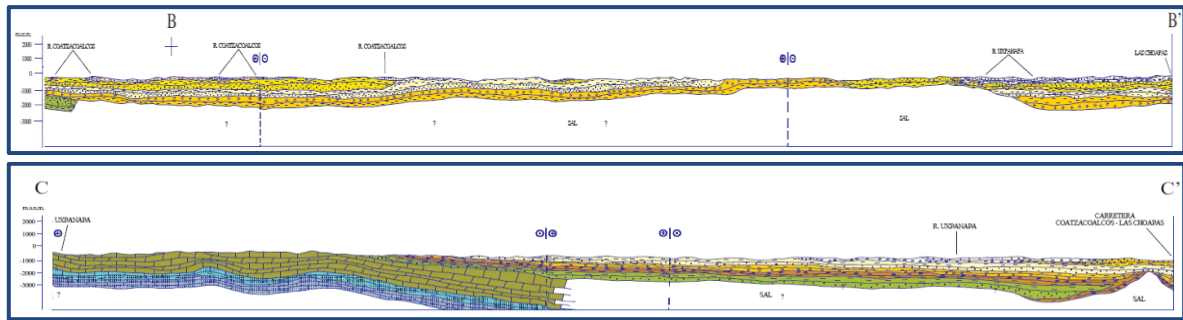
4.3. Geología del subsuelo

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.

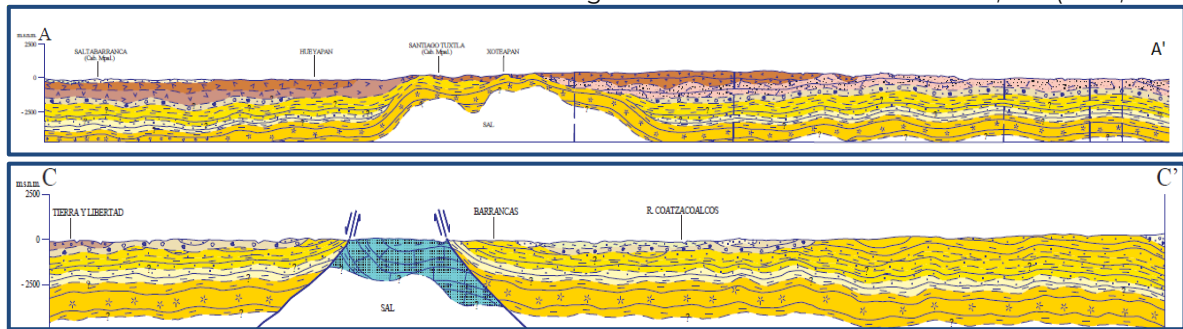
De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Coatzacoalcos, Tonalá, Coachapa y Uxpanapa, entre otros, y sus arroyos tributarios, así como depósitos vulcanoclásticos 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, entre las que destacan intercalaciones de areniscas y lutitas, 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. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de lutitas, limolitas y areniscas que constituyen las unidades litológicas del Jurásico. Las areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento o semiconfinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera Minatitlán E15-7. 1:250,000 (SGM, 2000)



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

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. 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 dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado, que conforman un acuífero de tipo **libre** heterogéneo y anisótropo de baja capacidad de almacenamiento. 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 Coatzacoalcos, Tonalá, Coachapa y Uxpanapa, entre otros y sus arroyos tributarios, así como depósitos 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, entre las que destacan intercalaciones de areniscas y lutitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de semiconfinamiento o confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Existe muy poca información de pruebas de bombeo realizadas en aprovechamientos localizados en este acuífero. Sin embargo, se pueden adoptar por correlación hidrogeológica los valores de algunas pruebas de corta duración realizadas en abatimiento y recuperación y de aforos llevados a cabo en 2005 en los acuíferos vecinos al noroeste Los Naranjos y Sierra de San Andrés Tuxtla, respectivamente, que 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 **155.5 a 864 m²/día (1.8×10^{-3} m²/s a 10.0×10^{-3} m²/s)**. Los valores de conductividad hidráulica varían de **3.6×10^{-5} a 1.25×10^{-4} 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 o las 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 0.15** 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 del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2011 además de registros históricos durante el periodo 1995-2019, 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 desde algunos centímetros, que se registran en las riberas de los ríos Coatzacoalcos, Tonalá, Coachapa y Uxpanapa así como en la inmediaciones de las lagunas y en la zona próxima a la costa; hasta 35 m, aumentando gradualmente de la zona costera y de las inmediaciones de las corrientes superficiales, hacia las estribaciones de las sierras y los lomeríos que lo delimitan, conforme se asciende topográficamente. Los valores más profundos, mayores de 25 m, se registran en la porción nororiental y oriental, en torno a las poblaciones Aguas Dulce y Las Choapas. En la porción norte y noroccidental, entre Coatzacoalcos y Minatitlán, se registraron profundidades que variaron de 5.0 a 25 m (figura 4).

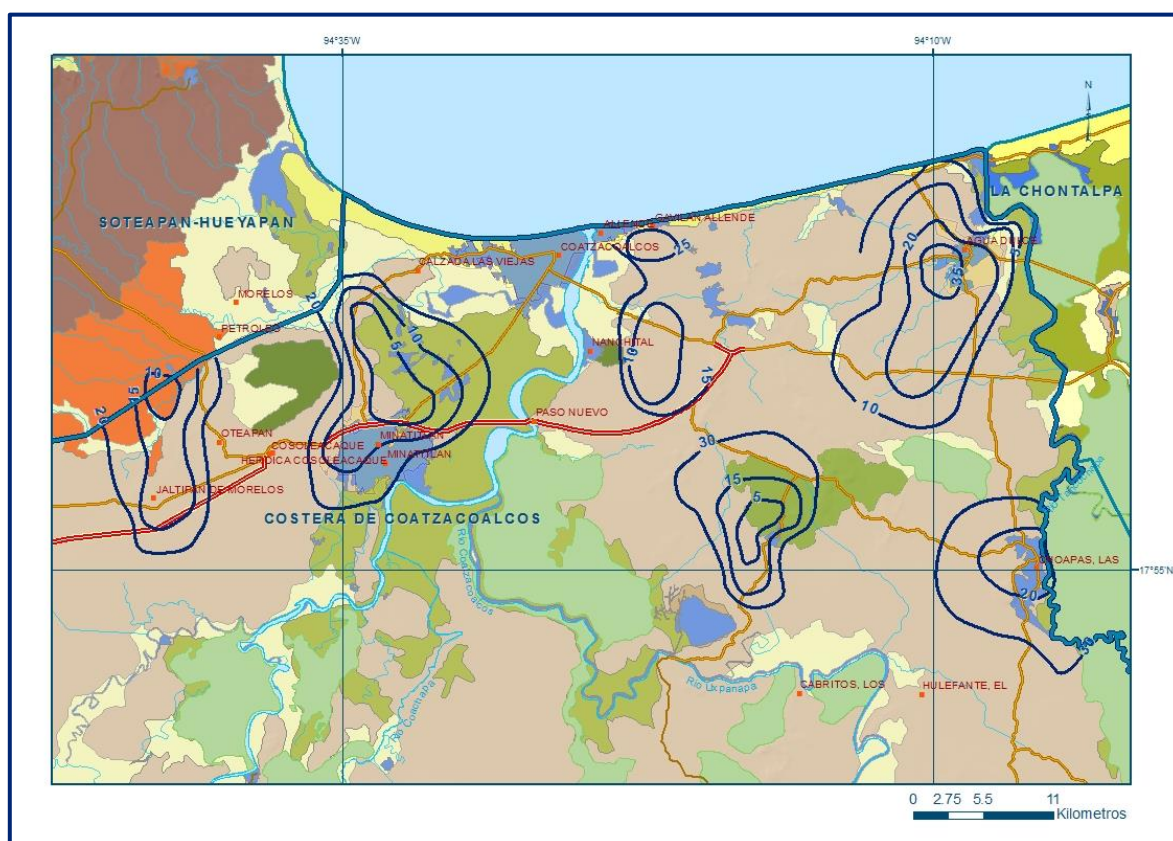


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores de carga hidráulica que varían entre 2 y 50 msnm, que se incrementan desde las llanuras de inundación de los ríos Coatzacoalcos, Tonalá, Coahuila y Uxpanapa. Los valores más altos de carga hidráulica, 40 a 50 msnm, se registran en la zona de Jaltipan de Morelos y al Noroeste de Las Choapas, desde donde descienden gradualmente hacia el suroeste por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia los ríos y hacia las lagunas. Los valores

más bajos, de 2 a 5 msnm, se presentan en el extremo noroccidental y norte, al norte de Minatitlán y en la zona costera de Coatzacoalcos, respectivamente, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo suroeste-noreste y sureste-noroeste, paralela a las direcciones de escurrimiento superficial, sin distorsiones causadas por la concentración de pozos o del bombeo (figura 5).

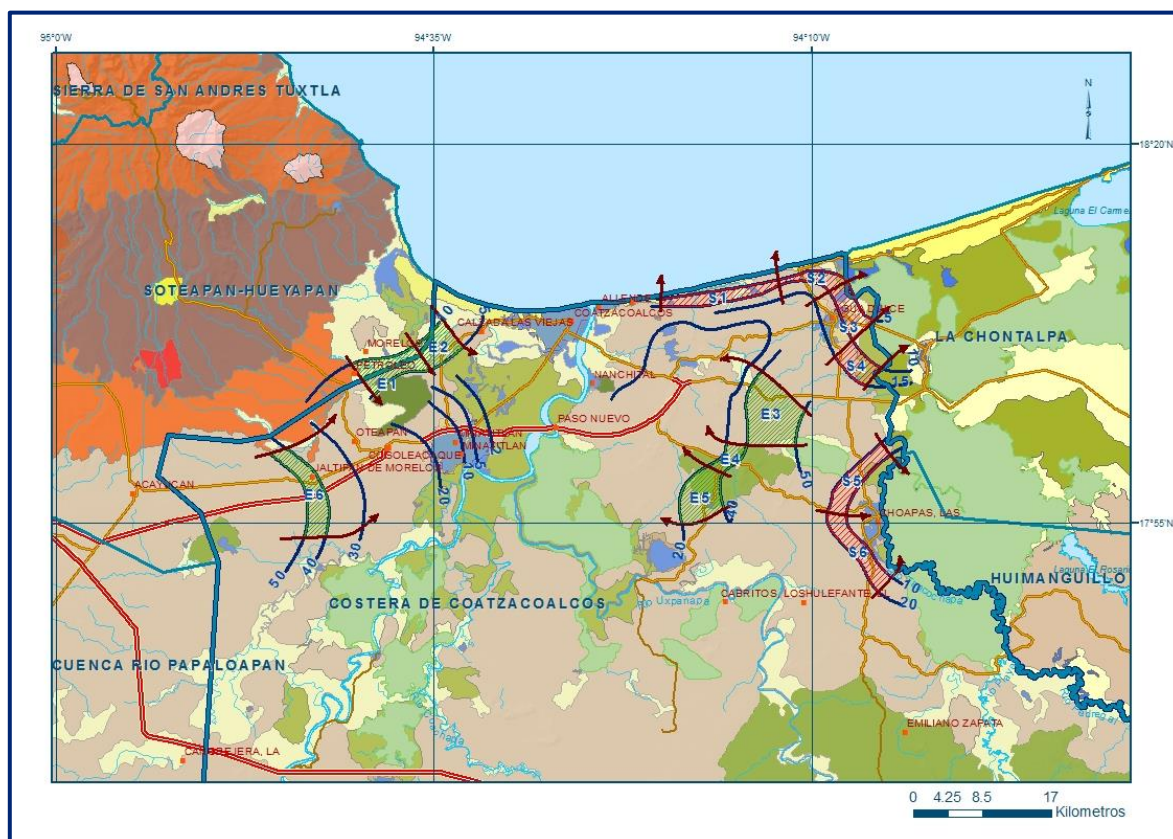


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2014-2019 registró valores de abatimiento y de recuperación. Los abatimientos son de 2 a 5 m, 0.4 a 1.0 m anuales, y se presentan de manera local al oeste de Minatitlán, este de Coatzacoalcos y en torno de Nanchital, asociados a la extracción de los pozos de las refinerías de PEMEX. Las recuperaciones son de 1 a 15m, es decir de 0.2 a 3.0 m anuales, y se registran en la porción noroccidental, entre Cosoleacaque y Jaltipan de Morelos, y de manera local en la región comprendida entre Paso Nuevo, suroeste de Aguas Dulce y Las Choapas. En la mayor parte de la superficie del acuífero 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 conos de abatimiento causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

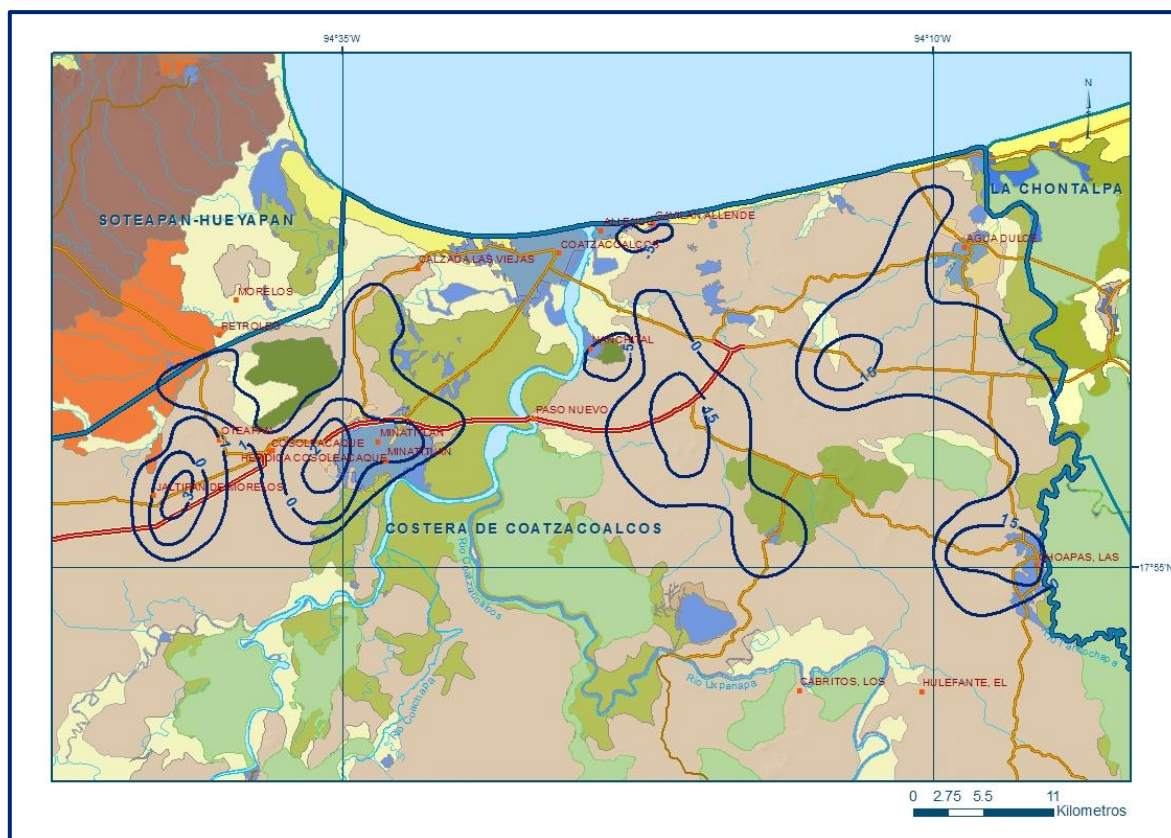


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2014-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La información de hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea disponible proviene de los resultados de laboratorio proporcionados por el Organismo de Cuenca Golfo Centro de la red de monitoreo en sólo 4 pozos localizados en las poblaciones La Cangrejera, Minatitlán, Nanchital y Allende, practicados durante el periodo 2013-2018. Las determinaciones incluyeron temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, iones principales, sólidos totales disueltos (STD), fierro, manganeso, arsénico, plomo, cadmio, mercurio, nitratos, fosfatos, compuestos orgánicos y análisis bacteriológicos. Los resultados de los análisis fisicoquímicos indican que las concentraciones de algunos iones y elementos sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. De manera general, 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. Sus valores extremos varían de 132 a 1584 ppm. El pH registró variaciones de 6.1 a 7.9, que representa agua ligeramente alcalina en la que existe predominio en el contenido de carbonatos, con respecto a los sulfatos. Con respecto a la temperatura del agua, se obtuvieron valores de 25.8 a 29.3 °C.

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

Los elementos y compuestos que sobrepasan el LMP que establece dicha NOM son plomo, fierro, coliformes totales, cloruros, dureza total y en el caso del pozo de Minatitlán, adicionalmente se detectó la presencia de benceno.

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 bajo contenido de sodio intercambiable (S_1), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones. Con respecto a las familias del agua por iones dominantes, es de esperarse la existencia de aguas predominantemente de la familia bicarbonatada-cálcica que representan agua de reciente infiltración, de tiempos muy cortos de residencia, asociada a la presencia de rocas calizas y volcánicas, que constituyen las zonas de recarga ubicadas en las sierras que delimitan el acuífero.

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, así como por la presencia de basureros y gasolineras. Es importante también el riesgo latente por contaminación con hidrocarburos debido a la existencia de la infraestructura de PEMEX.

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 278 aprovechamientos más importantes del agua subterránea, ya que de acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDa), existen 12,457 aprovechamientos, la gran mayoría norias. De total de obras censadas, 205 están activas y 73 inactivas temporalmente; 4 son para uso agrícola, 84 para abastecimiento de agua potable, 86 para uso industrial, 60 para servicios, 32 para uso doméstico-pecuario y 12 para uso múltiple.

Debido a la abundancia de agua superficial, el volumen calculado de extracción conjunta es de **56.3 hm^3 anuales**, de los cuales 37.1 hm^3 (65.9%) son para uso público-urbano, 14.2 hm^3 (25.2 %) para uso industrial, 2.8 hm^3 (5.0%) para servicios, 1.7 hm^3 (3.0 %) corresponden al uso múltiple, 0.3 hm^3 (0.5 %) para uso doméstico-pecuario y 0.2 hm^3 (0.4%) corresponden al uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2014-2019, en un área de balance de **1,719 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). Debido a que el volumen de agua subterránea para agrícola es pequeño, para fines del balance solo se considera la recarga incidental originada por el agua para uso público-urbano

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

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

Donde:

R_v: Recarga vertical
R_i: Recarga Incidental
E_h: Entradas por flujo subterráneo horizontal
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:

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

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

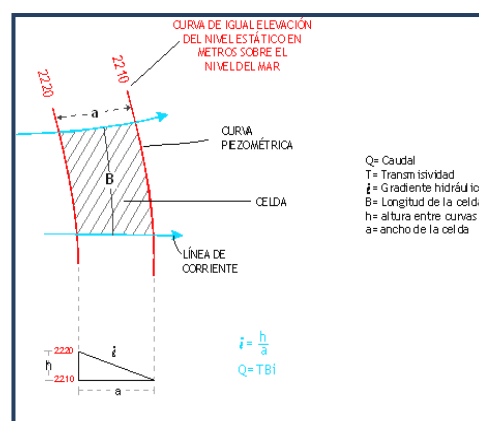
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de 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 **12.3 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	7355	2978	5	0.0017	0.0050	0.0617	1.9
E2	4572	3867	5	0.0013	0.0050	0.0296	0.9
E3	6423	7154	10	0.0014	0.0030	0.0269	0.8
E4	2180	4048	20	0.0049	0.0030	0.0323	1.0
E5	6498	4793	20	0.0042	0.0030	0.0813	2.6
E6	12083	2251	10	0.0044	0.0030	0.1610	5.1
TOTAL							12.3

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)

Tomando en cuenta que para uso público-urbano se utiliza un volumen promedio anual de 37.1 hm³, y un porcentaje de infiltración de 20% de recarga efectiva, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea y la presencia de sedimentos de permeabilidad media, se obtiene un volumen de recarga incidental de 7.4 hm³. Por tanto, **Ri = 7.4 hm³ 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 **56.3 hm³ 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 **18.5 hm³/año**.

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, se considera 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.

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	14007	1486	5	0.0034	0.0030	0.1414	4.5
S2	7355	1542	5	0.0032	0.0030	0.0715	2.3
S3	6212	2434	5	0.0021	0.0030	0.0383	1.2
S4	4980	2901	5	0.0017	0.0030	0.0257	0.8
S5	10019	2169	10	0.0046	0.0030	0.1386	4.4
S6	10405	1875	10	0.0053	0.0030	0.1665	5.3
TOTAL							18.5

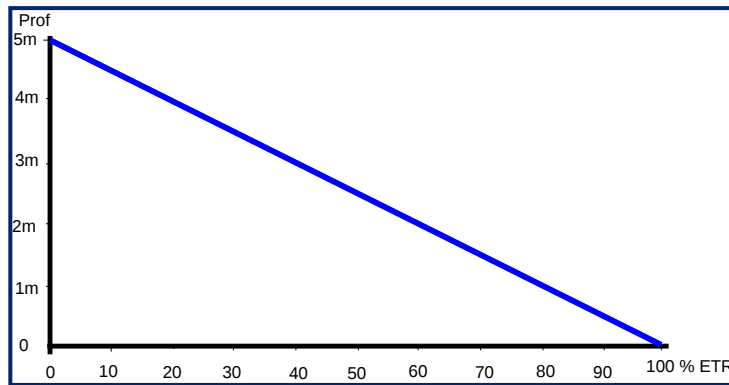
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 26.0 °C y 2,400 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 1,482.1 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

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

$T(^{\circ}C) = 26$
 $P(mm) = 2400$ $P^2 = 5760000$
 $L = 1828.8$ $L^2 = 3344509.44$
 $ETR(mm) = 1482.1$

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 = 155.6 hm³/año.**

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)
3 a 5	4	525	1.4821	5	0.2	155.6
Total		525.0				155.6

7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de la estación hidrométrica Tierra Morada, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, el Río Uxpanapa presentó un caudal estimado de 98.5 m³/s de flujo base, en el estiaje del periodo 1975-2014, que representan un volumen de 3,106.3 hm³ anuales. Por lo tanto, **Dfb = 3,106.3 hm³ 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 $S_y = 0.05$ se determinó la variación del 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

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 171.6hm³, es decir, un promedio anual de **34.3 hm³**.

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

Evolución (m)	Evolución media	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a 1	0.5	121.6	0.05	3.0
0 a 15	7.5	338.4	0.05	126.9
0 a 3	1.5	17.3	0.05	1.3
0 a -1	-0.5	35.5	0.05	-0.9
15	15.0	67.1	0.05	50.3
-2	-2.0	14.2	0.05	-1.4
0 a -2	-1.0	44.5	0.05	-2.2
-5	-5.0	21.4	0.05	-5.4
	TOTAL	660.0	TOTAL	171.6
		Promedio anual		34.3

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:

$$R_v = Sh + B + ETR + Dfb - Eh - Ri \pm \Delta V(S)$$

$$R_v = 18.5 + 56.3 + 155.6 + 3106.3 - 12.3 - 7.4 + 34.3$$

$$R_v = 3351.3 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + Eh + Ri$$

$$R = 3351.3 + 12.3 + 7.4$$

$$R = 3371.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **3371.0 hm³/año**, de los cuales 3,363.6 hm³ son recarga natural y 7.4 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 Costera de Coatzacoalcos, su valor es **3,202.6 hm³ anuales**, de los cuales 18.5hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar y hacia los acuíferos vecinos La Chontalpa y Huimanguillo del estado de Tabasco, 3106.3 hm³ al flujo base del río Uxpanapa y 77.8 hm³ al 50% de la evapotranspiración que debe comprometerse para preservar el ecosistema marino y lagunar. Por lo tanto, **DNC = 3,202.6 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 **107,339,095 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 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 3371.0 - 3202.6 - 107.339095 \\ \text{DMA} &= 61.060905 \text{ hm}^3 \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **61,060,905 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

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. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Costera de Coatzacoalcos, 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, 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 Costera de Coatzacoalcos, estado de Veracruz.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Actualización del estudio geohidrológico de la planicie costera del río Coatzacoalcos, Veracruz. Realizado por Ariel Construcciones, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1984. Estudio geohidrológico de la cuenca del río Huazuntlán-Canticas, fuentes de abastecimiento, Coatzacoalcos, Veracruz. Realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera E15-7 "Minatitlán", escala 1:250,000.

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