

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO TECOLUTLA (3002), ESTADO DE
VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

Contenido

1. GENERALIDADES	2
Antecedentes	2
1.1 Localización	2
2.1 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA	7
3.1. Provincias fisiográficas	7
3.2. Clima	9
3.3. Hidrografía	10
3.4. Geomorfología	11
4. GEOLOGÍA	12
4.1. Estratigrafía	13
4.2. Geología estructural	25
4.3. Geología del subsuelo	28
5. HIDROGEOLOGÍA	29
5.1. Tipo de acuífero	29
5.2. Parámetros hidráulicos	30
5.3. Piezometría	30
5.4. Comportamiento hidráulico	31
5.4.1. Profundidad al nivel estático	31
5.4.2. Elevación del nivel estático	31
5.4.3. Evolución del nivel estático	32
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	33
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA	34
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	34
7.1. Entradas	35
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	36
7.1.3. Recarga incidental (Ri)	37
7.2. Salidas	37
7.2.1. Bombeo (B)	37
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	37
7.2.3. Evapotranspiración (ETR)	38
7.2.4. Descarga a través de manantiales	39
7.2.5. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)	39
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)	40
8. DISPONIBILIDAD	41
8.1. Recarga total media anual (R)	41
8.2. Descarga natural comprendida (DNC)	41
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	42
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	42
9. BIBLIOGRAFÍA	43

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 Tecolutla, definido con la clave 3002 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (SIGMAS), se localiza en la porción centro-norte del estado de Veracruz, en los límites con los estados de Puebla, Tlaxcala e Hidalgo, entre los paralelos 19°29' y 20°44' de latitud norte y los meridianos 96°59' y 98°16' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 7,584 km², que comprende la mayor parte de la zona serrana norte del estado de Puebla.

Limita al norte y noroeste con el acuífero Poza Rica, al este con Martínez de la Torre-Nautla, al sureste con Perote-Zalayeta; pertenecientes al estado de Veracruz, al sur con Libres-Oriental, del estado de Puebla; al suroeste con

parcialmente a los municipios de Cazones de Herrera, Coatzintla, Coyutla, Espinal y Tecolutla.

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 3002 TECOLUTLA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	15	17.5	19	43	0.5	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	98	13	22.5	19	46	42.9	
3	98	11	48.7	19	50	40.1	
4	98	12	47.5	19	53	54.2	
5	98	15	28.5	19	54	55.9	DEL 5 AL 6 POR EL LIMITE ESTATAL
6	98	10	22.1	19	57	58.2	
7	98	9	45.0	19	56	6.7	
8	98	3	14.2	19	57	44.9	
9	97	59	51.3	19	59	4.9	
10	98	3	21.8	20	3	57.4	
11	98	1	34.1	20	5	41.5	
12	98	0	4.0	20	5	41.5	
13	97	48	13.6	20	10	31.3	
14	97	47	31.2	20	14	3.3	
15	97	40	54.4	20	20	9.3	
16	97	31	1.8	20	19	57.5	
17	97	23	56.9	20	29	2.5	
18	97	23	25.1	20	31	37.1	
19	97	24	51.0	20	33	57.3	
20	97	22	41.1	20	38	18.3	
21	97	19	49.8	20	37	32.2	
22	97	11	52.6	20	43	47.7	DEL 22 AL 23 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
23	96	59	13.6	20	27	58.8	
24	97	3	50.5	20	20	22.3	
25	97	6	59.2	20	16	52.1	
26	97	10	44.3	20	14	19.7	
27	97	13	54.1	20	10	34.8	
28	97	16	19.4	20	1	46.1	
29	97	17	8.2	19	56	26.0	
30	97	18	45.2	19	54	27.4	
31	97	19	16.7	19	52	39.6	
32	97	18	18.2	19	51	56.1	DEL 32 AL 33 POR EL LIMITE ESTATAL
33	97	19	53.3	19	42	52.3	
34	97	23	2.4	19	41	15.0	
35	97	25	6.1	19	43	6.5	
36	97	37	51.1	19	40	17.5	
37	97	37	31.1	19	38	13.6	
38	97	41	52.0	19	37	43.8	
39	97	44	40.1	19	36	23.6	
40	97	42	58.0	19	33	26.1	
41	97	47	53.4	19	30	9.6	
42	97	51	31.7	19	29	27.1	DEL 42 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	15	17.5	19	43	0.5	

2.1 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Centro y al Consejo de Cuenca Ríos Tuxpan al Jamapa, instalado el 12 de septiembre de 2000. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; una pequeña área de su extremo sur

está sujeta a las disposiciones del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de la cuenca cerrada denominada Oriental, en los Estados de Puebla y Tlaxcala”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de agosto de 1954. Esta veda es tipo III en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. En otra superficie pequeña de la porción suroccidental rige el *“Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las cuencas de las lagunas de Tochac y Tecocomulco, en los estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala”*, publicado en el DOF el 17 de junio de 1957. Esta veda es tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En la mayor parte de la superficie que cubre el acuífero 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 zona que comprende el acuífero se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, de cobertura regional, otros locales para abastecimiento de agua potable a comunidades. El único que abarcó la superficie de explotación es el estudio denominado:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LOS ACUÍFEROS CUICATLÁN, COATZACOALCOS, EN EL ESTADO DE OAXACA; JALAPA-COATEPEC, TECOLUTLA Y ÁLAMO-TUXPAN, EN EL ESTADO DE VERACRUZ, elaborado por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2010.

El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el análisis de la evolución de los niveles del agua; obtener información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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 TECOLUTLA, 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.

El estudio geohidrológico y la piezometría obtenida por el Organismo de Cuenca son la base para la elaboración del presente documento.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), la porción oriental del área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo de México, en tanto que la porción centro-occidental pertenece a la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental; el extremo occidental y sur se localizan en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico.

Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del INEGI, el área que cubre el acuífero se localiza en Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo Norte, Subprovincia Llanuras y Lomeríos; en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, Subprovincia Karst Huasteco; y en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincias Chiconquiaco y Lagos y Volcanes de Anáhuac

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 Subprovincia Llanuras y Lomeríos se caracteriza por estar formada por sedimentos antiguos arcillosos y arenosos, de edades que decrecen hacia la costa (Mesozoico y Paleógeno-Neógeno). Aunque presenta coronas de rocas basálticas de morfología de mesetas, esta subprovincia se caracteriza por presentar extensas llanuras interrumpidas por lomeríos. Las rocas poco resistentes, como las margas y lutitas, son disectadas rápidamente. La capa de conglomerados ha sido intensamente desmembrada en la superficie, permaneciendo en forma de manchones delimitados por valles fluviales.

La Provincia Sierra Madre Oriental está orientada de manera general en sentido paralelo a la Costa del Golfo de México, desde la frontera norte del país hasta sus límites con el Eje Neovolcánico; es fundamentalmente un conjunto de sierras de estratos plegados constituidos por rocas de origen marino de edad Jurásico y Cretácico, principalmente calizas y en menor proporción areniscas y lutitas. El plegamiento se manifiesta de múltiples maneras, pero su forma más notable es la que produce una topografía de fuertes ondulados paralelos, el ondulado de las rocas en las crestas, las estira y las fractura, haciéndolas más susceptibles a los procesos erosivos. Es por ello que en su estado actual de desarrollo son comunes las estructuras constituidas por dos flancos residuales de un anticlinal con un valle al centro. En general, las altitudes en las cumbres de la Sierra Madre Oriental varían de 2,000 a 3,000 msnm. La cordillera presenta un imponente escarpe sobre la Llanura Costera del Golfo Norte, pero su transición hacia la Mesa Central y la provincia del Eje Neovolcánico es menos abrupta debido, en parte, a la altitud media de las mismas y a relleno de materiales aluviales y volcánicos. Debido a que dominan las rocas calcáreas, se presentan geoformas resultantes de su disolución, que han formado extensos sistemas de cavernas y generado grandes manantiales.

La Subprovincia del Carso Huasteco es una zona de sierras plegadas constituidas predominantemente por rocas calizas, que se caracterizan por presentar un fuerte grado de disección, desarrollo de cañones y manifestaciones de carsticidad.

Eje Neovolcánico abarca parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz, así como todo el estado de Tlaxcala y el Distrito Federal. Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario hasta el presente. La integran grandes sierras volcánicas, extensas coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas. Presenta también la cadena de grandes estrato-volcanes denominada propiamente "Eje Neovolcánico", integrado por los volcanes de Colima, Tancítaro, Zináltécatl (Nevado de Toluca), Popocatépetl, Iztaccíhuatl, Matlacuéyetl (Malinche) y Citlaltépetl (Pico de Orizaba), que casi en línea recta atraviesan el país, más o menos sobre el paralelo 19. Representan el trazo de la gran Falla Clarión. En el estado de Veracruz se extiende casi hasta a la línea de costa en el Golfo de México, cerca de los conos de tezontle llamados Los Atlixcos. El conjunto fisiográfico de serranías presenta dos sistemas de elevaciones; la primera ubicada al oeste, en donde se observan cumbres que alcanzan los 4,250 msnm y la segunda en la porción media cuenta con una ancha cima cónica que alcanza una altura de 2,000 msnm; en la región de Xalapa-

Naolinco quedan unidas para formar un solo macizo montañoso que separa a las unidades geomorfológicas de las llanuras Costera Veracruzana y del Golfo Norte.

La Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac se caracteriza por estar conformada de montañas plegadas con orientación casi norte-sur, construidas a partir de secuencias marinas detríticas y calcáreas, separadas por valles aluviales y llanuras formadas a partir de antiguas cuencas lacustres, donde aparecen elevaciones aisladas, mientras que en la Subprovincia Chiconquiaco las topofomas observadas están asociadas con lomeríos, que pueden ser clasificados en lomeríos suaves, lomeríos suaves con cañadas y lomeríos de colinas redondeas con mesetas.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación hecha por Köppen, adaptada por E. García (1964) para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región, de acuerdo con la elevación topográfica de la zona presenta siete variantes orientadas en sentido este oeste: En las partes topográficamente cercanas a la costa el clima es de tipo $Aw1(x')$ y $Aw2(x')$, cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. La precipitación del mes más seco de 0 a 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual. En la zona central es de tipo $Am(f)$, cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. Precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

Por último, en la zona serrana predominan los siguientes climas: $(A)C(m)(f)$ semicálido húmedo, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más cálido 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. $C(f)$ templado, húmedo, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más cálido menor de 22 °C. La precipitación en el mes más seco mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual. $C(m)$ templado, húmedo, temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más cálido menor de 22 °C. La precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. $Cb'(m)$ semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C; temperatura del mes más cálido

menor de 22 °C. La precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total anual. En menor proporción, en las porciones topográficamente más altas, se registran los climas templados subhúmedos Cw_0 , Cw_1 y Cw_2 .

Para la determinación de las variables climatológicas, se cuenta con información de una numerosa red de estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero, cuyo registro comprende un periodo de 30 años. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1460.8 mm** y **23.6 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,091.4 mm anuales**.

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 pertenece a la Región Hidrológica 27 “Norte de Veracruz” (Tuxpan-Nautla), Subregión Hidrológica Norte de Veracruz, en la cuenca del Río Tecolutla, comprendiendo las subcuencas de los ríos Tecolutla, Joloapan, Apulco, Tecuantepec, Laxaxalpan y del Estero y Laguna de Tumilco. La Región Hidrológica Tuxpan-Nautla se localiza en la porción central de la llanura costera del Golfo de México y ocupa la región norte del Estado de Veracruz. Está integrada por las cuencas de los ríos Nautla, Tecolutla, Cazones y Tuxpan, que desembocan en el Golfo de México y tienen su origen fuera de la entidad.

El acuífero Tecolutla comprende la porción centro-norte de región hidrológica, cuyos principales ríos tienen su origen en los límites entre los estados de Veracruz, Puebla e Hidalgo, hasta su desembocadura en el Golfo de México. La corriente principal del acuífero es el Río Tecolutla que a lo largo de su curso recibe distintos nombres como Arroyo Zapata, Río Coyuca, Río Apulco y finalmente Tecolutla. Tiene su origen en el estado de Puebla, en el parteaguas con la Región Hidrológica 18 a una elevación de 3,500 msnm, 20 km al norte de Huamantla de Juárez, Tlaxcala. Drena la porción noroccidental del Estado de Veracruz, a lo largo de una longitud total de 375 km hasta su desembocadura en el Golfo de México,

una cuenca de aproximadamente 7903 km². Sus afluentes principales en su cuenca alta y media son los ríos Xiucayucan, Tecuantepec, Laxaxalpan, Joloapan y Chichicatzapa. También confluyen a él por margen izquierda los arroyos Huixcolotla y Los Lobos y a partir de esta confluencia recibe el nombre de río Coyuca. Su curso se desarrolla a 2,200 m de altitud en el estado de Puebla donde recibe por la margen izquierda los arroyos Tetzoncuahuixtic y San José y por la derecha los arroyos Texocuixpan y Tlapizaco; en ese sitio el colector cambia su nombre a Río Apulco.

Los principales ríos de la región tienen un patrón de escurrimiento de tipo dendrítico o ramificado y en la planicie tienden a formar meandros. Los escurrimientos son de tipo intermitente y sólo el Río Tecolutla es perenne, que mantiene 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 0 y 3,300 msnm. Las mayores altitudes se localizan al occidente y conforman la Sierra Madre Oriental, en donde se registran las mayores precipitaciones, generando en consecuencia los escurrimientos que fluyen hacia la planicie, dando lugar a corrientes generalmente de régimen torrencial y algunos con grandes caudales de flujo base durante el estiaje, que labran su curso por valles y lomeríos paralelos a las corrientes principales. En la parte alta de la cuenca del río Tecolutla dominan los materiales ígneos extrusivos básicos del Cuaternario (basaltos) e ígneos extrusivos ácidos del Terciario (riolitas y brechas volcánicas riolíticas), ambos presentan fracturas conformando estrechos valles a alturas de 1,000 msnm. Las sierras escarpadas se presentan a elevaciones que varían de 1,000 a 2,000 msnm y están constituidas por las lutitas, areniscas y calizas del Jurásico.

En las porciones medias, de 200 a 1000 msnm, se tienen sierras y mesetas del Karst Huasteco y hacia las porciones menos elevadas de esta región aparecen valles con llanuras y laderas tendidas con mesetas, constituidas principalmente por lutitas, areniscas y lutitas-areniscas del Neógeno Oligoceno y Mioceno. Finalmente, al noreste se extiende la planicie costera formando un litoral cóncavo y sinuoso; en esta región la elevación es menor a 200 msnm y en ella predominan las llanuras y lomeríos de la Llanura Costera del Golfo, caracterizados por extensos depósitos de material aluvial del Cuaternario bien clasificados en las márgenes del río Tecolutla que han sido modelados y conformados por escurrimientos fluviales con meandros. El litoral presenta numerosos esteros, barras y cordones litorales.

4. GEOLOGÍA

El área que cubre el acuífero se encuentra incluida dentro del Terreno Tectonoestratigráfico Maya (Campa U. M. F. *et al.*, 1983), con una cobertura correspondiente a la cuenca mesozoica Sierra Madre Oriental y la cuenca terciaria Tampico-Misantla. El basamento del Terreno Maya está constituido por el Macizo de Teziutlán que consta de esquistos de muscovita, filitas, cuarcitas y metalavas, con edades K/Ar de 269 ± 22 Ma. La datación del esquisto por K/Ar arrojó una edad de 280 Ma, la cual se interpreta como el último evento metamórfico que afectó a estas rocas. Por otra parte, afloran rocas de composición granítica y granodiorítica datadas por el SGM con una edad de 268.14 ± 0.67 Ma.

A nivel regional, la unidad sedimentaria más antigua corresponde a la Formación Huayacocotla de edad Jurásico Inferior, constituida por lutitas apizarradas, filitas y areniscas, estas rocas están cubiertas por las formaciones Cahuwasas y Tenexcate del Jurásico Medio, constituidas por alternancia de limolitas, areniscas y conglomerados polimícticos de matriz arcillo-arenosa que constituyen la Formación Cahuwasas y por los conglomerados en una matriz areno-tobácea de la Formación Tenexcate. Esta última unidad está sobreyacida por un paquete conformado por las formaciones Tepexic, Santiago, Tamán, San Pedro y Pimienta del Jurásico Superior, constituidas por calcarenitas, lutitas calcáreas, calizas arcillosas y calizas con bandas de pedernal (Carta Geológica-Minera E14-3 "Veracruz" Esc. 1:250.000, SGM, 2003).

Durante el Cretácico Inferior se depositaron rocas calcáreas en un ambiente de cuenca, representadas por calizas con pedernal y esporádicos horizontes de lutitas de la Formación Tamaulipas Inferior del Berriasiano-Aptiano, cuyo contacto inferior es transicional y concordante con la Formación Pimienta; el contacto superior es concordante con calizas y lutitas calcáreas de la Formación Tamaulipas Superior del Albiano-Cenomaniano. Durante el Cretácico Superior se depositaron las calizas con nódulos y lentes de pedernal con lutitas calcáreas laminares que constituyen la Formación Agua Nueva del Turoniano y calizas arcillosas, margas y lutitas bentoníticas de la Formación San Felipe del Coniaciano-Santoniano. Cubriendo a la facies de cuenca de la Sierra Madre Oriental afloran margas y lutitas con horizontes de areniscas y bentonitas del Campaniano-Maastrichtiano, que conforman la Formación Méndez.

Afectando a las unidades de la Cuenca Sierra Madre Oriental se emplazaron granitos y dioritas que afloran en la porción norponiente, de edad 163 ± 13 Ma; granodioritas que afloran en la sierra de Chignautla-Tezompan de 134 ± 11 Ma y dioritas que se observan entre San Luis Atexcal y Techachalco cuya edad es de 31 ± 3.7 Ma, así como granodioritas, pórfido-dacítico y tonalítico que se presentan en

Teoloyucan, Tatatila, Tepeyahualco, Cuyoaco y Zautla entre otros, asignándoles una edad de 11 a 14 Ma.

La cuenca Tampico-Misantla del Terciario está representada por sedimentos marinos clásticos, los más antiguos corresponden a una secuencia flysch conformada por lutitas y areniscas calcáreas con margas pertenecientes a la Formación Chicontepec del Paleoceno Superior-Eoceno Inferior, cubierta transicionalmente por lutitas y areniscas de la Formación Aragón del Eoceno Inferior, la que a su vez es cubierta por lutitas y areniscas de la Formación Guayabal del Eoceno Medio, sobreyacida por areniscas conglomeráticas y lutitas de la Formación Chapopote del Eoceno Superior. Por último, lutitas y areniscas conglomeráticas de la Formación Horcones del Oligoceno Inferior, que es cubierta concordantemente por lutitas y areniscas de la Formación Palma Real del Oligoceno Inferior-Medio. Toda esta secuencia se encuentra afectada por un intrusivo cuya composición varía de diorita a tonalita, de edad 9 ± 0.7 Ma.

Cubriendo parcialmente a todas estas unidades se presentan depósitos cuaternarios consistentes de limos y arenas, depósitos aluviales y sedimentos eólicos.

4.1. Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en esta región está constituida por rocas sedimentarias y volcánicas cuya edad varía del Jurásico Inferior al Reciente (figura 2). A continuación, se describen de manera general las distintas unidades litológicas de la más antigua a la más reciente.

Formación Santiago

Conformada por calizas arcillosas dispuestas en capas de espesor variable de 10 a 40 cm, que se presentan alternadas con lutitas calcáreas. Presentan clivaje y pliegues sin-sedimentarios, así como frecuentes amonitas, radiolarios y bioclastos.

Formación Tamán

Definida por Heim en 1926 y después Erben la describe en su localidad tipo que es el poblado Tamán, ubicado en las cercanías de Tamazunchale, SLP. Está constituida por una secuencia de calizas bien estratificadas, de color negro, de grano fino y microcristalinas, con intercalaciones de lutitas negras. Incluyen una alternancia de lutitas calcáreas de color negro, carbonosas, con calizas arcillosas de color gris oscuro, dispuestas en estratos de 40 a 50 cm de espesor; las lutitas se presentan en estratos de 10 a 15 cm de espesor que intemperizan en tonos rojizos.

Se considera una unidad de gran espesor, alrededor de 700 m, en las paleo-depresiones; sin embargo, sus espesores disminuyen notablemente hacia las partes altas del paleo-relieve, incluso hasta desaparecer. Subyace en forma concordante y transicional a la Formación Pimienta, se ha identificado su presencia en superficie y en el subsuelo a través de los pozos petroleros; en algunas localidades sobreyace a la Formación Santiago, pero en otras cubre al basamento del Triásico. Algunos autores agrupan a las formaciones Tamán, Santiago y Pimienta en una sola unidad porque no aprecian límites contrastantes entre ellas. Presentan estratos de biomicrita, con organismos pelágicos, como radiolarios, equidoermos y Rhaxella. Su macrofauna permite establecer su edad, que corresponde al Oxfordiano-Kimmeridgiano. Su depósito ocurrió en las márgenes de una plataforma. Se correlaciona con la Formación San Andrés al sur de la Cuenca de Chicontepec.

Formación Pimienta

Definida por Heim en 1926 en la localidad tipo que se encuentra en el Rancho Pimienta, ubicado en el Valle del Río Moctezuma, en el km 337 de la carretera México-Laredo, en donde está compuesta por una secuencia de calizas de color gris oscuro dispuestas en estratos delgados con bandas de pedernal. Contiene también calizas mudstone-wackestone y calizas arcillosas de color negro a gris oscuro, intercaladas con capas delgadas de lutitas calcáreas y lutitas laminares negras, con abundante materia orgánica y algunos lentes de pedernal negro. Los estratos de carbonatos se distinguen por contener abundantes foraminíferos y un horizonte de aproximadamente 50 cm de espesor de coquinas con abundantes amonitas dentro de las calizas arcillosas de color negro.

De acuerdo con su contenido faunístico, que incluye especies como Calpionella Alpina, restos de equinodermos y tintínidos, se determinó que su edad corresponde al periodo Kimmeridgiano-Tithoniano, marcando en su parte superior el límite Jurásico-Cretácico. Se infiere que se depositó en condiciones de plataforma con comunicación al mar abierto, con importante aporte de terrígenos finos, con cambio litológico hacia la cima que se explica por una variación en las condiciones batimétricas que corresponden a mares someros de baja energía.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Tamaulipas

Nombre definido por Stephenson, J. en 1921 y generalizado por J.M. Muir en 1936. Está representada por calizas que afloran en la Sierra de Tamaulipas. Posiblemente el Cañón de La Borrega, ubicado al oriente de la Estación de ferrocarril de Zaragoza sea uno de los lugares más accesibles para estudiarla, por ello se considera su localidad tipo.

Formación Tamaulipas Inferior

Fue descrita como calizas de estratificación mediana a gruesa, de color gris claro y gris oscuro, con nódulos esferoidales de pedernal y dolomitización en su porción basal. Aflora en los cañones que cortan las Sierra de Tamaulipas, San Carlos y la Sierra Madre Oriental, donde está constituida por calizas de textura microcristalina y dolomitas de color gris a gris oscuro, que presentan líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación, dispuestas en estratos que varían de unos cm a 2 m de espesor, con pequeños mantos de óxido de fierro interestratificados y lajamiento perpendicular al rumbo de la estratificación. Su espesor alcanza hasta 400 m.

Su contacto superior está bien limitado por el Horizonte Otates de edad aptiana. En la región de Poza Rica gradúa lateralmente a la Formación El Abra, de la cual proviene el nombre Tamabra, que corresponde a rocas del Albiano-Cenomaniano y posiblemente parte del Aptiano. Las rocas de la Formación Tamaulipas Inferior son de las más persistentes en la porción central y este de México y formaron posiblemente parte de la gran Cuenca o Geosinclinal Mexicano Mesozoico. Su edad corresponde al Neocomiano.

Formación Otates

Es un intervalo arcillo-calcáreo que separa estratigráficamente a las calizas de las formaciones geológicas Tamaulipas Inferior y Superior. Está constituida por calizas arcillosas de estructura laminar, ligeramente carbonosas de color gris oscuro, cuyo espesor varía de 6 a 13 m. Su localidad tipo se ubica en el Cañón de Otates situado a 7 km, de Agua Nueva, en el Cañón de La Borrega, Tamaulipas. Sus

estratos tienen espesor variable, desde unos cuantos cm hasta 0.50 m, intercalados en lutitas laminares del mismo color. En ocasiones contiene pedernal negro. En casi todas las localidades es de carácter muy bituminoso. Se correlaciona con la Formación La Peña del noreste de México.

Formación Tamaulipas Superior

Es una sección de estratos de espesor medio de calizas criptocristalinas de color crema claro, con líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación y lentes de pedernal gris. En su secuencia es posible distinguir dos miembros: el inferior está representado por calizas de textura fina, de color crema, dispuestas en capas de espesor medio, ocasionalmente con lentes de pedernal; el miembro superior se compone de calizas de color amarillento en capas de espesor delgado con nódulos de pedernal de color gris. Sus exposiciones se presentan en los cañones que cortan la Sierra de Tamaulipas y la Sierra Madre Oriental.

Su origen es batial (o de cuenca), de acuerdo con su contenido de amonitas; aflora desde la Sierra de San Carlos, Sierra de Tamaulipas, gran parte de la Sierra Madre Oriental y el subsuelo de los campos petroleros Ébano, Pánuco y al SW de Tampico, donde gradúa lateralmente a la facies arrecifal de la Formación El Abra. También se encuentra en la región de Poza Rica, al norte y al oeste, donde es isócrona con las turbiditas productoras de los campos de Poza Rica que constituyen la Formación Tamabra. De acuerdo con su contenido fósil, su edad corresponde al Albiano–Cenomaniano, yace debajo de las calizas de la Formación Agua Nueva y sobre las rocas del horizonte Otates. Su espesor es inferior a 400 m y junto con las rocas de la misma edad forman la gran cuenca o Geosinclinal Mexicano.

Formación Tamabra

Definida por Muir en 1936 y descrita más ampliamente por Heim en 1940 y Flores en 1950. Aflora al este de la Sierra Madre Oriental, al oriente de los bordes arrecifales de la Plataforma San Luis Valles y del Atolón de la Faja de Oro, en el subsuelo de la Cuenca de Chicontepec, en el área de Poza Rica y en Misantla, Veracruz. Es un conjunto litológico constituido por brechas de carbonatos, es decir, son rocas clásticas de talud (dolomitizadas o parcialmente dolomitizadas); incluye rocas derivadas del borde de plataforma, por lo que contiene clastos de ambiente arrecifal, moluscos y rudistas.

La unidad consiste de brechas intraformacionales con fragmentos de packstone y grainstone, mudstone de foraminíferos y dolomías microcristalinas. Su espesor es muy variable, desde 200 m en el Campo Poza Rica, hasta 1500 m en otras localidades. Su edad Albiano-Cenomaniano se confirma con base en su posición

estratigráfica y su contenido fósil de especies planctónicas y bentoníticas como *Stomiosphaera conoidea*, *Microcalamoidesdiversus* y *Nannoconus minutus*. Su ambiente de depósito es de talud, representando las facies internas entre depósitos de arrecife y mar abierto.

Formación El Abra

Definida originalmente por Heim en 1926, en la localidad tipo ubicada en la Sierra El Abra, está formada por dos miembros. El Inferior constituido por una caliza de rudistas, a la que denominó Taninul y el superior por calizas con abundantes miliólidos. El miembro Taninul consiste de un bioherma de rudistas de edad Cenomaniano, con abundancia extraordinaria de radiolítidos, nerineas y algunos corales. Los estratos están casi horizontales y pueden observarse expuestos como 40 m de una caliza masiva, criptocristalina de color gris a gris crema con manchas negras de restos de hidrocarburos. El miembro superior está formado casi exclusivamente por una caliza gris masiva con abundantes miliólidos (*Nummoloculina heimi*, Bonet), con intercalaciones de calizas biostronales con *Toucasias*.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Agua Nueva

Nombre introducido por Stephenson (1921) y después por Muir, J. M. (1936) para referirse a los sedimentos que descansan directamente sobre la Formación Tamaulipas Superior. Se distinguen dos unidades; la inferior consiste de capas de estratificación gruesa a media (hasta 0.70 m), que contienen laminaciones de lutita negra quebradiza. La parte media de la sección es más arcillosa, dispuesta en delgadas capas de carácter laminar, que contienen impresiones de *Inoceramus Labiatus*. La unidad superior muestra graduación a rocas de la Formación San Felipe y consiste de calizas de estratificación media y delgada. El espesor de la sección tipo es de 127 m, se correlaciona con la Formación Indidura del NE de México.

Formación San Felipe

Esta formación fue descrita inicialmente por Jeffreys en 1910, en su localidad tipo de la Ranchería San Felipe y San Luis Potosí, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, donde consiste de calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentoníticas de color verde y gris claro. Son típicos los intervalos de calizas moteadas ovaladas de color oscuro que se cree son debidos a la presencia de algas. Está constituida por una secuencia rítmica de calizas arcillosas de color gris claro y lutitas calcáreas color café que presentan intercalaciones de calizas arcillosas, margas de color gris y verde, así como bentonita, que hacia su cima desaparece la presencia de estratos calcáreos.

Subyace a la Formación Méndez cuyo contacto es transicional y sobreyace a la Formación Agua Nueva en forma concordante. Sus afloramientos presentan una gran área de exposición sobre el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental, en forma de una serie de pequeños anticlinales y sinclinales, así como en el flanco poniente de la sierra de Tamaulipas. En el subsuelo de la planicie costera del Golfo de México cambia de facies con las formaciones Tamasopo, Soyatal e Indidura.

Su espesor promedio es de 130 m y se correlaciona con las formaciones Parras en el estado de Coahuila, Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, Indidura de la cuenca del Centro de México, Guzmantla de la Plataforma de Córdoba y Cuautla de la Cuenca Guerrero-Morelos.

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 serie de lutitas calcáreas de colores gris azulado y café, con fractura nodular y concoidal, que sobreyace a la Formación San Felipe, 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 en la región 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.

Sobreyace en forma discordante a la Formación Tamaulipas y concordante a la Formación San Felipe, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y depósitos aluviales; subyace concordantemente a la unidad arcillosa del Paleoceno. Sus afloramientos se distribuyen ampliamente en toda la superficie del acuífero. Está intrusiónada por algunos diques, cuyo fracturamiento resultante le confiere permeabilidad secundaria.

TERCIARIO (NEÓGENO)

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 micropalantología. Se presenta desde el sureste de San Luis Potosí hasta Tezihutlán, Puebla, paralelamente a la margen oriental de la Sierra Madre Oriental, aunque su mayor desarrollo se tiene en la Cuenca de Chicontepec; también se ha reportado en el subsuelo de la Cuenca de Veracruz. Su localidad tipo se ubica a 2.5 km al este de Chicontepec, Veracruz, donde está integrado por una alternancia de areniscas arcillosas con limolitas y lutitas de color gris verdoso con estratificación rítmica e intercalaciones delgadas de margas arenosas de color gris oscuro (Nava y Alegría 2001).

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

Formación Aragón

Fue definida por Nuttall en 1939, consiste de lutitas de color gris claro, gris oscuro y verdoso, que se caracterizan por presentar estratificación bien definida por laminación causada por intercalaciones de bentonita, solo en su porción inferior se encuentran algunos horizontes de areniscas y a veces algunos nódulos calcáreos pequeños. Su espesor varía de 80 a 325 m, aunque en ocasiones no se ha definido completamente debido a que su litología es similar a la de la Formación Chicontepec. Sus afloramientos tienen una morfología de lomeríos suaves, de estructura masiva con algunos horizontes de bentonita en la base.

Su contacto superior es concordante con la Formación Guayabal, mientras que el contacto inferior es a través de un cambio de facies con la Formación

Chicontepec, que se determina casi siempre por su contenido microfaunístico. Sus sedimentos se depositaron en un ambiente de aguas poco profundas en una plataforma clástica que recibía aporte de terrígenos de los elementos inestables procedentes del occidente, de la Sierra Madre Oriental. De acuerdo con su abundante contenido fósil de foraminíferos del género *globigerina*, se ha determinado que su edad es Eoceno Inferior. Sobreyace discordantemente a la unidad arcillosa del Paleoceno y subyace en igual forma a las unidades arcillo-arenosas del Eoceno y del Oligoceno.

Formación Guayabal

Definida por Adkins en 1925 y descrita ampliamente por Cole en 1927. Su localidad tipo se encuentra en Guayabal, municipio de Tanatoco, Ver., aproximadamente a 12 km al oeste de Potrero del Llano, en el camino a Tlacolula, Veracruz. Está constituida por lutitas de colores gris, azul y café que por acción del intemperismo adquieren un color gris o crema, que contienen nódulos de siderita característicos y delgadas intercalaciones de arenas de grano fino. En la localidad tipo la formación es rica en restos de moluscos, briozoarios y corales, con abundancia de foraminíferos, conjunto que indica que se trata de depósitos en aguas someras. Al sur del Río Tecolutla la Formación Guayabal está constituida por sedimentos de facies marginales, con conglomerados lenticulares y arcillas arenosas con orbitoides, moluscos y briozoarios. Su espesor en superficie varía de 100 a un poco más de 1,000 m, el máximo desarrollo se localiza en el área de Tajín y Chote, Veracruz, donde alcanza 1,190 m de potencia.

En la cuenca de Chicontepec, sus contactos superior e inferior son concordantes con la Formación Aragón y Chapopote, respectivamente, también subyace en discordancia con la Formación Palma Real. Su edad es del Eoceno Medio, determinada por la presencia de especies planctónicas y bentónicas, además de abundantes briozoarios y corales. Se correlaciona con la Formación Mount Sellman y sus variaciones laterales, así como con la Formación Cook Mountain de la Cuenca de Burgos. Sus condiciones de depósito fueron en mares tranquilos, relativamente someros de plataforma clástica, con cambio laterales de facies.

Formación Chapopote-Tantoyuca

Fue definida por Cole en 1927 en la localidad tipo que se localiza en la margen norte del Río Tuxpan, cerca del poblado Chapopote, Tamaulipas, en el cruce de la carretera Álamo-Potrero del Llano, Veracruz. Se caracteriza por presentar estratificación irregular y se compone de margas con intercalaciones en la cima de capas delgadas de bentonita de color amarillo verdoso, en otros sitios donde aflora contiene intercalaciones de arenisca de cuarzo de grano fino, con cementante calcáreo. En la base se compone de lutitas calcáreas de color verde

que intemperizan a amarillo, plásticas y arenosas, contiene también algunas capas delgadas de areniscas de grano fino con horizontes de lutitas, así como areniscas conglomeráticas con intercalaciones de lutitas de color gris y capas de bentonita. Su espesor varía de 80 a 800 m y sus contactos inferior y superior son concordantes con la Formación Guayabal y con las formaciones Horcones y Palma Real, respectivamente.

Su edad corresponde al Eoceno Superior de acuerdo con los foraminíferos fósiles que contiene. Su ambiente de depósito es de plataforma marina clástica, en un mar con aporte de terrígenos de granulometría fina, en un medio marino somero de aguas tranquilas cerca de la costa. Se correlaciona con la Formación Tantoyuca del área de Poza Rica.

Formación Palma Real

Definida por Nuttall en 1928 y dividida por Villatoro (1932) en dos miembros: inferior y superior. El miembro inferior consiste de areniscas con diferentes texturas, margas arenosas de color gris azul con abundantes microforaminíferos, lentes y bloques de calizas coralinas. Su espesor es muy variable en el subsuelo, de 42 m hasta 1,550 m, aunque en muchos pozos varía entre 146 y 270 m y en otros entre 725 y 991 m. Por su contenido fósil faunístico se le asigna una edad del Oligoceno Inferior y Medio. Yace discordantemente sobre los depósitos pelíticos y arcillo-arenosos del Eoceno.

El miembro superior se distingue del miembro inferior por la ausencia de ciertas especies de microfósiles y está compuesto, en términos generales, por lutitas de color gris con tonos azulado y verdoso, a veces arenosas de grano fino, dispuestas en estratos de 1 a 30 cm de espesor; fracturadas que intemperizan en colores crema y café amarillento. Las lutitas presentan intercalaciones de areniscas grises de grano fino a medio en capas de 1 a 10 cm de espesor, particularmente en la parte superior. Su espesor es muy variable, de 80 hasta 870 m, reportados por diversos autores. Su edad, de acuerdo con su contenido fosilífero, es del Oligoceno Medio al Oligoceno Superior – Mioceno Inferior, correlacionable con las formaciones Alazán y Mesón.

Formación Alazán

Nombrada por Dumble en 1922 en su localidad tipo ubicada en el Río Buenavista, en el cruce del antiguo camino entre las haciendas Alazán y Mozula, Veracruz. Se encuentra distribuida a lo largo de una franja de 280 km, desde el río Cazonas hasta las cercanías de Aldama, Tamaulipas. Consiste de una serie de margas y lutitas de color gris a gris oscuro que intemperizan a color gris rojizo, con intercalaciones de capas delgadas de areniscas; su espesor es variable, de 60

hasta 930 m. Sobreyace concordantemente y transicional a la Formación Horcones o Palma Real. De acuerdo con Mayol (2006), sobreyace a las formaciones Tantoyuca y/o Chapopote y subyace a las formaciones Horcones y/o Palma Real, propone como unidad equivalente a la Formación Palma Real. Por su contenido fósil se le asigna una edad perteneciente al Oligoceno Inferior. De igual manera, por su litología y su contenido faunístico se interpreta que se depositó en una plataforma clástica.

Formación Mesón

Está constituida por lutitas arenosas, areniscas de grano fino, margas y algunos horizontes de limolitas arcillosas, dispuestas en estratos que varían de delgados a medianos, de color gris con tonos azules que intemperizan en tonos de amarillo. En algunas localidades presenta un desarrollo arenoso de grano fino con abundante fauna de phylumechinodermata, coelenterata y mollusca, además de abundantes foraminíferos. Presenta una unidad calcárea formada por coquinas, calizas coralinas y algunas areniscas calcáreas, en forma de lentes dentro de la unidad clástica. De acuerdo con información de cortes litológicos de PEMEX, su espesor en el subsuelo es muy variable, de 130 hasta 990 m, aunque predominan los espesores cercanos a 200 m.

La edad que se le asigna de acuerdo con su contenido faunístico corresponde a la parte superior del Oligoceno Medio y el Oligoceno Superior–Mioceno Inferior. Yace discordantemente sobre las Formaciones Aragón y Palma Real, atestiguando una trasgresión, y subyace discordantemente a sedimentos del Mioceno Inferior. Esta unidad arcillo-arenosa se presenta suavemente inclinada hacia el este y aflora en la zona costera.

Formación Escolín

Consiste en areniscas calcáreas de grano fino a medio que alternan con margas y calizas arenosas, dispuestas en estratos cuyo espesor varía de 0.04 a 0.7 m, sin contenido fósil, que en algunos sectores presentan lutitas arenosas y conglomerados. Su edad es del Mioceno-Temprano al Mioceno Medio y su espesor varía entre 90 y 300 m (SGM, 2011).

Formación Tuxpan

Fue definida por Dumble, en 1911 y está constituida por capas de lutitas arenosas, areniscas, areniscas calcáreas y calizas arenosas; localmente se aprecian algunos conglomerados, particularmente hacia su base, aunque en casos como el del campo petrolero Ezequiel Ordóñez, la base está definida por un horizonte de tobas de color verde. Los sedimentos de esta formación fueron depositados durante una transgresión de aguas someras, seguida por una regresión, hasta

alcanzar la posición actual del Golfo de México. Por su contenido fósil, se le asigna una edad del Mioceno Inferior. Se presenta expuesta al sur de la Laguna de Tamiahua y el Río Tecolutla, cubierta en parte por sedimentos costeros y aluviales más recientes.

Presenta un echado regional hacia el oriente y descansa en discordancia sobre las formaciones oligocénicas Escolín, Coatzintla, Mesón, Alazán y Palma Real en toda la llanura costera del Golfo de México. Su espesor en superficie varía de 50 a 200 m y en su localidad tipo alcanza 150 m de potencia. En el subsuelo su espesor varía de 120 m, en el campo Ezequiel Ordoñez, a 820 m en Tecolutla, es decir, se incrementa noreste a sureste. En los pozos marinos de la Faja de Oro tiene más de 1,500 m de espesor.

Basalto

Unidad constituida por derrames de basaltos de olivino que presentan estructura vesicular y en menor proporción amigdaloides, con relleno de calcita que localmente se conocen con el nombre de Formación Tlanchinol, de edad Plioceno. Se presentan como derrames lávicos de forma tabular, inalterados hasta muy intemperizados y se asocian a la actividad volcánica que tuvo lugar al finalizar la Orogenia Laramide, por lo que se les asigna una edad Paleógeno-Neógeno. Sus áreas de exposición se localizan dispersas en la región central y suroccidental del acuífero.

Rocas ígneas intrusivas

Están representadas por rocas de composición granodiorítica-diorítica y en ocasiones por gabros que presentan textura holocristalina y color oscuro, emplazadas en forma de troncos en las rocas arcillosas del Eoceno. Su expresión morfológica es de prominencias que modifican los lomeríos.

Rocas ígneas extrusivas (Terciario-Cuaternario)

Se encuentran distribuidas principal y ampliamente al sur de Papantla sobre la margen derecha del río Tecolutla. Consisten en derrames de basalto y también en tobas riolíticas y dacitas.

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. Los aluviones se presentan masivos al pie de las sierras, en estratos mal definidos y en lentes en las terrazas fluviales. Las gravas y arenas rellenan los valles fluviales y los materiales más finos forman planicies aluviales, principalmente en las zonas de influencia de los ríos.

Depósitos Lacustres

Esta unidad representa a los depósitos arcillosos y arenosos 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 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.

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 están formadas por 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

Los lineamientos con orientación NW-SE son los más importantes, tienen una longitud aproximada de 800 km, desde Tamaulipas hasta Veracruz, a lo largo de los cuales se manifiestan varios cuerpos de rocas intrusivas y extrusivas de composición alcalina a calcoalcalina. Estos lineamientos limitan a la Sierra Madre Oriental con la Cuenca Tampico-Misantla y a algunas fosas internas rellenas por material reciente.

Otros lineamientos con rumbo NE-SW, se encuentran representados en los arroyos y ríos en el extremo suroeste de la región, hacia el extremo noroeste y la Planicie Costera del Golfo, perdiéndose bajo la cubierta sedimentaria reciente, se asocia a estos lineamientos un vulcanismo fisural representado por derrames de basalto. El rasgo más sobresaliente está representado por el Río Cazones. Entre Poza Rica y Álamo se observa una estructura semicircular, abierta en el extremo

oriental delimitada por fallas que controlan la traza de los ríos Tuxpan, Pantepec y Cazones. Es posible que esta estructura se asocie a la erosión diferencial de las rocas arcillo-calcáreas del Paleógeno-Neógeno. Hacia el oriente se presentan pliegues suaves en las rocas sedimentarias del Paleógeno-Neógeno, que se orientan preferencialmente al noroeste y en menor proporción al noreste. Se conforman anticlinales y sinclinales con flancos de pendientes muy suaves, tendiendo a desaparecer al oriente. En la zona poniente se tiene la presencia del frente de la Sierra Madre Oriental, donde se manifiesta con mayor intensidad la deformación, evidenciando anticlinales y sinclinales normales asimétricos y fallas normales con componente de movimiento lateral, orientadas en su mayoría al noroeste y en menor proporción al noreste (Carta Geológico-Minera Poza Rica F14-12. Escala 1:250,000. SGM, 2004).

La cuenca sedimentaria Tampico-Misantla está compuesta principalmente por tres unidades estructurales primarias: La porción sur de la Plataforma de Tamaulipas, La Antefosa de Chicontepec y la Sierra Madre Oriental. Destaca en la primera la Sierra de Tamaulipas, cuyo extremo sur está cubierto por sedimentos del Cretácico Superior y del Eoceno, dando origen a la estructura Pánuco-Ébano. Existe en ella un sistema de fallas con orientaciones NNE-SSW sin conexión con los esfuerzos tectónicos que levantaron la Sierra Madre Oriental. Al sur existe un bloque de la Faja de Oro, de forma semicircular, entre la Laguna de Tamiagua y la Barra de Tecolutla, que representa una estructura arrecifal con su porción más alta en el centro que buza hacia los extremos. La Orogenia Laramide levantó y plegó durante el Eoceno los sedimentos del Geosinclinal Mexicano, dando origen a la estructura de la Sierra Madre Oriental y formando también varias antefosas a lo largo de la margen oriental de la sierra, donde se acumularon grandes espesores de sedimentos de facies "flysch" durante el Eoceno. La zona que comprende la mayor parte del acuífero corresponde a la Planicie Costera del Golfo, que se caracteriza por estar constituida por depósitos aluviales y presentar algunos pliegues suaves, asimétricos y simétricos con rumbo general NW-SE.

Estructuralmente, la región se caracteriza por presentar pliegues anticlinales y sinclinales en las rocas cretácicas, donde los ejes de las estructuras presentan una orientación norte-sur; se observan estructuras simétricas, asimétricas, buzantes y recumbentes hacia el este, aunque en la zona sólo se observa una gran estructura anticlinal simétrica. Las rocas terciarias forman un monoclinial con echado muy suave hacia el este cubierto parcialmente por rocas basálticas. Esta secuencia se encuentra afectada por varios troncos de composición básica.

Durante el Jurásico Inferior se produce una subsidencia, que genera cuencas en las que se depositó la Formación Huayacocotla. A fines del Jurásico Inferior se

generan movimientos distensivos provocando la retirada de los mares, restituyendo las condiciones continentales; bajo estas condiciones durante el Jurásico Medio se depositan los lechos rojos de la Formación Cahuascal-Tenexcate. Al finalizar el Jurásico Medio y hasta fines del Cretácico ocurre una transgresión, que coincide con la apertura del Golfo de México, el fondo irregular de las cuencas fue nivelándose con el depósito de las formaciones Tepexic, Santiago, Tamán, San Pedro y Pimienta.

Durante todo el Cretácico se desarrollan simultáneamente la cuenca Sierra Madre Oriental con sedimentación de cuenca y con una plataforma adyacente correspondiente a la cuenca de Zongolica, condiciones que permanecieron hasta el Santoniano; durante el Campaniano-Maastrichtiano las condiciones de cuenca fueron homogéneas en los dos paleoelementos depositándose una secuencia de margas y lutitas, correspondiente a la Formación Méndez, que cubre a las secuencias de ambas cuencas. La compresión ocasionada por la Orogenia Laramide actúa en sentido SW-NE, levantando, fallando y deformando la secuencia mesozoica, generando condiciones para el desarrollo de las cuencas terrígenas terciarias Tampico-Misantla y Veracruz.

Los fenómenos tectónicos que motivaron el levantamiento de la Llanura Costera a fines del Cretácico continuaron durante principios del Cenozoico, descubriendo los sedimentos marinos de esta época, para dejarlos expuestos a los procesos de intemperismo y erosión, que modelaron la morfología actual en forma de una superficie ondulada con pendiente suave, que asciende hacia el occidente, pero con accidentes topográficos en forma de escarpes en aquellas formaciones más resistentes a la erosión.

La formación de los valles en la región se explica por medio de una serie de procesos tectónicos correspondientes a la formación de la Sierra Madre Oriental, seguida de una etapa de intenso intemperismo y erosión, que produjo una peniplanicie al nivel de la base de los derrames basálticos que se observan. Posteriormente le siguió una actividad volcánica que dio lugar a los depósitos de derrames basálticos, cuyos vestigios se observan en las mesetas y en los cuellos volcánicos que se han identificado. Después siguieron posiblemente dos épocas de rejuvenecimiento durante las cuales se depositaron los sedimentos que rellenaron las cuencas y la planicie costera.

De todo lo anterior, se puede establecer que existieron dos fases tectónicas de deformación; la primera, de compresión, se inició durante el Cretácico Tardío y culminó en el Terciario Temprano, que originó el plegamiento y dislocación por fallas inversas de las rocas sedimentarias cretácicas y de la generación de la

cuenca Tampico–Misantla. La segunda fase tectónica de deformación fue de carácter distensivo y está evidenciada por las fallas normales del área y por el vulcanismo básico.

4.3. Geología del subsuelo

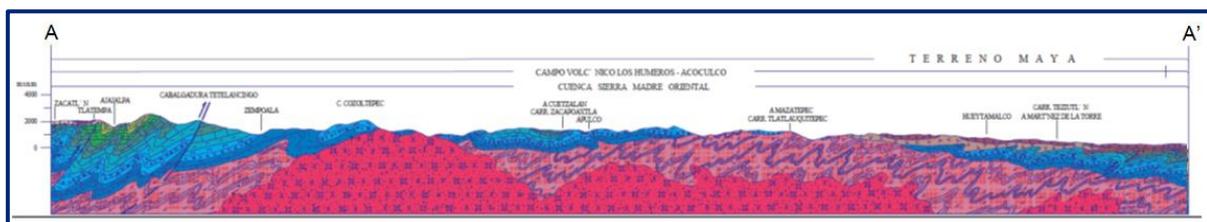
Con base en las observaciones litológicas, se evidencia que la sedimentación de la cuenca se efectuó en dos episodios que resultaron en la acumulación de una facies flysch, seguida por una facies molasa. Los sedimentos de tipo flysch se acumularon al oeste de la cuenca, como consecuencia de las primeras pulsaciones de la Orogenia Laramide que, posteriormente dio lugar a la Sierra Madre Oriental. Durante este episodio se depositaron la Formación Velasco y la Formación Chicontepec. Contrastando con los sedimentos anteriores, se presentan en sucesión vertical los sedimentos conglomeráticos y arcillo-arenosos de las formaciones más jóvenes, que muestran una granulometría más fina hacia la cima y son el resultado del acarreo post-orogénico de terrígenos. Su distribución espacial es sensiblemente paralela a la facies de depósito de tipo flysch, que constituyen una facies molasa en la cuenca. 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 fluviales que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Necaxa o Tecolutla, Cedro Viejo y otros arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, litorales, areniscas y conglomerados que conforman la planicie costera. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la Orogenia Laramide.

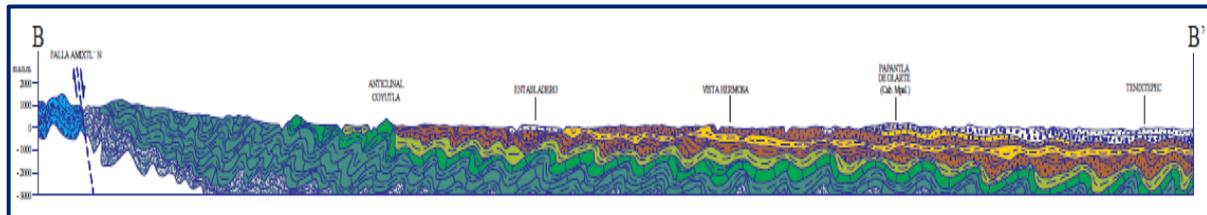
La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan intercalaciones de calizas, lutitas y en menor proporción areniscas, así como tobas y brechas volcánicas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas. Este es un acuífero que aún no sido explorado.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias marinas y volcánicas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de lutitas, limolitas y areniscas que conforman las formaciones del Jurásico.

La figura 3 muestra dos secciones geológicas que atraviesan el acuífero de forma longitudinal en una dirección NE, el acuífero se encuentra alojado en los materiales granulares que se ubican a lo largo de las planicies de inundación del cauce principal del Río Tecolutla y de la planicie costera.



Fuente: Carta Geológica-Minera E14-3 "Veracruz" Esc. 1:250.000 (SGM, 2003).



Fuente: Carta Geológica-Minera F14-12 "Poza Rica" Esc. 1:250.000 (SGM, 2003)

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 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 del Río Tecolutla y otros arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, litorales y conglomerados que conforman la planicie costera.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan intercalaciones de calizas, areniscas, basaltos, tobas y brechas volcánicas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de **confinamiento o semiconfinamiento**, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2010, se realizaron 10 pruebas de bombeo de larga duración en los depósitos granulares. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se determina que los sedimentos que constituyen el acuífero presentan permeabilidad media. Los valores de transmisividad varían de **3.3×10^{-3} a $16.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (285 a 1382 m^2/d)**, con un valor promedio de **$9.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (838 m^2/d)**. Los valores de conductividad hidráulica varían de **2.7×10^{-6} a $1.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.2 a 15.5 m/d)**, considerando un espesor saturado promedio de 30 a 40 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.

En los aprovechamientos emplazados en las lutitas de las formaciones Méndez, San Felipe y Agua Nueva, las pruebas de bombeo realizadas en acuíferos vecinos al norte, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, se obtuvieron valores de transmisividad que varían de **2.7×10^{-4} a $8.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (23.3 a 7.6 m^2/d)**, con un valor promedio de **$4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (38.9 m^2/d)**. En las rocas sedimentarias el sistema de fracturamiento y fallamiento incrementa la permeabilidad, que puede ser hasta de dos órdenes mayores de magnitud, dependiendo de su frecuencia, abertura y relleno.

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

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 de los estudios realizados en 2010 además de registros históricos durante el periodo 2010-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2014-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 2 a 15 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la planicie costera y del cauce del Río Tecolutla hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, menores de 5 m, se registran en la ribera del Río Tecolutla y en la zona costera, en tanto que las mayores profundidades, de 10 a 15 m, se presentan en las inmediaciones de los poblados Agua Dulce y Espinal (figura 4).

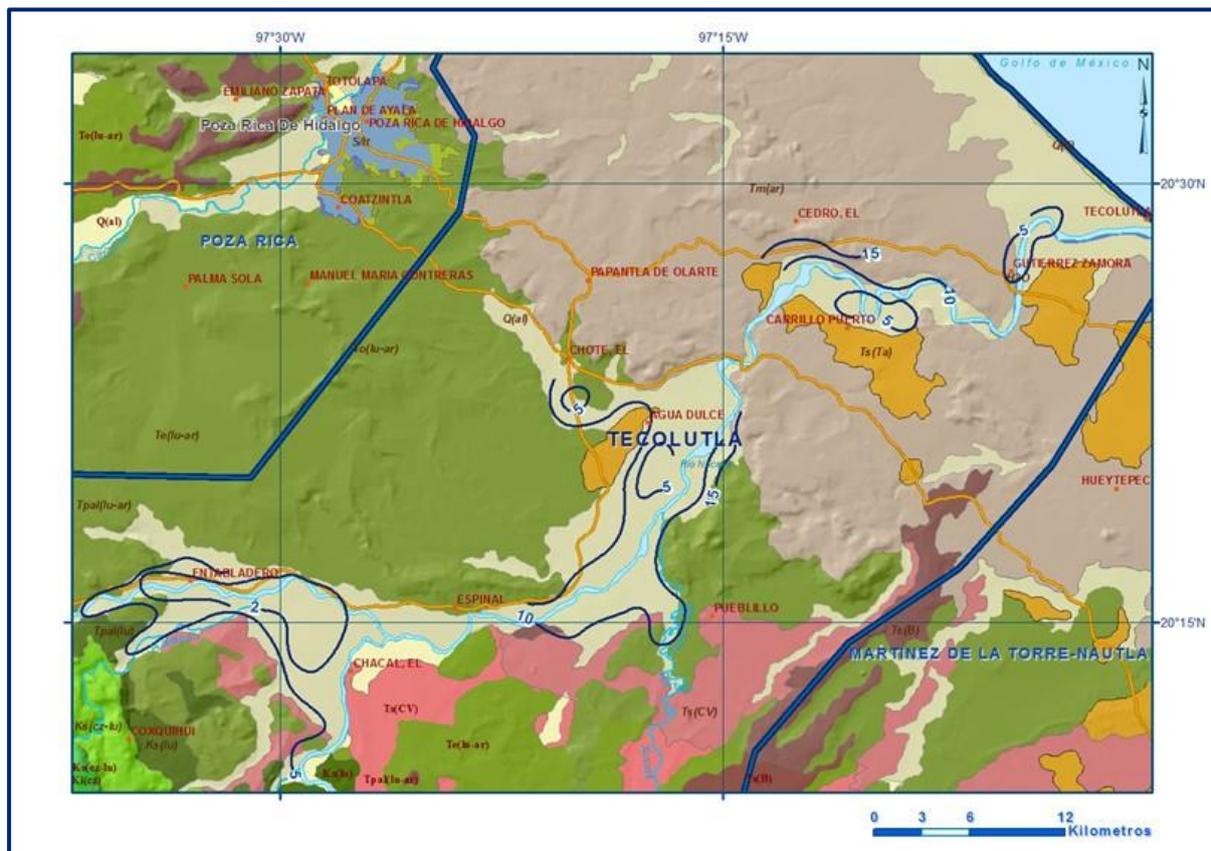


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019).

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 1 a 105 msnm, que se incrementan de la zona costera del valle hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero y aguas arriba a lo largo del cauce del Río Tecolutla. Los valores más altos, 60 a 105 msnm, se registran en la porción occidental del valle, en la zona ubicada al oeste del poblado El Chacal, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la costa. Los valores más bajos, de 1 a 2 msnm, se presentan en la planicie costera. La dirección preferencial

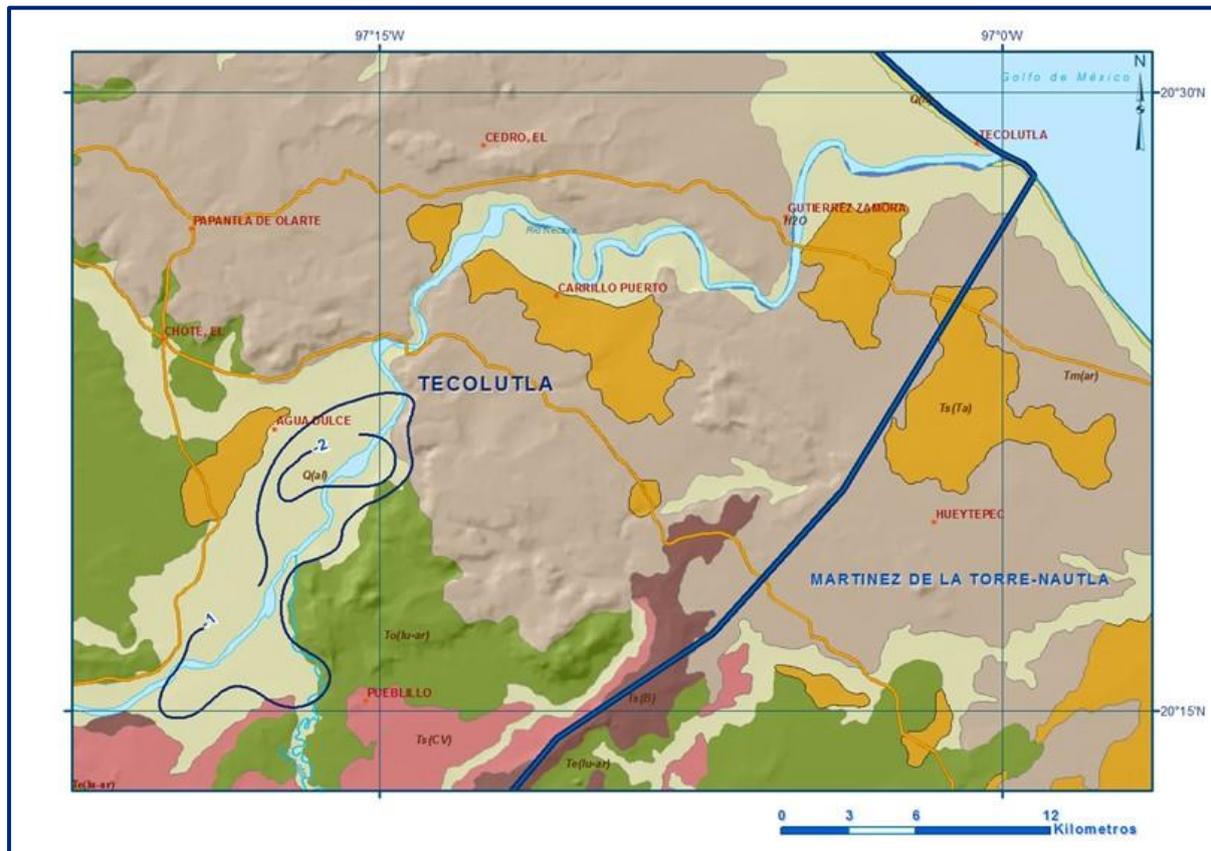


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2014-2019).

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la principal zona de explotación para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, iones mayoritarios, sólidos totales disueltos (STD) 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 STD presenta valores que varían, de manera general, de 154 a 914 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano. En 5 aprovechamientos se rebasa el límite máximo permisible (LMP) en la concentración de STD establecida por dicha norma.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 140 a 5120 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Todos los

valores de pH se encuentran entre los LMP que marca la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano, ya que se registran valores de 6.3 a 7.6, 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 muestreada, se registraron valores de 22.8 a 25.5.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media (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 identificó como familia dominante la bicarbonatada-cálcica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas calcáreas y volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el año 2010, se registró la existencia de 533 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 22 son pozos, 468 norias, 12 manantiales y 31 galerías filtrantes; del total de aprovechamientos, 503 se encuentran activos y 30 inactivos temporalmente; 12 son para uso agrícola, 64 para abastecimiento de agua potable, 10 para uso pecuario, 44 para servicios, 2 para uso industrial, 382 para uso doméstico y 19 para usos múltiples.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **9.2 hm³ anuales**, de los cuales 7.9 hm³ (85.9%) se destinan al uso público-urbano, 0.9hm³ (9.8%) para uso doméstico-pecuario y 0.4 hm³ (4.3%) para uso agrícola.

Adicionalmente, a través de los 12 **manantiales** censados y de las concesiones de agua superficial procedente de esta fuente, en 2017 se cuantificó un caudal de 2752 lps, que equivalen a **86.8 hm³ anuales**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2014-2019, en un área de balance de **404 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 con 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 uso agrícola es pequeño, solo se considera la recarga incidental debido a las fugas en la red de agua potable y de alcantarillado.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri:** Recarga incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración

- Dm:** Descarga a través de manantiales
Dfb: Descarga por flujo base de ríos
 $\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

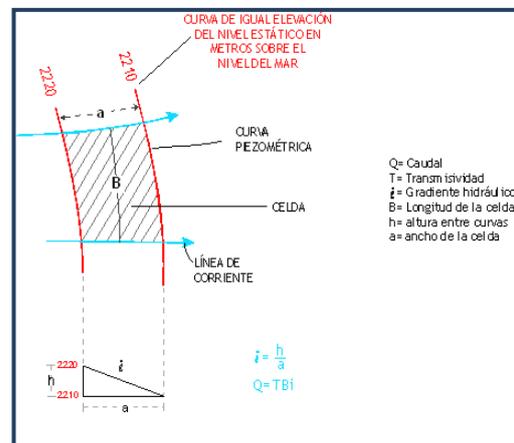
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de 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 (m^3/s)
T: Transmisividad (m^2/s)
B: Longitud de la celda (m)
i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **31.2 hm³/año**.

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	4244	3212	10	0.0031	0.010	0.1321	4.2
E2	1780	2260	10	0.0044	0.016	0.1260	4.0
E3	4170	1090	5	0.0046	0.006	0.1148	3.6
E4	2051	1318	5	0.0038	0.008	0.0622	2.0
E5	2614	2018	5	0.0025	0.012	0.0777	2.5
E6	1727	2384	10	0.0042	0.012	0.0869	2.7
E7	6309	1523	10	0.0066	0.008	0.3314	10.5
E8	1212	1800	5	0.0028	0.016	0.0539	1.7
TOTAL							31.2

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)

El volumen anual de agua subterránea para uso público-urbano es de 7.9 hm³, tomando en cuenta que existe baja eficiencia en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable y la profundidad somera al nivel del agua subterránea, principalmente en Papantla, se considera que un 30% de este volumen recarga de manera efectiva al acuífero a través de las fugas en la red de distribución de agua potable y en el sistema de alcantarillado. Por lo tanto, **Ri = 2.4 hm³/año.**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros, a través de manantiales (Dm) y por flujo base (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 **9.2 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 **4.0 hm³/año.**

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	3377	1072	1	0.0009	0.012	0.0378	1.2
S2	3910	1416	1	0.0007	0.012	0.0331	1.0
S3	4330	2520	1	0.0004	0.012	0.0206	0.7
S4	3393	1174	1	0.0009	0.012	0.0347	1.1
TOTAL							4.0

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

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

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 23.6 °C y 1460.8 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 1091.4 mm anuales, como se muestra a continuación:

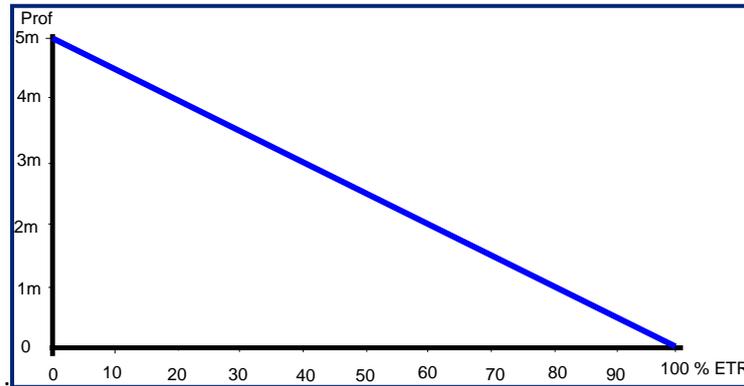
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

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

T (°C) =	23.6		
P(mm) =	1460.8	P ² =	2133936.64
L =	1547.2128	L ² =	2393867.45
ETR (mm)	1091.4		

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 = 39.8 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019).

RANGOS DE PROFUNDIDAD AD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
4	4	21.0	1.0914	5	0.2	4.6
2 a 5	3.5	46.3	1.0914	5	0.3	15.2
2	2	30.7	1.0914	5	0.6	20.1
Total		98.0				39.8

7.2.4 Descarga a través de manantiales

A través de los 12 **manantiales** censados y de las concesiones de agua superficial procedente de esta fuente, en 2019 se cuantificó un caudal de 2752 lps, que equivalen a **86.8 hm³ anuales.**

7.2.5 Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de la estación hidrométrica Remolino, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, el río Tecolutla presentó un caudal estimado de 65.55 m³/s de flujo base, en el estiaje del periodo 1965-2009, que representa un volumen de 2067.2 hm³ anuales. Por lo tanto, **Dfb = 2067.2 hm³ anuales.**

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

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 $S_y = 0.15$, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = A * h * S$$

Donde:

$\Delta V(S)$: 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 -13.7 hm^3 , es decir, un promedio anual de **-2.7 hm^3** .

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

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	S _y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-2	-2.0	9.1	0.15	-2.7
-2 a -1	-1.5	48.8	0.15	-11.0
	TOTAL	57.9	TOTAL	-13.7
Promedio anual				-2.7

Solución a la ecuación de balance

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

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

$$R_v = 4.0 + 9.2 + 39.8 + 86.8 + 2067.2 - 31.2 - 2.4 - 2.7$$

$$R_v = 2170.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 2170.7 + 31.2 + 2.4$$

$$R = 2204.3 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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:

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

Donde:

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

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **2204.3 hm³/año**, de los cuales 2202.0 hm³ son recarga natural y 2.4 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 Tecolutla, su valor es **2158.0 hm³ anuales**, de los cuales 4.0 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar para mantener la posición de la interface marina, 86.8 hm³ al volumen de agua concesionado de los manantiales y 2067.2 hm³ al flujo base del Río Tecolutla. No se considera comprometida la evapotranspiración porque ésta fue evaluada en el subálveo del Río Tecolutla en donde los niveles freáticos someros son alimentados por su flujo base. Por lo tanto, **DNC = 2158.0hm³ 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 **33,016,502 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 2204.3 - 2158.0 - 33.016502 \\ \text{DMA} &= 13.283498 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **13,283,498 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Golfo Centro, 2010. Estudiogeohidrológico en los acuíferos Cuicatlán, Coatzacoalcos, en el estado de Oaxaca; Jalapa-Coatepec, Tecolutla y Álamo-Tuxpan, en el estado de Veracruz. Realizado por Consultoría BETSCO, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2011. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tecolutla, estado de Veracruz.

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

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

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera E14-3 "Veracruz" Esc. 1:250.000.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera F14-12 "Poza Rica" Esc. 1:250.000.