

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LOS NARANJOS (3010), ESTADO
DE VERACRUZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1.	GENERALIDADES	2
1.1	Antecedentes.....	2
1.1.	Localización.....	2
1.2.	Situación administrativa del acuífero	3
2.	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3.	FISIOGRAFÍA	6
3.1.	Provincias fisiográficas.....	6
3.2.	Clima	6
3.3.	Hidrografía	7
3.4.	Geomorfología.....	8
4.	GEOLOGÍA	10
4.1.	Estratigrafía.....	11
4.2.	Geología estructural	15
4.3.	Geología del subsuelo	17
5.	HIDROGEOLOGÍA	17
5.1.	Tipo de acuífero.....	17
5.2.	Parámetros hidráulicos.....	18
5.3.	Piezometría	18
5.4.	Comportamiento hidráulico	19
5.4.1.	Profundidad al nivel estático	19
5.4.2.	Elevación del nivel estático	19
5.4.3.	Evolución del nivel estático.....	20
5.5.	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	21
6.	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA	22
7.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	22
7.1.	Entradas	23
7.1.1.	Recarga vertical (Rv).....	23
7.1.2.	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	24
7.1.3.	Recarga incidental (Ri).....	24
7.2.	Salidas	25
7.2.1.	Bombeo (B).....	25
7.2.2.	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	25
7.2.3.	Evapotranspiración (ETR).....	25
7.2.4.	Descarga por flujo base de ríos (Dfb)	27
7.3.	Cambio de almacenamiento (ΔVS)	27
8.	DISPONIBILIDAD	28
8.1.	Recarga total media anual (R).....	29
8.2.	Descarga natural comprendida (DNC)	29
8.3.	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	29
8.4.	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
9.	BIBLIOGRAFÍA	31

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 Los Naranjos, definido con la clave 3010 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-sur del estado de Veracruz, en el límite con el estado de Oaxaca, entre los paralelos 18°09'38" y 18°55'52" de latitud norte y entre los meridianos 95°45'55" y 96°37'57" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 3,843 km².

Limita al norte con el acuífero Cotaxtla, al este con Costera del Papaloapan; al sureste con el acuífero Cuenca Río Papaloapan; al noroeste con Omealca-Huixcolotla, todos ellos del estado de Veracruz; y al sur y oeste con el acuífero Tuxtepec, del estado de Oaxaca (figura 1). Geopolíticamente, la superficie que

El acuífero abarca de forma total a los municipios de Tierra Blanca, Tres Valles e Ixmiquilpan; casi la totalidad de Tlaxiaco y porciones pequeñas de los municipios Medellín, Cotaxtla, Cuitláhuac y Omealca.



Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 3010 LOS NARANJOS							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	96	10	12.9	18	11	8.4	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	96	37	55.7	18	38	7.8	
3	96	36	26.2	18	41	50.1	
4	96	37	39.7	18	43	56.8	
5	96	26	55.5	18	44	47.3	
6	96	5	4.2	18	55	50.5	
7	96	3	32.0	18	54	23.7	
8	96	1	49.5	18	54	18.8	DEL 8 AL 9 POR EL LIMITE MUNICIPAL
9	95	46	2.2	18	26	21.5	DEL 9 AL 1 POR EL LIMITE MUNICIPAL
1	96	10	12.9	18	11	8.4	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Centro y al Consejo de Cuenca Río Papaloapan, instalado el 16 de junio de 2000. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de

veda. En casi la totalidad de su superficie rige el “Decreto que declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Acuacultura Número Dos Cuenca del Papaloapan para preservar, fomentar y explotar las especies acuáticas, animales y vegetales, así como para facilitar la producción de sales y minerales”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de agosto de 1973. Esta veda es tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En una pequeña área de los extremos norte y noroccidental, está en vigor el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende la cuenca del Río Jamapa, cuya extensión y límites geopolíticos corresponden a los municipios de Veracruz, Boca del Río y otros, en el estado de Veracruz”, publicado en el DOF el 15 de julio de 1970. 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.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. Los usuarios se encuentran organizados y constituidos en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Los Naranjos, instalado el 23 de junio de 2006. En el territorio que cubre el acuífero se localiza el Distrito de Riego 082 Río Blanco. En su porción oriental, en el límite con el acuífero Costera del Papaloapan, se ubica el sitio RAMSAR denominado Sistema Lagunar Alvarado, considerado como tal desde el 2 de febrero de 2004.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LA ZONA DE LOS NARANJOS, ESTADO DE VERACRUZ. Realizado en 1973 por Ingeniería y Geotecnia, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). El estudio tuvo como objetivo evaluar el acuífero para definir la posibilidad de aprovechar el agua subterránea, junto con el agua superficial, para la creación de un distrito de riego. Entre sus actividades relevantes destacan el censo e hidrometría de las extracciones, ejecución de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos, perforación de pozos exploratorios, muestreo de aguas para análisis químicos y balance de aguas subterráneas. Define un área para la explotación del agua subterránea, calcula una recarga media anual de 500 hm³ y recomienda extraer 350 a 400 hm³

anuales, conservando el flujo natural hacia el mar, para mantener la posición de la interfase marina.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO COMPLETO EN LA ZONA DE LOS NARANJOS, ESTADO DE VERACRUZ. Realizado en 1974-1975 por Ingeniería y Geotecnia, S. A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Su objetivo fue evaluar el potencial de agua subterránea de la zona, definir la explotación más adecuada mediante pozos y pronosticar sus efectos. Realiza censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, nivelación de brocales de pozos, ejecución de sondeos geofísicos y pruebas de bombeo, muestreo de agua para análisis químicos, uso de isótopos y perforación de pozos. Concluye que el potencial del acuífero, basado únicamente en su descarga hacia el mar, era de 96 hm³ anuales, pero mayor si se considera el flujo base que se evaluó en 1168 hm³ anuales. Recomienda extraer 100 hm³ anuales sin causar efectos perjudiciales.

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

ELABORACIÓN DEL ESTUDIO DE LA TERCERA Y ÚLTIMA ETAPA PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CAPTACIONES DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA EL ACUÍFERO LOS NARANJOS EN EL ESTADO DE VERACRUZ. Realizado en 2008, 2009 y 2014 por el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero del Valle de Tehuacán Los Naranjos, A.C. Contiene información del censo de los aprovechamientos más importantes del agua subterránea en el acuífero y la cuantificación de sus volúmenes de extracción.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincias fisiográficas

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Planicie Costera del Golfo de México. Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del INEGI, se localiza en Provincia la Fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur; Subprovincia Llanura Costera Veracruzana.

La Provincia Llanura Costera del Golfo, abarca la mayor parte del estado y se caracteriza por la presencia de dos cuencas sedimentarias donde se depositaron rocas del Paleógeno-Neógeno, formadas principalmente por lutitas y areniscas, cuyas características litológicas varían de acuerdo al ambiente de depósito que varían desde continental (deltas y barras) hasta marino somero. Presenta una morfología variada en la que predomina el relieve de superficies planas, inclinadas al oriente, originadas por la acumulación fluvial y marina; también existen superficies onduladas, formadas por una erosión diferencial; localmente se levantan grandes montañas, como la sierra de Tamaulipas, que limita la zona de estudio al occidente y al poniente por el frente montañoso de la Sierra Madre Oriental. Las planicies que se extienden transversalmente hasta las inmediaciones de la Sierra Madre Oriental están constituidas por lomeríos, superficies onduladas y estratos ligeramente inclinados al oriente, de acuerdo al buzamiento de las capas de roca. Las elevaciones menores locales corresponden, por lo general, a las crestas de los anticlinales que están coronados por remanentes de erosión en donde afloran los conglomerados recientes. La fisiografía de la llanura costera es interrumpida por grandes elevaciones cuyas secciones casi circulares cubren superficies de 1,500 km² en la zona occidental de la provincia y unos 2,000 km² en la porción oriental, formándose entre ellas el Lago de Catemaco.

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

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima que predomina en la superficie del acuífero es de tipo cálido subhúmedo, con las siguientes tres variantes: A $w_0(w)$ que se registra en las zonas más próximas a la costa, el más seco de este tipo. A $w_1(w)$, se presenta en la porción oriental de la región, con

humedad intermedia dentro de este tipo y el clima A $w_2(w)$ que se registra también en la porción oriental y próxima a la costa, el más húmedo dentro de este tipo. Todas las variantes presentan un régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvias invernales entre 5 y 10.2% del total anual, con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frío mayor de 18 °C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm y la relación entre precipitación y temperatura (P/T) entre 43.2 y 55.3.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 11 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie del acuífero, que contienen registros para diferentes periodos. Con estos datos, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **1497.7 mm, 25.8 °C y 1511.2 mm**, respectivamente, representativos del acuífero.

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

3.3. Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH) RH-28 "Papaloapan", Subregión Hidrológica y Cuenca Río Papaloapan, que está integrada por las cuencas de los ríos Papaloapan y Jamapa; colinda al norte con la cuenca del río Nautla, al este con el Golfo de México y la cuenca del río Coatzacoalcos, al sur con la cuenca del río Alto Verde y al oeste con la cuenca del río Atoyac. Abarca una amplia superficie de 57,272 km² del territorio de los estados de Veracruz (28,166 km²), Oaxaca (23,482 km²) y Puebla (5,654 km²).

En la zona de Los Naranjos debido a la abundante lluvia, se ha desarrollado un importante drenaje superficial, representado por siete ríos principales, además de sus numerosos afluentes. La dirección general de ellos es oeste-este, desde las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, hasta su desembocadura en el Golfo de México. De norte a sur, estos ríos son el río Blanco y sus afluentes Otapa, Moreno, Estanzuela y Hondo, el río Tonto y el río Papaloapan. Los ríos Otapa, Estanzuela y Hondo, forman parte del sistema lagunar del río Papaloapan.

El río Blanco se localiza en la porción norte, es uno de los más importantes que cruza el acuífero. Nace en la sierra de Zongolica y en las faldas del Pico de Orizaba; en sus márgenes se ubican las ciudades de Córdoba y Orizaba. En la última parte de su trayecto, después del cruce con la vía el ferrocarril, se bifurca, aunque ambas corrientes descargan finalmente en la Laguna de Alvarado. Su ramal derecho se conoce con el nombre de Río de Las Pozas, que en su margen derecha recibe las aportaciones de los ríos Otapa, Moreno, Estanzuela y Hondo, éste último afluente del Estanzuela; su ramal izquierdo conserva el nombre de río Blanco. Los cuatro ríos nacen en la planicie costera, desembocan en el río de Las Pozas, que finalmente desemboca a la Laguna de Alvarado y al Golfo de México.

El río Tonto nace en las estribaciones de la Sierra Mazateca, y es el afluente más importante del río Papaloapan por su margen izquierda. Toma su nombre a partir de la presa Miguel Alemán, siguiendo un rumbo al noreste hasta el poblado Las Margaritas, donde cambia de dirección al sureste, hasta unirse con el río Papaloapan por su margen izquierda. Sus escurrimientos son de gran importancia a pesar de su pequeña cuenca de captación, debido a la alta precipitación que en ella ocurre. En el sitio denominado Temascal se localiza la presa Miguel Alemán, que tiene una capacidad de almacenamiento de 9,800 Mm³, construida principalmente para la generación de electricidad y para el control de avenidas. En su desarrollo aguas abajo recibe las aportaciones de sus tributarios: los arroyos de Enmedio, Chichicazapa y río Amapa, todos por su margen izquierda, para finalmente verter sus aguas en el cauce del Río Papaloapan. Los afluentes del río Tonto nacen en la planicie costera, escurriendo con dirección general NW-SE, en la porción sur del área.

El río Papaloapan es una de las corrientes superficiales más importantes del país, ya que su escurrimiento medio anual es de 47,000 hm³, con una cuenca de aproximadamente 46,000 km², donde se desarrollan los numerosos afluentes que lo alimentan. Desemboca directamente en la Laguna de Alvarado y finalmente en el Golfo de México.

En el área del acuífero, no existen presas de almacenamiento; sin embargo, al suroeste se ubican las presas Miguel Alemán (Temascal) y Miguel de la Madrid Hurtado (Cerro de Oro). En la porción norte, se localiza el Distrito de Riego Río Blanco, en donde existe un sistema de canales que conducen y distribuyen las aguas que se derivan del río Blanco.

3.4. Geomorfología

Las formas del terreno que adoptan los materiales que afloran en la región presentan características diferentes, determinadas por la calidad de las rocas y de

los suelos que las constituye. Se pueden distinguir tres tipos de formas del relieve: Llanura aluvial, lomeríos de materiales volcánicos y gravas arcillosas, y montañas de calizas.

La llanura aluvial corresponde a la parte topográficamente más baja, tiene características morfológicas de llanura, con ligera inclinación hacia el oriente y con tendencia a inundarse. Presenta zonas tanto arenosas como arcillosas, dispuestas con una estructura homogénea con variaciones horizontales y verticales, superficialmente la cobertura es limo-arenosa, tobácea y de gravas arcillosas, con un espesor de 0.5 a 1.0 m. El arreglo de los escurrimientos superficiales es arborescente escaso, con cauces divagantes y de escurrimiento permanente; existen también cauces abandonados y zonas en donde prácticamente no hay drenaje, como es el caso de la parte baja localizada al oriente, donde los materiales de cobertura son arcillosos y de poca pendiente, área que corresponde a la zona inundable próxima a la Laguna de Alvarado. En la llanura se producen infiltraciones a lo largo del cauce de los ríos, que en temporada de estiaje sirven como drenes de los acuíferos.

Los lomeríos se ubican a lo largo del frente de la Sierra Madre Oriental y a lo largo del Río Blanco. Están constituidos en la porción noroccidental de materiales volcánicos y en la región sur por gravas arcillosas. Los lomeríos de materiales volcánicos ocupan una extensión muy grande y están constituidos por aglomerados y tobas, cuyas características se muestran como una sucesión de mesetas pequeñas, alargadas y paralelas, que son el resultado de la acción erosiva de arroyos cuyos cauces con paralelos, profundos y con cierta sinuosidad. Al oriente los lomeríos cambian gradualmente a formar llanuras, donde el material tiende a ser de naturaleza tobácea. Presentan cobertura superficial limo-arcillosa, de 1 a 2 m de espesor, en los que, a pesar de su baja permeabilidad, permiten filtraciones a lo largo del cauce de los arroyos, ya que en ellos afloran aglomerados y arenas volcánicas, principalmente al noroeste de la zona. Los lomeríos de gravas arcillosas ocupan una extensión menor que los lomeríos volcánicos, presentan características morfológicas de lomas redondeadas, separadas por pequeños arroyos que tiene un arreglo dendrítico denso; su cobertura superficial es de tipo arcilloso, de más de 2 m de espesor y dada su naturaleza poco permeable, no permite la infiltración.

Las montañas de caliza se localizan en la porción occidental de la zona y forman parte de la Sierra Madre Oriental, que es el límite de la cuenca de sedimentación terciaria. Tienen características morfológicas de montañas paralelas, plegadas y alargadas, con orientación NW-SE y con elevaciones medias de 500 msnm. Su característica más notable es la presencia de un desarrollo avanzado de carst, con

abundantes cavidades de disolución; eventualmente presenta algunos arroyos de fuerte pendiente con arreglo dendrítico. En algunas zonas presentan una cobertura intemperizada de material limo-arcilloso, de 0.5 a 1.0 m de espesor. Por estar plegadas, fracturadas y con cavidades de disolución, propician la infiltración y permiten la circulación del agua subterránea, que es evidente por la presencia de manantiales al pie de las montañas.

4. GEOLOGÍA

La superficie cubierta por el acuífero está comprendida en la Provincia Geológica Cuenca Terciaria de Veracruz, en el límite con la Provincia Sierra Madre Oriental, que se caracteriza por la presencia de depósitos de lutitas y areniscas con influencia calcárea desde el Paleoceno hasta el Oligoceno y por depósitos volcánicos durante todo el Mioceno, Plioceno y Pleistoceno. Este es el sistema al que corresponden a los depósitos más importantes que se observan en la zona.

Hacia el límite occidental de la Cuenca Terciaria de Veracruz se desarrollan estructuras en rocas sedimentarias de diferentes tipos de calizas, algunas de ellas con intenso desarrollo cárstico. Estas rocas se observan ampliamente en la zona localizada en los alrededores de las poblaciones Atoyac y Cuitláhuac, en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental; mientras que, en la porción de la Cuenca Terciaria de Veracruz, están cubiertas por unidades sedimentarias del Paleógeno-Neógeno.

Las unidades del Cretácico Superior son las más antiguas de la zona y se caracterizan por el desarrollo de una plataforma interna íntimamente relacionada con la Sierra Madre Oriental; esta facies de plataforma está representada por calizas masivas de la Formación Orizaba del Albiano-Cenomaniano, calizas con intercalaciones delgadas de lutitas arenosas de la Formación Maltrata del Turoniano, así como calizas con nódulos de pedernal que constituyen la Formación Guzmantla del Turoniano-Santoniano. Cubriendo tanto a las facies de cuenca de la Sierra Madre Oriental como a las facies de plataforma de la cuenca de Zongolica, afloran margas y lutitas con horizontes de areniscas y bentonitas del Campaniano-Maastrichtiano de la Formación Méndez.

Del Terciario de la Cuenca de Veracruz sólo aflora la Formación Velasco, constituida por lutitas y margas, y la Formación Concepción formada principalmente por areniscas mal cementadas y conglomerados constituidos por fragmentos calcáreos.

En la superficie que cubre el acuífero no existen afloramientos rocosos, con excepción de la porción occidental. De esta forma, su entorno geológico se limita

a la caracterización del patrón sedimentológico de los materiales granulares que se distribuyen en la extensa planicie aluvial que caracteriza la región, el cual está directamente relacionado con la evolución del cauce del Río Papaloapan, en el que la acumulación, distribución y tipo de materiales sedimentados está gobernado por la energía de su corriente y la migración espacial de sus canales tributarios.

4.1. Estratigrafía

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

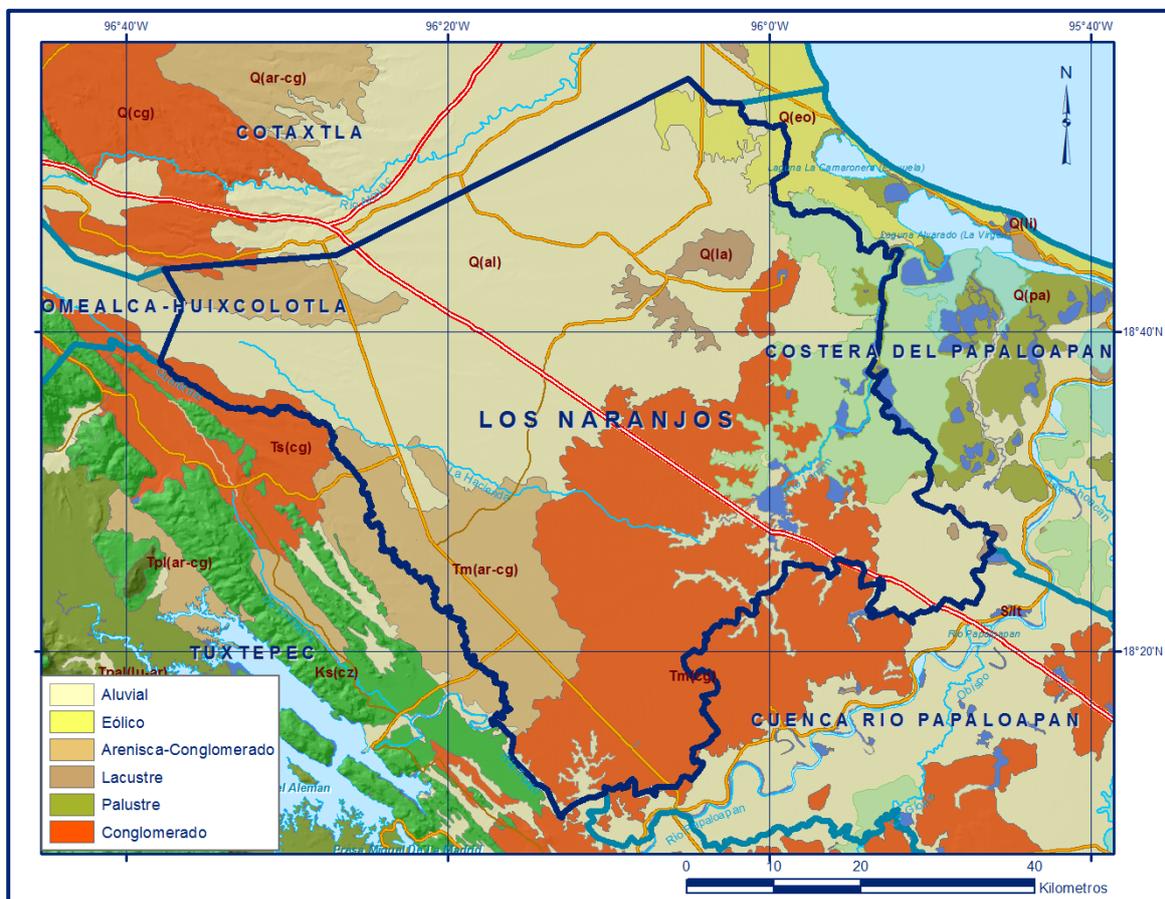


Figura 2. Geología general del acuífero

JURÁSICO SUPERIOR

Formación Chimaneca

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

CRETÁCICO SUPERIOR

La secuencia de rocas del Cretácico Superior de la Sierra Madre Oriental, que conforman las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez, son compartidas parcialmente con la Cuenca de Zongolica, que se caracteriza por el desarrollo de una plataforma interna íntimamente relacionada con la cuenca de la Sierra Madre Oriental. Esta facies de plataforma está representada por las formaciones Orizaba, Maltrata y Guzmantla.

Formación Orizaba

Está conformada por calizas de tipo arrecifal con abundante fauna bentónica, que representan un cambio de facies de cuenca de la Formación Tamaulipas Superior. Por lo general, se presenta en forma masiva y únicamente en las zonas de transición o cambio de facies se encuentra estratificada; forma grandes bancos con abundantes fragmentos de mega fósiles tales como capríidos, gasterópodos (turritelas y nerineas), corales y fragmentos de pelecípodo. Por su microfauna, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Por su naturaleza arrecifal es relativamente fácil distinguir estas rocas de aquellas del Aptiano y Turoniano.

Formación Maltrata

En el área del acuífero está representada por una caliza arcillosa de colores gris oscuro y pardo claro, dispuesta en capas delgadas a medianas que varían de 15 a 40 cm de espesor, con intercalaciones muy delgadas de margas y lutitas arenosas de color gris y gris verdoso, esta última con abundantes ramaleos de calcita y delgadas películas de arcilla roja. Contiene fósiles de radiolarios calcificados, *Globotruncana sp.* y fragmentos de otros foraminíferos mal conservados no identificables, que permiten asignarle una edad correspondiente al Cretácico Superior. Está cubierta concordantemente por los sedimentos de la Formación Agua Nueva y cubre a su vez, del mismo modo, a las calizas de la Formación Orizaba. Se presenta en cambio de facies con los sedimentos de las formaciones Agua Nueva y Guzmantla.

Formación Guzmantla

Está representada en el área por una calcarenita biógena, de color pardo a crema, dispuesta en capas potentes, alteradas por disolución y cubiertas por gruesas capas de caliche que la enmascaran en superficie y que se encuentran parcialmente recristalizadas. Su clasificación de campo varía de mudstone a capas de packstone y grainstone. El espesor de las capas varía de 0.4 a 2.2 m, en algunas localidades se aprecian capas de caliza clástica y conglomerática y algunos estratos de pedernal. Su contacto inferior con la Formación Orizaba es transicional, mientras que su contacto superior no es se observa. Es correlacionable con las formaciones Agua Nueva y Maltrata, y al igual que la

Formación Orizaba presenta buenas características de porosidad primaria y secundaria, lo que la hace importante como receptora de fluidos.

TERCIARIO

Grupo Chicontepec

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

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

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.

NEÓGENO

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

Discordantemente a la secuencia del Grupo Chicontepec, se depositó una secuencia de lutitas, tobas y areniscas que constituyen la **Formación Depósito**, de edad Mioceno Inferior. Sobreyace la **Formación Encanto** constituida por una alternancia de lutitas y areniscas, sobre las cuales se depositó en forma concordante la **Formación Concepción** de edad Mioceno Superior, constituida por areniscas y lutitas. Sobreyaciendo concordantemente, aflora la **Formación Filisola** constituida por arenas y lutitas, sobre la cual se depositó un conglomerado polimíctico y areniscas que constituyen la **Formación Jaltepec**, considerada de edad Plioceno. La Formación Filisola también es cubierta transicionalmente por la **Formación Paraje Solo** de edad Plioceno, constituida por areniscas y lutitas; que a su vez es sobreyacida concordantemente por la **Formación Cedral** de edad Plioceno-Pleistoceno, la cual está conformada por areniscas y conglomerado polimíctico. Las tres últimas formaciones tienen también una relación de cambios laterales de facies.

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

Depósitos Eólicos

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

4.2. Geología estructural

Los rasgos estructurales que se observan en la región central y oriental del territorio del acuífero están representados por una planicie volcánico-fluvial orientada en sentido noroeste-sureste, con una inclinación suave hacia el oriente. Está presente un patrón tectónico asociado a un sistema de fracturamiento orientado noreste-suroeste, por donde escurren los principales ríos y arroyos de la zona. En las zonas de afloramiento de rocas carbonatadas del Cretácico, se presenta un sistema de sinclinales y anticlinales orientados preferentemente en sentido noroeste-sureste, así como diversos sistemas locales de fallas y fracturas que gobiernan el patrón de escurrimiento superficial, que contribuyen además a la formación de sistemas de flujo subterráneo propios de un ambiente cárstico, ya que se observan dolinas y otros rasgos de disolución de las calizas. La compresión de la Orogenia Laramide actuó en sentido SW-NE, levantando, fallando y deformando la secuencia mesozoica, generando condiciones para el desarrollo de las cuencas terrígenas terciarias de Tampico-Misantla y Veracruz (Carta Geológico-Minera Veracruz E14-3, escala 1:250,000. SGM, 2002).

La presencia de aparatos volcánicos dentro del territorio del acuífero se ha considerado como producto de una fase distensiva que adelgazó la corteza y provocó el ascenso de los magmas básicos sobre zonas de debilidad. Así, la zona está formada por estructuras volcánicas antiguas y recientes orientadas en una dirección NW-SE, que puede corresponder con una zona de fracturamiento profundo, que tiene forma de conos truncados cuyos derrames tienen inclinaciones entre 5° y 10° hacia el sur. No se distinguen rasgos estructurales que

puedan evidenciar los procesos estructurales que moldearon la superficie del acuífero, sin embargo, la interpretación geológica del subsuelo hace suponer que los sedimentos paleógeno-neógenos presentan sistemas de fallamiento que favorecieron el ascenso del magma.

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

4.3. Geología del subsuelo

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

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos y arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, lacustres, vulcanoclásticos, areniscas y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen decenas de metros de espesor.

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

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 de los ríos y arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, vulcanoclásticos y conglomerados que conforman la planicie costera. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas principalmente sedimentarias y volcánicas, entre las que destacan intercalaciones de areniscas, lutitas, calizas y tobas, 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.

5.2. Parámetros hidráulicos

En los estudios realizados en 1973 y 1975 (SRH) se llevaron a cabo pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, algunas de ellas con pozo de observación. Adicionalmente existen pruebas de bombeo en los acuíferos vecinos Cotaxtla y Sierra de San Andrés Tuxtla, que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica. Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales reportaron valores de transmisividad que varían en un rango muy amplio de **9.8×10^{-4} a $60.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (84.7 a 5184 $\text{m}^2/\text{día}$)**.

Los valores de conductividad hidráulica varían de **0.6 a 34.6 m/d (6.5×10^{-6} a $4.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$)**, considerando un espesor saturado promedio de 150 m. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos, o a zonas de mayor espesor saturado.

En cuanto a los valores del coeficiente de almacenamiento, los valores deducidos de las pruebas de bombeo varían de **0.094 a 4.4×10^{-6} y de 0.1 a 0.01** para el rendimiento específico, que deben ser considerados con cierta reserva debido al escaso número de pruebas con pozos de observación y a su corta duración.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2005 además de registros históricos durante el periodo 2003-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2014-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2019.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 3 a 30 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la planicie costera y del cauce de los ríos Tonto y Limón hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, de 3 a 5 m, se registran en la porción oriental y sur del acuífero, en el límite con el acuífero Cuenca Río Papaloapan, entre las poblaciones Rincón Caliente, Cosamaloapan, Miguel Alemán y Tres Valles; en tanto que las mayores profundidades, de 20 a 30 m, se presentan en la región occidental, hacia el límite con el acuífero Omealca-Huixcolotla (figura 3).

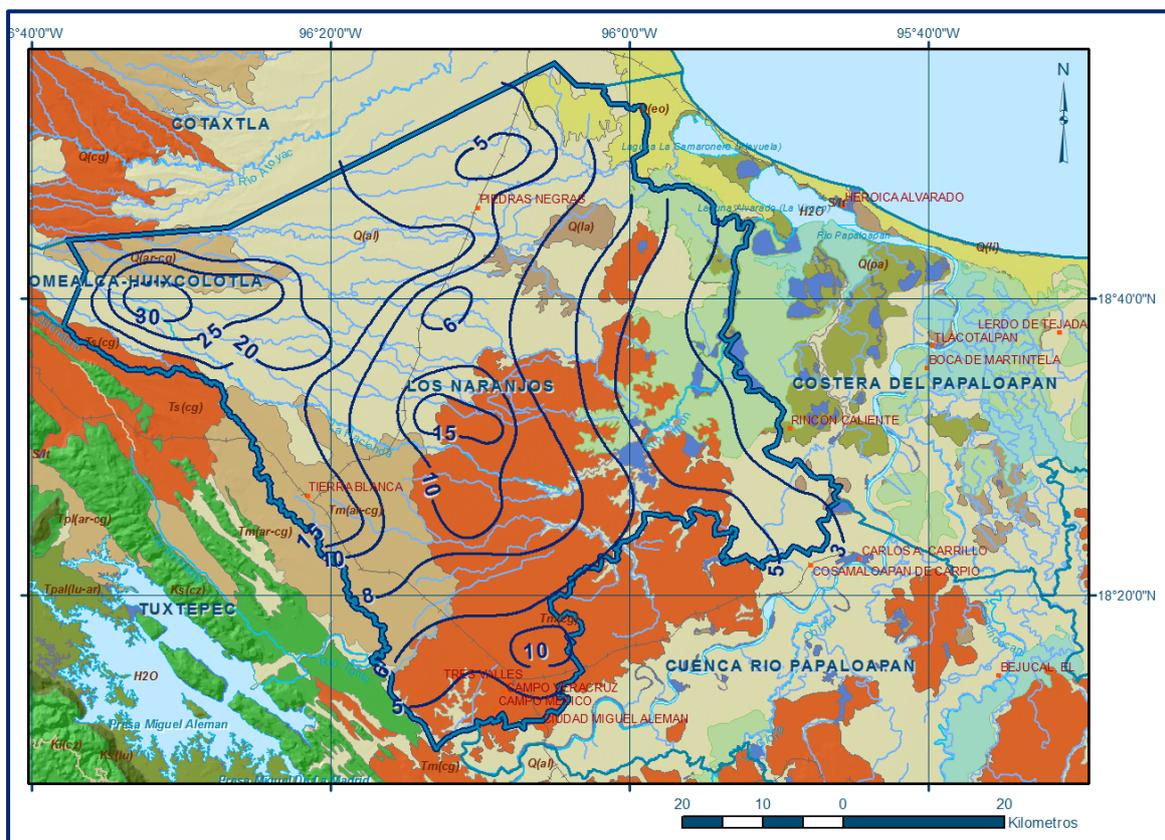


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2019)

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 130 msnm, que se incrementan de la planicie costera y del cauce de los ríos Tonto y Limón hacia el oeste, en dirección a los flancos de las sierras que delimitan el acuífero. Los valores más altos de carga hidráulica, 100 a 130 msnm, se registran en la porción occidental del acuífero, hacia el límite con el acuífero Omealca-Huixcolotla, desde donde descienden gradualmente hacia el este por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia el sistema lagunar y la planicie costera del río Papaloapan. Los

valores más bajos, de 1 a 10 msnm, se presentan en el extremo oriental, hacia la planicie costera, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo oeste-este. Las zonas de recarga se localizan en las sierras calizas que constituyen el límite con la Sierra Madre Oriental (figura 4).

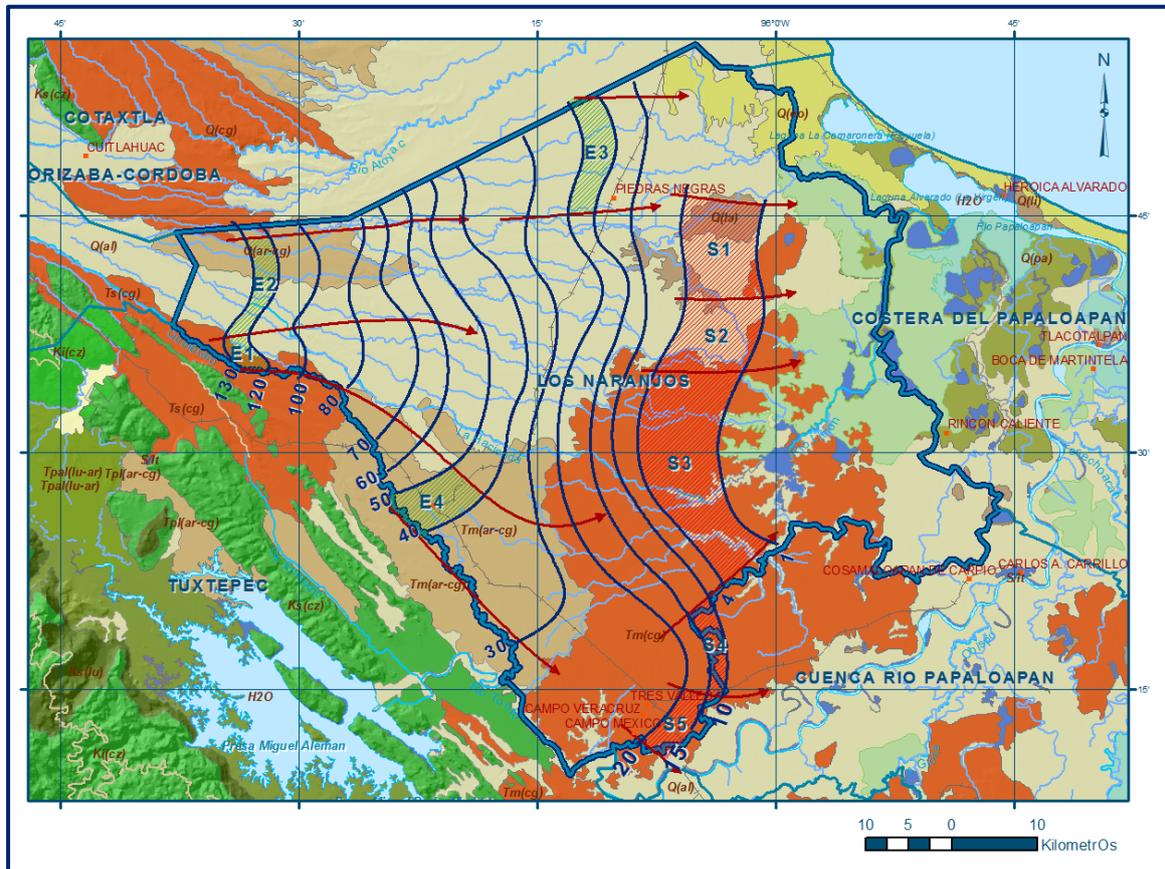


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2014-2019 registró valores tanto de recuperación como de abatimiento. Los primeros varían de 1 a 3 m, es decir de 0.2 a 0.6 m anuales, con valores puntuales de 5 m, y se registran al sureste de Tierra Blanca y suroeste de Piedras Negras. Los abatimientos varían de 1 a 2 m, que representan 0.2 a 0.4 m anuales, y se registraron de manera aislada en diversas zonas del acuífero, principalmente al noroeste de Tierra Blanca y al suroeste de Piedras Negras. En la mayor parte de la zona de explotación los niveles del agua subterránea no presentan variaciones importantes en su posición (figura 5).

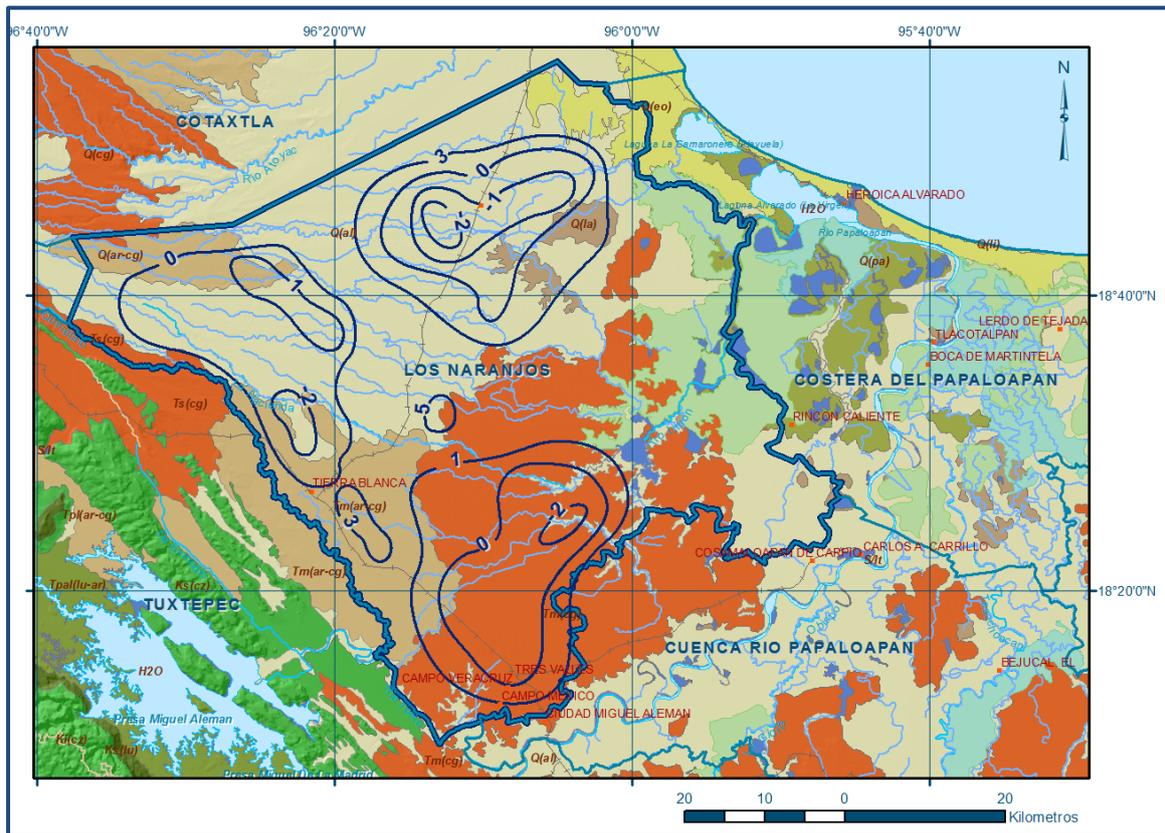


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2014-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2005, se tomaron 14 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, iones mayoritarios, sólidos totales disueltos (STD), hierro, manganeso, nitratos y análisis bacteriológicos.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos presenta valores que varían de 130 a 370 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 ppm establecido en la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para el agua destinada al consumo humano. 4 muestras presentaron concentraciones de fierro que sobrepasan el LMP de 0.3 mg/l que establece la norma mencionada y en 6 muestras se excede el LMP de 0.15 mg/l en la concentración de manganeso.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce, de acuerdo con el criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 220 a 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad baja (C_i) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_i), 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-sódica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas calizas y volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos de los años 2008, 2009 y 2014, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Norte, se registró la existencia de 815 aprovechamientos más importantes del agua subterránea, ya que de acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDRA), existen 10,750 aprovechamientos, la gran mayoría norias: 2755 son para uso agrícola, 7650 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 179 para uso doméstico-pecuario, 33 para servicios, 7 para uso industrial y 6 para acuacultura.

El volumen de extracción estimado es de **433.3 hm³ anuales**, de los cuales 418.1 hm³ (96.5%) son para uso agrícola, 9.6 hm³ (2.2%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades, 3.5 hm³ (0.8%) para uso doméstico-pecuario, 1.0 hm³ (0.2%) para servicios, 0.6 hm³ (0.2%) para uso industrial y 0.5 hm³ (0.1%) para acuacultura.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2014-2019, en un área de balance de **3,733 km²**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

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

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento en el acuífero:

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

7.1. Entradas

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

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Debido a que el volumen de agua subterránea para uso público-urbano es pequeño, sólo se considera la recarga incidental debido a los retornos del riego agrícola.

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

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

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

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

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 4. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

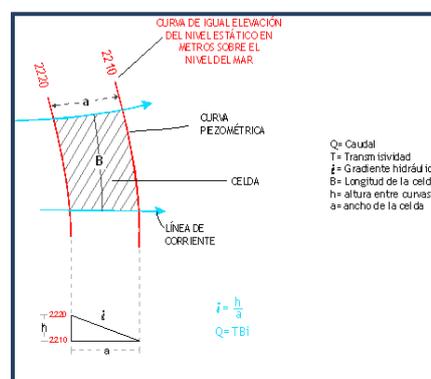
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **77.2 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	4615	2845	10	0.0035	0.0200	0.3244	10.2
E2	12320	2660	10	0.0038	0.0250	1.1579	36.5
E3	13385	3620	5	0.0014	0.0350	0.6471	20.4
E4	8620	5380	10	0.0019	0.0200	0.3204	10.1
TOTAL						77.2	

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 (R_i)

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

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se considera que el 30% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo. De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 780.1 hm³, de los cuales 362.0 hm³ son de agua superficial procedente de los ríos Blanco y Otapa (presas derivadoras Camello y Otapa); y 418.1 hm³ de agua subterránea, al aplicar el 30% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 234.0 hm³. Por tanto, **Ri = 234.0 hm³ anuales.**

7.2. Salidas

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

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **433.3 hm³ anuales.**

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 4, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **16.0 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	11410	8280	3	0.0004	0.0050	0.0207	0.7
S2	8750	8960	3	0.0003	0.0080	0.0234	0.7
S3	24550	8620	3	0.0003	0.0100	0.0854	2.7
S4	10990	2260	5	0.0022	0.0100	0.2431	7.7
S5	8295	3100	5	0.0016	0.0100	0.1338	4.2
TOTAL							16.0

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.

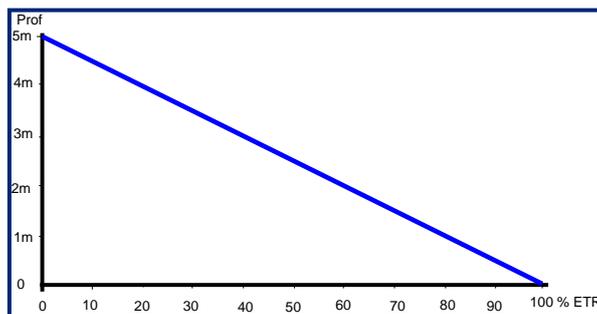
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 25.8 °C y 1,497.7 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 1,187.9 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

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

T (°C) =	25.8		
P(mm) =	1497.7	P ² =	2243105.29
L =	1803.6756	L ² =	3253245.67
ETR (mm)	1187.9		

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 = 181.2 hm³/año**.

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
3	3	146.7	1.1879	5	0.4	69.7
5 a 3	4	412.2	1.1879	5	0.2	97.9
4.5	4.5	113.9	1.1879	5	0.1	13.5
Total		672.8				181.2

7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información de la estación hidrométrica Camello, proporcionada por el Organismo de Cuenca Golfo Centro, el Río Blanco presentó un caudal estimado de 25.96 m³/s de flujo base, en el estiaje del periodo 1965-2007, que representan un volumen de 818.7 hm³ anuales. Por lo tanto, **Dfb = 818.7 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2014-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.06$ para las areniscas y 0.1 para los depósitos aluviales y conglomerados se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -16.1 hm³, es decir, un promedio anual de **-3.2 hm³**.

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

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-2	-2.0	18	0.1	-3.6
-1 a -2	-1.5	98	0.1	-14.6
0 a -1	-0.5	178	0.1	-8.9
3 a 0	1.5	261	0.1	39.2
5	5.0	13	0.1	6.5
3	3.0	29	0.06	5.1
-2	-2.0	26	0.1	-5.2
-1	-1.0	58	0.1	-5.8
0 a -1	-0.5	381	0.1	-19.1
-2	-2.0	15	0.06	-1.8
0 a -2	-1.0	287	0.06	-17.2
1 a 0	0.5	308	0.06	9.3
	TOTAL	1671.5	TOTAL	-16.1
Promedio anual				-3.2

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:

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

$$R_v = 16.0 + 433.3 + 818.7 + 181.2 - 77.2 - 234.0 - 3.2$$

$$R_v = 1134.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 1134.8 + 77.2 + 234.0$$

$$R = 1446.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **1446.0 hm³/año**, de los cuales 1212.0 hm³ son recarga natural y 234.0 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 Los Naranjos, su valor es **834.7 hm³ anuales**, de los cuales 16.0 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia los acuíferos vecinos Cuenca de Río Papaloapan y Costera del Papaloapan y 818.7hm³ al flujo base del Río Blanco. No se considera comprometida la evapotranspiración porque es alimentada por los escurrimientos superficiales, el flujo base y las salidas subterráneas. Por lo tanto, **DNC = 834.7hm³ anuales**.

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **493,726,362 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 1446.0 - 834.7 - 493.726362 \\ \text{DMA} &= 117.573638 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **117,573,638 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Los Naranjos, estado de Veracruz.

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

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

Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Acuífero Los Naranjos, A.C., 2008,2009 y2014. Elaboración del estudio de la tercera y última etapa para la actualización de la Información de captaciones del agua subterránea ara el acuífero Los Naranjos, en el estado de Veracruz.

Secretaría y Recursos Hidráulicos (SRH), 1973. Estudio geohidrológico en la zona de Los Naranjos, estado de Veracruz, realizado por Ingeniería y Geotecnia, S.A.

Secretaría y Recursos Hidráulicos (SRH), 1974-1975. Estudio geohidrológico completo en la zona de Los Naranjos, estado de Veracruz, realizado por Ingeniería y Geotecnia, S.A.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológica-Minera E14-3 "Veracruz" Esc. 1:250.000.

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