



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO TAMPICO-MISANTLA (3017) ESTADO DE
VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	6
3	FISIOGRAFÍA.....	7
3.1	Provincia fisiográfica.....	7
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrología Superficial.....	9
3.4	Geomorfología.....	10
4	GEOLOGÍA.....	10
4.1	Estratigrafía.....	12
4.2	Geología estructural	25
4.3	Geología del subsuelo	27
5	HIDROGEOLOGÍA.....	28
5.1	Tipo de acuífero	28
5.2	Parámetros hidráulicos.....	29
5.3	Piezometría	29
5.4	Comportamiento hidráulico.....	29
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	29
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	30
5.4.3	Evolución del nivel estático	31
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	32
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	33
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	33
7.1	Entradas	34
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	34
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	35
7.1.3	Recarga inducida (Ri)	36
7.2	Salidas.....	37
7.2.1	Evapotranspiración (ETR).....	37
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	38
7.2.3	Extracción por bombeo (B).....	39
7.2.4	Descarga a través de manantiales (Dm).....	39
7.3	Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	39
8	DISPONIBILIDAD	40
8.1	Recarga total media anual (R).....	41
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	41
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	41
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 Tampico-Misantla, definido con la clave 3017 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción norte del estado de Veracruz, entre los paralelos 20°30' y 22°28' de latitud norte y los meridianos 97°19' y 98°41' de longitud oeste, abarcando una superficie de 14,192 km².

Limita al norte el acuífero Zona Sur, al noroeste con Llera-Xicoténcatl, ambos pertenecientes al Estado de Tamaulipas; al sur con el acuífero Álamo-Tuxpan, del Estado de Veracruz; al suroeste con los acuíferos Atotonilco-Jaltocan, Xochitlán-Huejutla, Atlapexco-Candelaria y Calabozo, pertenecientes al Estado de Hidalgo y al oeste con el acuífero Tamuín del estado de San Luis Potosí. Al este su límite natural es el Golfo de México (figura 1).

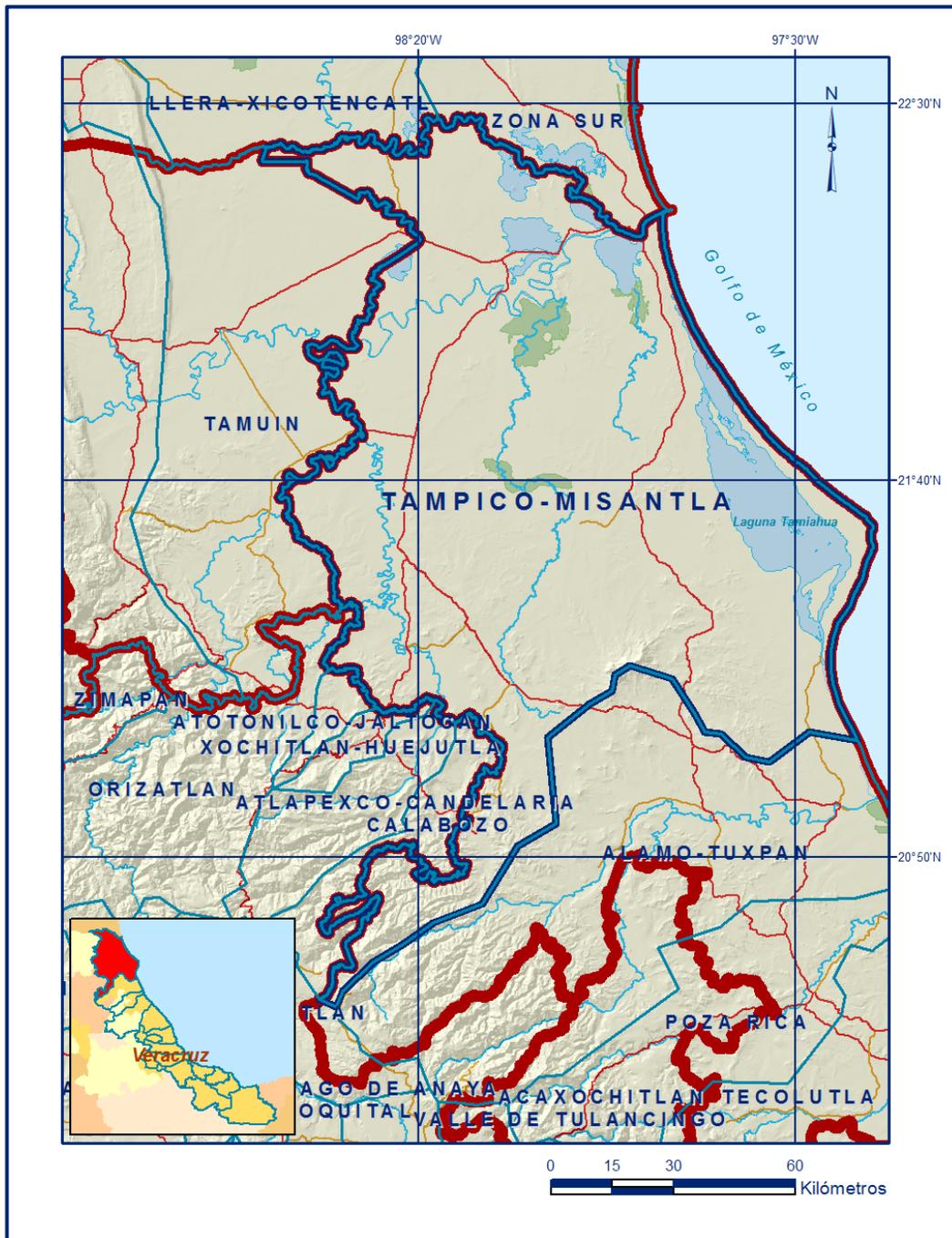


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el acuífero abarca totalmente los municipios Pánuco, Pueblo Viejo, Tampico Alto, Ozulama de Mascareñas, El Higo, Tempoal, Platón Sánchez, Chiconamel, Chalma, Tantoyuca, Ixcatepec, Chontla, Citlaltépetl, Tancoco, Tantima, Naranjos de Amatlán, Chinampa de Gorostiza, Tamalín, Tamiahua e Ilnamatlán; parcialmente los municipios Tuxpan, Temapache, Cerro Azul, Chicontepec, Huayacocotla, Zontecomatlán de López y Fuentes y Benito Juárez. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 3017 TAMPICO-MISANTLA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	17	21.7	22	28	4.0	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	97	47	26.6	22	15	37.0	DEL 2 AL 3 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
3	97	21	45.9	21	5	30.7	
4	97	28	7.8	21	6	34.2	
5	97	33	31.1	21	2	42.2	
6	97	36	35.9	21	3	18.5	
7	97	39	55.6	21	6	24.7	
8	97	42	3.0	21	6	37.7	
9	97	43	21.8	21	9	7.5	
10	97	46	22.8	21	13	38.4	
11	97	51	56.7	21	15	23.9	
12	97	53	55.2	21	14	11.1	
13	97	54	19.5	21	12	1.8	
14	97	57	19.9	21	10	22.2	
15	98	2	56.4	21	5	52.2	
16	98	1	49.3	20	54	26.0	
17	98	6	50.9	20	51	25.6	
18	98	11	31.0	20	43	45.0	
19	98	18	0.6	20	41	16.1	
20	98	21	55.2	20	38	30.3	
21	98	25	59.4	20	36	5.0	
22	98	30	4.8	20	32	16.6	
23	98	30	54.6	20	30	4.0	
24	98	33	9.8	20	31	6.8	DEL 24 AL 25 POR EL LIMITE ESTATAL
25	98	15	10.9	21	7	53.2	DEL 25 AL 26 POR EL LIMITE ESTATAL
26	98	18	1.0	21	10	40.0	DEL 26 AL 27 POR EL LIMITE ESTATAL
27	98	25	24.5	21	9	49.7	DEL 27 AL 28 POR EL LIMITE ESTATAL
28	98	31	39.3	21	14	56.2	DEL 28 AL 29 POR EL LIMITE ESTATAL
29	98	30	15.5	21	23	18.2	DEL 29 AL 30 POR EL LIMITE ESTATAL
30	98	40	13.2	22	24	16.7	DEL 30 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	17	21.7	22	28	4.0	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Álamo-Tuxpan pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Norte y al Consejo de Cuenca Río Pánuco, instalado el 26 de agosto de 1999.

El acuífero se encuentra parcialmente vedado; en la porción norte de su territorio están vigentes dos decretos de veda para la extracción de agua subterránea. El primero es el *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido, para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Área y extensión geopolítica del Municipio de Pueblo Viejo, Estado de Veracruz”*, publicado en el DOF el 22 de marzo de 1969. Ambos decretos se clasifican como tipo III, en los que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. El segundo es el *“Decreto por el que se abrogan los decretos presidenciales que establecieron la Unidad de Riego para el Desarrollo Rural La Tortuga II y los Distritos de Riego Pujal Coy Primera Fase, Las Ánimas y Chilcayán, de fechas 22 y 30 de enero de 1973”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 30 de enero de 1975. Este decreto no tiene clasificación.

En la mayor parte de su superficie no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

La porción no vedada del acuífero Tampico-Misantla, clave 3017, se encuentra 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 Diario Oficial de la Federación 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.

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

El usuario principal del agua es el público-urbano, en su territorio se localizan parcial o totalmente 3 Distritos de Riego.

En una pequeña porción de su extremo noroccidental se localiza parte de Distrito de Riego 092B “Río Pánuco, Chicayán”; en la porción central se ubica el Distrito de Riego 092C “Río Pánuco, Pujal Coy”; en la porción occidental se ubica el Distrito de Riego 060 “El Higo”. No se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero Álamo-Tuxpan se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación y otros en acuíferos vecinos para determinar su recarga media anual, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN DIVERSAS LOCALIDADES DEL ESTADO DE VERACRUZ. TLACOLULA, CHICONTEPEC, VERACRUZ. Elaborado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A., para la Dirección General de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, del Gobierno del Estado Veracruz, en 1982.

Entre sus objetivos principales destacan definir las condiciones geohidrológicas del área para proponer los aprovechamientos más adecuados, determinar la calidad del agua por medio de análisis fisicoquímicos y proponer los lugares más adecuados para realizar perforaciones de pozos o captaciones de agua superficial.

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 en la zona. 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.

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUÍFEROS ALDAMA-SOTO LA MARINA, TAMAULIPAS Y TAMPICO-MISANTLA, VERACRUZ. Realizado en 2010 por Corín y Anaya, S.A. de C.V, para la Comisión Nacional del Agua. Entre sus objetivos destacan: Establecer una red de monitoreo confiable para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica de los acuíferos; actualizar el conocimiento de la posición de los niveles del agua subterránea a través de la red de medición de los acuíferos, determinar con precisión las elevaciones de los brocales o de los puntos de medición en cada uno de los vértices de la red de medición, recopilar, integrar y analizar la información piezométrica y de calidad del agua para elaborar los planos con las configuraciones respectivas y definir el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LOS ACUÍFEROS ALDAMA-SOTO LA MARINA, ESTADO DE TAMAULIPAS Y TAMPICO-MISANTLA, ESTADO DE VERACRUZ. Realizado en el 2013 por GEOPSA, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se encuentra localizada en la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo. Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1981), la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo Norte, Subprovincia Llanuras y Lomeríos.

La Provincia Planicie o 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 en que se depositaron que van 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 del Pleistoceno.

La Subprovincia Llanuras y Lomeríos se caracteriza por estar formada por sedimentos antiguos arcillosos-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.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por E. García para las condiciones de la República Mexicana, en la superficie cubierta por el acuífero predominan los tipos de clima cálido, cálido subhúmedo con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. La precipitación anual es mayor de 500 mm y

precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos periodos de ocurrencia, uno de mayo a octubre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias invernales de noviembre a enero, con precipitaciones menos significativas, influenciadas por los frentes fríos. Septiembre es el mes que presenta los valores más altos de precipitación y en abril se registra la lámina más baja. En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, mayo es el mes más cálido; en tanto que los meses de enero y febrero registran la menor temperatura media.

Para la determinación de las variables climatológicas se analizó la información de 39 estaciones que tienen influencia en la superficie del acuífero: Benito Juárez, Cacalilao, Chalahuite, Chicayán, Chicontepec, Citlaltépetl, Corazol, El Cardón, El Mercado, El Quebrache, El Coyol, El Higo, El Olivo, Encarnación, Ixcatepec, La Michoacana, La Puente, La Potosina, La Laja, Las Flores, Los Hules, Majahual, Mamey, Mata de Chávez, Naranjos, Paija, Pánuco, Platón Sánchez, Rancho Santa Rosa, San Luciano, Santa Trinidad, Tamos, Tantavil, Tantoyuca, Tempoal, Terrerillos, Tlacolula, Vichinchijol y Zontecomatlán. De acuerdo con los registros de estas estaciones para varios periodos, el más grande es 1962-2012.

Se determinaron valores promedio anuales de temperatura y precipitación de **24.2°C** y **1141.4 mm**, respectivamente. En cuanto a la evaporación potencial media anual su valor es de **1,300 mm**.

3.3 Hidrología Superficial

La mayor parte de la superficie del acuífero se ubica en la Región Hidrológica 26 “Pánuco”, una porción de su extremo oriental y la porción suroriental, se ubican en Región Hidrológica 27 “Tuxpan-Nautla” o “Norte de Veracruz”.

La Región Hidrológica Pánuco está integrada por las cuencas A y B, drenadas por la presa Paso de Piedras, los ríos Pánuco y Chilcayán que desembocan a la Laguna Tamés, así como por las lagunas Pueblo Viejo, La Tortuga y Chairel y el Río Tamesí que desemboca en el Golfo de México. La Región Hidrológica Tuxpan-Nautla o Norte de Veracruz está integrada por cinco cuencas: la Cuenca A, formada por el Río Diamante que desemboca a la Laguna Grande y los ríos Bobos y Nautla que descargan sus aguas al Golfo de México, la Cuenca B, drenada por los ríos Necaxa y Tecolutla que vierten sus aguas en el Golfo de México, la Cuenca C, formada por los ríos Cazonas y San Marcos

que confluyen al Golfo de México, la Cuenca D, drenada por el Río Tuxpan que desemboca en la Laguna de Tampamachoco, y la Cuenca E, drenada por la Laguna de Tamiahua.

3.4 Geomorfología

De acuerdo a los rasgos geomorfológicos presentes en el acuífero, ubicado entre las estribaciones orientales de la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo, la mayor parte de su superficie se localiza dentro de ésta última provincia fisiográfica cuya morfología se caracteriza por presentar elevaciones menores de 200 msnm, con un relieve de superficies planas, inclinadas al oriente, originadas por acumulación fluvial y marina, así como por superficies onduladas formadas por erosión diferencial en los depósitos del Neógeno.

La planicie se extiende hasta la base de la Sierra Madre Oriental y está interceptada por lomeríos, mesetas y planos ligeramente inclinados al oriente.

Al oriente la zona costera forma un litoral cóncavo y sinuoso, con pequeñas sierras o lomeríos aislados de poca elevación; la actividad tectónica es de gran importancia en la región ya que ha originado las estructuras en que se alojan importantes yacimientos petroleros.

La planicie se extiende al suroeste y casi toda ella es plana con suave inclinación, cubierta por depósitos aluviales de poco espesor. El litoral del Golfo de México en general es una playa baja arenosa, que solo excepcionalmente presenta afloramientos rocosos, define una línea costera sinuosa, definida por la existencia de la Laguna de Tamiahua, presenta algunos esteros, barras y cordones litorales.

4 GEOLOGÍA

La región se encuentra ubicada en la porción norte-centro de la paleocuenca sedimentaria o Subprovincia Geológica llamada Cuenca Tampico–Misantla, la cual se desarrolló durante el Terciario al quedar sumergida la Plataforma de Tamaulipas. A nivel regional, el accidente más notable lo integra la estructura de origen ígneo extrusivo formada por la Sierra de Tantima, conformada por emisiones de basaltos masivos e intensamente fracturados, que constituye un fenómeno aislado dentro del marco sedimentario de la cuenca. (figura 2).

Rocas sedimentarias del Cretácico Inferior, constituidas por calizas, anhidritas, dolomitas, areniscas e intercalaciones de lutitas y calizas arcillosas, afloran en las sierras localizadas en la porción suroccidental de la zona. La alternancia de lutitas y areniscas de estratificación delgada son las unidades litológicas de mayor afloramiento en la zona. En los cauces de los ríos se presentan depósitos aluviales y fluviales del Cuaternario que conforman sedimentos de arenas y gravas con cantidades variables de arcilla, que en algunas zonas forman acuíferos.

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en esta región está constituida por sedimentos cuya edad varía del Jurásico Inferior al Reciente. La mayor parte de las rocas que afloran en la región varían en edad del Paleoceno al Mioceno y específicamente en el área del acuífero se encuentran sedimentos del Oligoceno, correspondientes a las formaciones Mesón y Palma Real. A continuación, se describen las distintas unidades litológicas de la más antigua a la más reciente:

JURÁSICO

Formación Huayacocotla

Es la unidad más antigua que aflora, consiste de areniscas de color gris verdoso dispuestas en estratos de 20 a 60 cm, plegados y con estructura "boudinage", intercaladas con un conglomerado de color verde oscuro conformado por fragmentos de cuarzo y rocas metamórficas, así como con lutitas carbonosas de color gris oscuro. Subyace en forma transicional a la Formación Cahuwasas, en tanto que su contacto inferior no se observa.

Formación Cahuwasas

Está constituida por limolitas de color rojo, areniscas y conglomerados, dispuestas en estratos de espesor de 20 a 90 cm, cubiertas en forma transicional por un paquete representado por las formaciones Santiago, Tamán y Pimienta. Estas formaciones están agrupadas en una misma unidad debido a que sus litologías son muy similares y por la dificultad para ser cartografiadas. Están compuestas por calizas arcillosas en capas de 10 a 40 cm alternando con lutitas calcáreas. Presentan clivaje y pliegues sin-sedimentarios, con presencia frecuente de amonitas, radiolarios y bioclastos indeterminados.

Formación Tamán

Definida por Heim en 1926 y después Erben la describe en su localidad tipo Tamán, ubicada 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, observable en superficie y en el subsuelo a través de los pozos petroleros; en algunas localidades sobreyace a la Formación Santiago y en otras llega a cubrir al basamento del Triásico. 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 dispuesta 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; presenta 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. Aflora únicamente en las inmediaciones del poblado San Miguel Tenextatiloan, en un corte de la carretera que une a Libres con Oriental, donde se presenta muy plegada, y en otros dos afloramientos en la porción norte del área.

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 Guaxcamá

Secuencia calcárea marina definida por Stephenson, J. en 1921, depositada en aguas someras y cuencas cerradas, con un espesor aproximado de 300 m.

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.

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, en su localidad tipo ubicada en el Cañón de La Borrega, Tamaulipas.

Aflora también en los cañones que cortan la sierra de Tamaulipas, San Carlos y la Sierra Madre Oriental, su exposición está limitada a estas pequeñas áreas, 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 centímetros a dos metros de espesor, con pequeños mantos de óxido de fierro inter-estratificados 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, su 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. Este horizonte llamado también Formación, está representado por calizas arcillosas de color gris, gris oscuro y negro con estratos de espesor muy variable desde unos cuantos cm hasta 0.50 m, intercalados en lutita laminada 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 en el 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 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 de Ébano, Pánuco y 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, constituyendo la unidad denominada 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 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 contienen 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 bentónicas como *Stomiosphaera conoidea*, *Microcalamoides diversus* y *Nannoconus minutus*. Su ambiente de depósito es de talud, representando las facies interna 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*), 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, en delgadas capas de carácter laminar.

Las lutitas negras de esta parte contienen impresiones de *Inoceramus Labiatus*. La parte 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 de San Felipe, 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 colores verde y gris claro. Son típicos los intervalos de calizas moteadas con manchas ovaladas oscuras que pueden ser debidas 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, es el nombre que se utilizó para 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 origen a montículos con apariencia de dunas, subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales. Su espesor promedio es de 300 m y se correlaciona dentro del área de estudio con la unidad arcillo-arenosa del Cretácico Superior (Formación Cárdenas). Se le asigna una edad Campaniano–Maestrichtiano y aparentemente fue depositada en un fondo marino de aguas relativamente profundas, con abundante aporte de material terrígeno fino.

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, expuesta al oeste del área de estudio.

Sus afloramientos se distribuyen ampliamente en toda la superficie del acuífero. Está intrusionada por algunos diques, cuyo fracturamiento resultante le confiere permeabilidad secundaria.

TERCIARIO (NEÓGENO)

Grupo Chicontepec

Definido formalmente por Dumble *et al.* en 1918 y posteriormente elevada al rango de Grupo Chicontepec. Nuttall (1930) fue el primero en dividir al Grupo Chicontepec en tres miembros; Inferior, Medio y Superior, que hasta ahora prevalece por la buena diferenciación que se puede hacer con la prospección sísmica y con micropalontología.

Se presenta desde el sureste de San Luis Potosí hasta Tezihutlán, Puebla, paralelamente a la margen oriental de la Sierra Madre Oriental, aunque su mayor desarrollo se tiene en la Cuenca de Chicontepec, también se ha reportado en el subsuelo de la Cuenca de Veracruz.

Su localidad tipo se ubica a 2.5 km al este de Chicontepec, Veracruz, donde está integrado por una alternancia de areniscas arcillosas con limolitas y lutitas de color gris verdoso con estratificación rítmica e intercalaciones delgadas de margas arenosas de color gris oscuro (Nava y Alegría 2001).

Las tres biozonas del Grupo Inferior o Basal, Medio y Superior o Canal, actualmente son consideradas como formaciones por sí solas, ya que reúnen las características estratigráficas que permiten su separación y son cartografiables; además, se pueden separar en el subsuelo por sus contactos discordantes que se identificaron mediante prospección sísmica.

Las dos primeras corresponden al Paleoceno Superior, mientras que Chicontepec Superior o Canal se ubica en el Eoceno Inferior.

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 Velasco

Fue definida por Cushman y Tager en 1924, en la localidad tipo de la estación Velasco del Ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, está formada por lutitas calcáreas de color gris con tonos verdes, intercalados con algunas margas y esporádicas areniscas calcáreas; en algunas localidades contiene yeso.

La unidad presenta concreciones calcáreas y localmente delgadas capas de bentonita de color verdoso. Contiene además intercalaciones persistentes de areniscas calcáreas en estratos delgados y medianos de color café con tonos rojizos, algunas presentan huellas de oleaje y restos de plantas.

El espesor en afloramientos varía entre 38 y 230 m y en algunos informes de pozos petroleros se le asigna un espesor de 28 a 87 m y de 180 a 275 m.

Su edad corresponde al Paleoceno–Eoceno. PEMEX la divide en cuatro miembros (basal, inferior, medio y superior) que se identifican con los microfósiles índices de los cuatro miembros de la Formación Chicontepec. Cubre a las margas de la Formación Méndez del Cretácico Superior y subyace discordantemente a la unidad arcillosa del Eoceno.

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 parte 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, contiene nódulos de siderita característicos y delgadas intercalaciones de arenas de grano fino. En la localidad tipo 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 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.

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 que va de Álamo a Potrero del Llano, Veracruz. Se caracteriza por presentar estratificación irregular y se compone de margas con intercalaciones de capas delgadas de bentonita de color amarillo verdoso en la cima, 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 corresponde con el de una plataforma marina clástica 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 Horcones

Fue definida por Grimdale en 1923, en la localidad tipo ubicada al sureste y noreste de Colipa, Veracruz. Está constituida por lutitas calcáreas de color gris claro y gris oscuro, que intemperizan a color café con intercalaciones de areniscas finas de cuarzo y algunos estratos de conglomerados calcáreos, en capas de 10 a 15 cm de espesor, con algunas intercalaciones de ceniza volcánica.

También se reportan capas gruesas de hasta un metro de espesor de conglomerados heterogéneos con fragmentos redondeados de calizas y dolomías, con pedernal negro y en menor proporción fragmentos de rocas ígneas y areniscas calcáreas. Su espesor es muy variable, de 60 a 450 m y su edad Oligoceno Superior se determinó por su contenido faunístico. Su depósito en aguas someras cercanas a la costa, con aporte de material detrítico producto de la erosión de rocas más antiguas.

Formación Palma Real

Definida por Nuttal en 1928 y dividida en dos miembros, inferior y superior, por Villatoro en 1932. El miembro inferior consiste de areniscas con diferentes texturas, margas arenosas de color gris azul (con abundantes micro foraminíferos), 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 el 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 azuloso y verdoso, a veces arenosas de grano fino, en estratos de 1 a 30 cm de espesor; fracturadas que intemperizan en colores crema y café amarillento.

Las lutitas presentan intercalaciones de areniscas de color gris, de grano fino a medio, dispuestas 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

Definida 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 Cazonés hasta la cercanía 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 decapas 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 pozos 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. 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 la superficie varía de 50 a 200 m y 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 en forma de derrames lávicos tabulares, 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 del acuífero y en su extremo sur en la sierra ubicada al sur de Citlaltépetl y Tantima, en el límite con el acuífero Álamo-Tuxpan.

Rocas ígneas intrusivas

Están representadas por rocas de composición granodiorítica-diorítica y en ocasiones por gabros que presentan textura holocristalina y color oscuro, emplazados en las rocas arcillosas del Eoceno en el sur de la región, en forma de "troncos".

Su expresión morfológica es de prominencias que modifican los lomeríos.

CUATERNARIO

Depósitos Aluviales

Están constituidos por un conjunto de materiales clásticos de tamaño que varía desde gravas hasta arcillas, 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 y 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 una pequeña cuenca endorreica. Las arcillas son generalmente plásticas y de color oscuro, las arenas son de grano fino. Los sedimentos, donde predominan las arcillas, se presentan interestratificados en capas laminares delgadas. Presentan una morfología de llanura y está expuesta principalmente en las regiones topográficamente más bajas del sureste del área. No se tiene información del espesor de esta unidad.

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. Estos clásticos son transportados por el viento a partir de los depósitos de playa. Forman barras y dunas orientadas hacia el norte, en ocasiones con estratificación cruzada. En algunas zonas forman dunas fijas formadas por fragmentos de conchas y cementadas por carbonatos.

Depósitos de Litoral

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

4.2 Geología estructural

La cuenca sedimentaria Tampico-Misantla está compuesta principalmente por tres unidades estructurales primarias: La parte 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 (Falla Menudillo) sin conexión con los esfuerzos tectónicos que levantaron la Sierra Madre Oriental, que se produjo como ajuste de los bloques dentro del basamento ígneo provocado por esfuerzos componentes casi verticales. Al sur existe un bloque de la Faja de Oro, de forma semicircular, entre la Laguna de Tamiahua y la Barra de Tecolutla, que representa una estructura arrecifal con su porción más alta en el centro y 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 superficie del acuífero sólo se observa una gran estructura anticlinal simétrica.

Las rocas terciarias forman un monoclinal con echado muy suave hacia el este cubierto parcialmente por rocas basálticas. Esta secuencia se encuentra afectada por varios troncos de composición básica.

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 y fue la 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 arriba y son el resultado del acarreo post-orogénico de terrígenos. Su distribución espacial es sensiblemente paralela a la facies de depósito de tipo flysch y 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. Estos sedimentos descansan sobre las rocas del Mesozoico y tienen un espesor que varía de pocos metros, cerca de sus límites hacia tierra, a más de 6,000 m bajo el Golfo de México.

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra

alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales, fluviales, y eólicos de granulometría variada que constituyen el lecho y la llanura de inundación de ríos Jamapa, Paso de Ovejas, Los Pescados y otros arroyos tributarios, así como areniscas y conglomerados.

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 revolución laramídica. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan intercalaciones de calizas, lutitas areniscas y basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados 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 limolitas y areniscas que conforman la Formación Cahuascal.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos depositados tanto en los subálveos de las corrientes fluviales como en la planicie costera. La granulometría de estos materiales varía de gravas a arcillas, conformando un acuífero de reducidas dimensiones y poca capacidad de almacenamiento.

Se puede apreciar en su porción superior sedimentos aluviales y conglomerados cuaternarios, que presentan granulometría y permeabilidad variable.

En su porción inferior el acuífero se aloja en areniscas, lutitas y en menor proporción basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Debido a la alternancia de secuencias arcillo-calcáreas es posible inferir la presencia de horizontes **acuíferos semiconfinados**. Las rocas calizas pueden presentar también condiciones de semiconfinamiento, sus áreas de recarga se localizan en las sierras

límites del valle, cuyo potencial no ha sido explorado aún en la región y puede localizarse a grandes profundidades en la planicie costera.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades llevadas a cabo en el estudio realizado en el 2013, se realizaron 3 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Adicionalmente, se cuenta con la información de por lo menos de 18 pruebas más realizadas en el acuífero vecino Llera-Xicoténcatl. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos de Neuman, Theis y Jacob. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos mencionados, se establece que los valores de transmisividad varían de **3.8×10^{-2} a $2.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (3283.2 a 0.02 m^2/d)**, con un valor promedio de **$7.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (656.6 m^2/d)**. En los aprovechamientos emplazados en las lutitas y margas la transmisividad varía 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)**. Los valores de conductividad hidráulica varían de **9.2×10^{-5} a $9.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (7.9 a 0.8 m/d)**.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento, pero debido al tipo de materiales que constituyen la parte superior del acuífero, se le asignó un valor de rendimiento específico de **0.01 a 0.05**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento piezométrico se cuenta con información correspondiente a 2010 y 2013.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en 2013 presenta valores que varían de 1 a 20 m, incrementándose por efecto de la topografía, desde la porción oriental del acuífero, que corresponde a la zona costera, hacia el occidente, en dirección de las estribaciones de las sierras y lomeríos que lo delimitan.

Los niveles más someros se registran a lo largo del cauce del Río Pánuco, otros ríos y arroyos, en torno de cuerpos de aguas superficiales y a lo largo de toda la planicie costera. Los valores más profundos se presentan hacia las partes topográficamente más altas, en la zona comprendida entre los poblados Ixcatepec, Tantoyuca y Tempoal de Sánchez (figura 3).

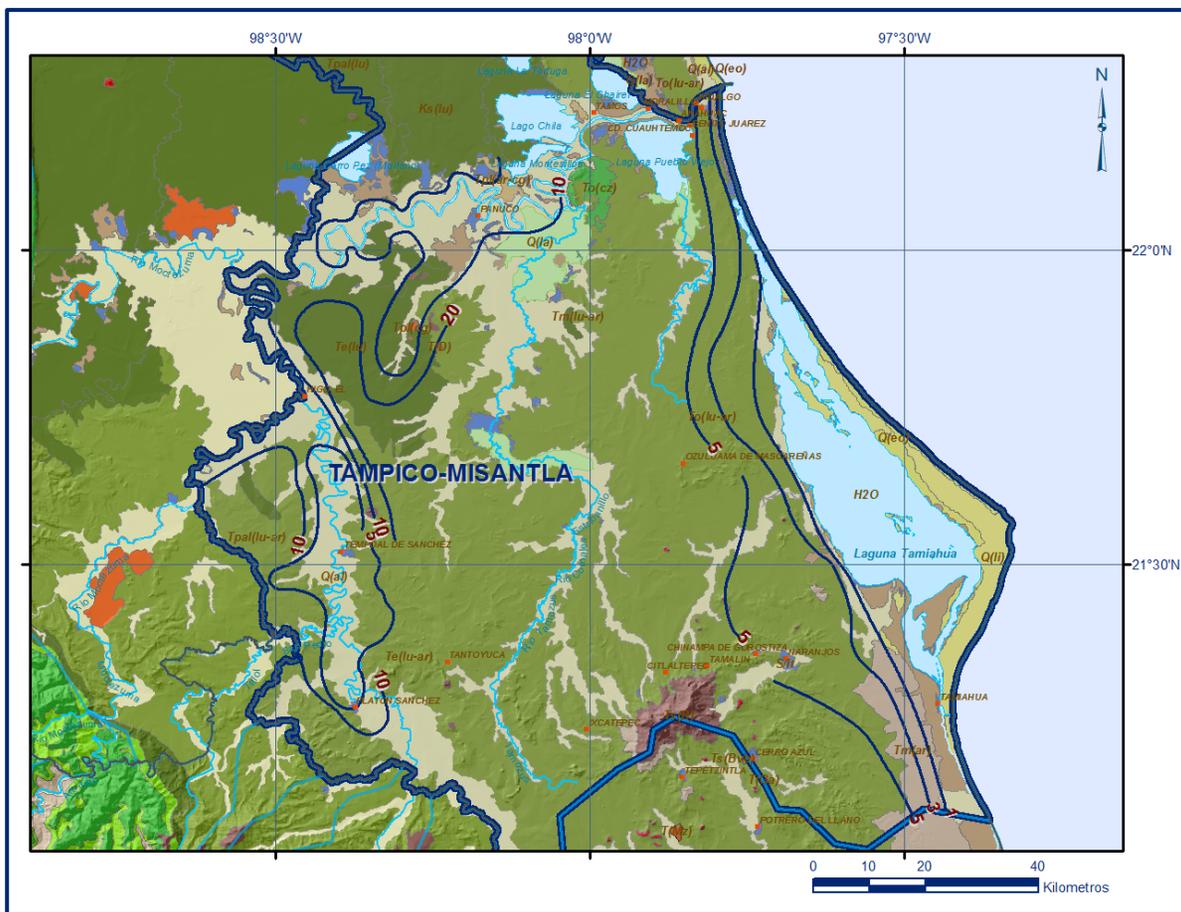


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2013 presenta valores varían entre 5 y 100 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones causadas por la concentración de pozos o del bombeo.

Los valores más bajos se localizan en la porción costera, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia la porción occidental, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo de occidente al oriente. En la porción central y occidental del acuífero la dirección el flujo subterráneo se dirige a los ríos Tempoal y Pánuco (figura 4).

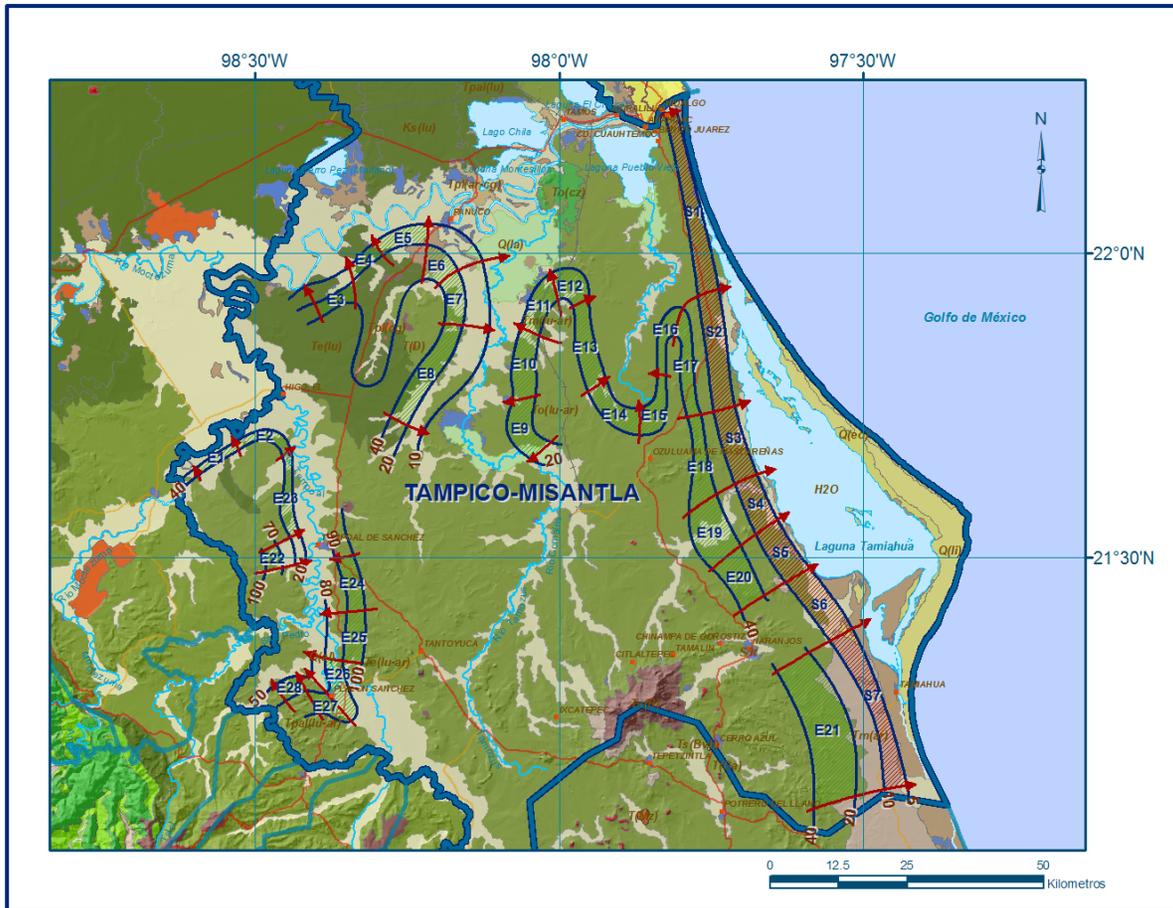


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2013, se registran valores puntuales de abatimiento, de 1 a 2 m. En la mayor parte del acuífero los niveles del agua subterránea no presentan cambios significativos en su profundidad.

Por otra parte, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. (figura 5).

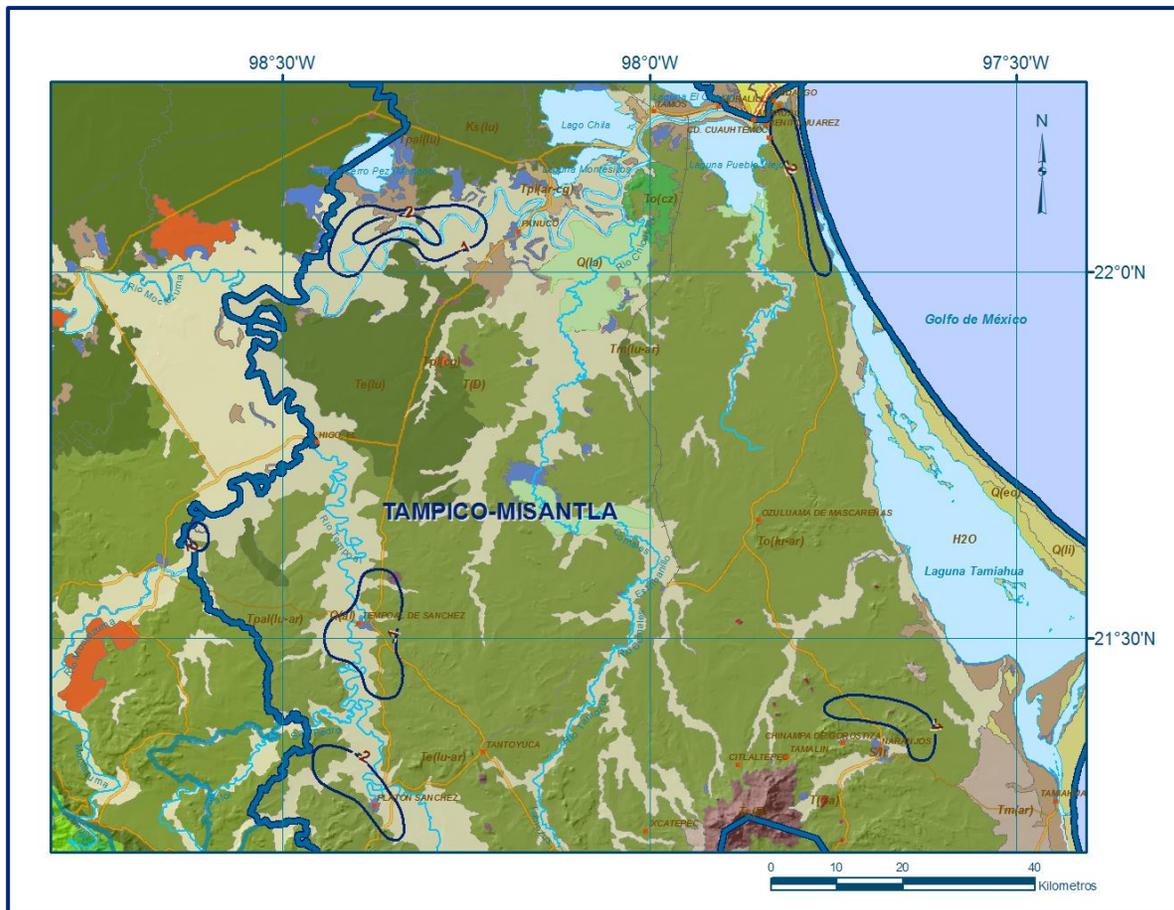


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2010-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de las actividades de campo consideradas en los estudios realizados en 2013, únicamente se hicieron mediciones in situ en 115 aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, en los que se determinó temperatura, conductividad eléctrica, pH y concentración de sólidos totales disueltos (STD).

La concentración STD presentó valores que variaron de 114 a 1182 mg/l, sólo 2 aprovechamientos sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. para el agua destinada al consumo humano (1078 y 1182 mg/l).

Las menores concentraciones se registran en los aprovechamientos localizados hacia las partes topográficamente más altas, ubicadas en el extremo occidental del acuífero, y las más las más altas hacia la zona costera y hacia los ríos Pánuco y Tempol, confirmando de esta manera las direcciones preferenciales del flujo subterráneo.

Los valores de conductividad eléctrica variaron de 229 a 1830 $\mu\text{S/cm.}$, que la clasifican como agua dulce, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. Los valores de pH varían de 4.43 a 8.87 y de temperatura entre 22.8 y 34.6 °C.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En el censo de aprovechamientos llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2013, se registraron un total de 150 obras que aprovechan el agua subterránea: 42 pozos, 102 norias y 6 manantiales; del total de obras, 133 están activas y las 17 restantes inactivas. Del total de obras activas, 78 (40 pozos y 38 norias) se destinan al público-urbano; 48 (4 pozos, 38 norias y 6 manantiales) para uso doméstico-pecuario y 7 norias para servicios.

El volumen de extracción conjunta asciende a **8.5 hm³ anuales**, de los cuales 8.1 hm³ (95.3 %) se destinan al uso público-urbano y 0.4 hm³ (4.7 %) para usos doméstico y pecuario. El volumen de agua utilizado para uso agrícola es muy bajo.

Adicionalmente, a través de los **6 manantiales** se descarga un caudal de 73 lps, que representa un volumen anual de **2.3 hm³**, destinado al uso doméstico-pecuario.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2010-2013, en un área de balance de **3370 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan dispersos la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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:

Recarga total – Descarga total = 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 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 inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, la que se produce a lo largo de los canales de riego; del agua residual de las descargas urbanas, así como las fugas en el sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado constituyen otra fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv = Recarga vertical

Ri = Recarga inducida

Eh = Entradas por flujo subterráneo horizontal

B = Bombeo

Sh = Salidas por flujo subterráneo horizontal

ETR = Evapotranspiración

Dm = Descarga a través de manantiales

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

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

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

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 área de estudio 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 el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 4.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

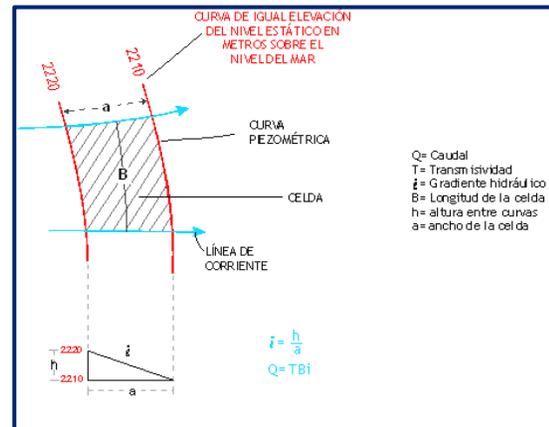
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **50.3 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2013 y otros previos en acuíferos vecinos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal (2013)

CANAL	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	10150	2730	20	0.00733	0.0030	0.2231	7.0
E2	9375	1950	20	0.01026	0.0015	0.1442	4.5
E3	8590	3125	10	0.00320	0.0005	0.0137	0.4
E4	5860	3910	10	0.00256	0.0010	0.0150	0.5
E5	11720	2770	10	0.00361	0.0030	0.1269	4.0
E6	5470	5080	10	0.00197	0.0030	0.0323	1.0
E7	10155	3125	10	0.00320	0.0020	0.0650	2.0
E8	20315	2735	10	0.00366	0.0008	0.0594	1.9
E9	10155	4685	20	0.00427	0.0005	0.0217	0.7
E10	14060	4295	20	0.00466	0.0005	0.0327	1.0
E11	13280	4685	20	0.00427	0.0008	0.0454	1.4
E12	8595	6250	20	0.00320	0.0008	0.0220	0.7
E13	21095	3905	20	0.00512	0.0005	0.0540	1.7
E14	11720	5470	20	0.00366	0.0005	0.0214	0.7
E15	13280	2735	20	0.00731	0.0005	0.0486	1.5
E16	10155	3905	20	0.00512	0.0005	0.0260	0.8
E17	17970	2735	20	0.00731	0.0005	0.0657	2.1
E18	18750	3125	20	0.00640	0.0005	0.0600	1.9
E19	9375	6640	20	0.00301	0.0010	0.0282	0.9
E20	8595	7030	20	0.00284	0.0005	0.0122	0.4
E21	25000	6250	20	0.00320	0.0005	0.0400	1.3
E22	6250	3905	10	0.00256	0.0025	0.0400	1.3
E23	14845	3125	20	0.00640	0.0020	0.1900	6.0
E24	10155	3515	10	0.00284	0.0005	0.0144	0.5
E25	10545	2125	10	0.00471	0.0005	0.0248	0.8
E26	10155	2735	10	0.00366	0.0030	0.1114	3.5
E27	7030	2345	10	0.00426	0.0005	0.0150	0.5
E28	6640	2345	30	0.01279	0.0005	0.0425	1.3
Total entradas							50.3

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

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

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, tomando en cuenta la profundidad somera al nivel del agua subterránea en las zonas agrícolas, la baja permeabilidad de los materiales del suelo y el riego tradicional, se considera que del volumen aplicado un 15% retorna al acuífero en forma de recarga efectiva.

Se consideramos que para uso agrícola se utilizan 72.0 hm³ anuales de agua superficial procedente de la Presa “Chicayán”, en beneficio de 12000 ha, y el 15% de coeficiente de infiltración, el volumen del **retorno de riego es 10.8 hm³ anuales**.

Por otra parte, el volumen de agua para uso público-urbano es de 8.1 hm³ anuales; si consideramos también que el 15% recarga al acuífero a través de las **fugas en la red** de alcantarillado y de la red de distribución de agua potable, la recarga es **1.2 hm³ anuales**. De esta manera, el volumen total de recarga inducida es la suma de ambas, es decir **Ri = 12.0 hm³ anuales**

7.2 Salidas

Las descargas en el acuífero ocurren principalmente por evapotranspiración (ETR), a través de manantiales (Dm), salidas por flujo subterráneo (Sh) hacia el mar y por bombeo (B). No se cuenta con información de estaciones hidrométricas para estimar el flujo base en ríos. Además, 2013 fue un año de lluvias extraordinarias que causaron inundaciones.

7.2.1 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, respectivamente), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, con los valores promedio anuales de Temperatura = 24.2 °C y de precipitación = 1141.4 mm, que se muestra a continuación:

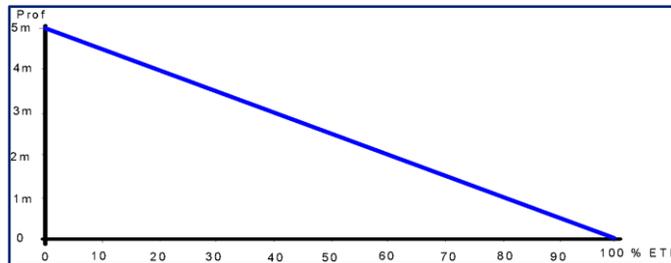
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

T (°C) =	24.2		
P(mm) =	1141.4	P ² =	1302793.96
L =	1613.6244	L ² =	2603783.7
ETR (mm)	964.5		

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.



Considerando que en una superficie de 665 km² de la porción costera del acuífero la profundidad promedio al nivel estático es de 3 m, según la relación lineal mostrada en la gráfica anterior, le corresponde un 40% de la lámina de ETR obtenida que fue de 964.5 mm anuales.

El detalle del cálculo se muestra en la tabla 3, en la que se puede observar que el valor de la evapotranspiración es de **256.6 hm³** anuales.

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración (2013)

Profundidad promedio (m)	Área (km ²)	%	Lámina ETR (m)	ETR (hm ³ /año)
3.0	665	0.4	0.9645	256.6

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 del elevación del nivel estático del año 2013, mostrada en la figura 4. El valor estimado del volumen es de **7.6 hm³ anuales** y se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal

CANAL	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	28125	3000	5	0.00167	0.0005	0.0234	0.7
S2	20310	2970	5	0.00168	0.0005	0.0171	0.5
S3	18750	2345	5	0.00213	0.0010	0.0400	1.3
S4	9375	3125	5	0.00160	0.0010	0.0150	0.5
S5	9765	4295	5	0.00116	0.0010	0.0114	0.4
S6	14060	5470	5	0.00091	0.0015	0.0193	0.6
S7	29690	3905	5	0.00128	0.0030	0.1140	3.6
Total salidas							7.6

7.2.3 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de la extracción asciende a **8.5 hm³ anuales**.

7.2.4 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, únicamente se identificaron 6 manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 73 lps, que representan un volumen anual de **2.3 hm³**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la evolución del nivel estático para el periodo 2010-2013 (figura 5) y se consideró un rendimiento específico S_y promedio = 0.03; de esta forma se calculó un cambio de almacenamiento en el área de balance de 3370 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- ΔVS :** Cambio de almacenamiento en el período analizado;
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;
- A:** Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);
- h:** Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2010-2013 se pueden observar en la tabla 5. El volumen anual del cambio de almacenamiento asciende a -20.9 hm³ que representan un promedio anual de -7.0 hm³/año. **$\Delta V(S) = -7.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$** .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento para el periodo 2010-2013

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-1	-1	324	0.03	-9.7
-2	-2	186	0.03	-11.2
0	0	2860	0.03	0.0
Área de balance		3370	TOTAL	-20.9
		Promedio anual		-7.0

Solución de la ecuación de balance

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

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

$$Rv = 7.6 + 8.5 + 256.6 + 2.3 - 50.3 - 12.0 - 7.0$$

$$Rv = 205.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = Rv + Eh + Rr$$

$$R = 205.7 + 50.3 + 12.0$$

$$R = 268.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como inducida.

Para este caso, su valor es de **268.0 hm³/año**, de los cuales 256.0 hm³ anuales corresponden a la recarga natural y 12.0 hm³ a la recarga inducida.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos 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 Tampico-Misantla su valor es de **138.2 hm³ anuales**, de los cuales 7.6 hm³ corresponde a las salidas subterráneas hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina, 2.3 hm³ de la descarga de manantiales que están comprometidos para usos doméstico-abrevadero, y 128.3 hm³ al 50% de la evapotranspiración, que se debe comprometer para preservar el ecosistema natural costero y de los ríos Pánuco y Tempoal.

Por lo tanto, **DNC = 138.2 hm³ anuales**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **35,845,513 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 268.0 - 138.2 - 35.845513 \\ \text{DMA} &= 93.954487 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **93,954,487 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio Geohidrológico 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.

Gobierno del Estado de Veracruz, Dirección General de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, 1982. Estudio Geohidrológico de Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable en Diversas Localidades del Estado de Veracruz, Tlacolula, Chicontepec, Veracruz. Realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A.