

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ALDAMA SOTO LA MARINA (2809),
ESTADO DE TAMAULIPAS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	1
	Antecedentes.....	1
1.1	Localización.....	1
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.....	8
3.3	Hidrología superficial	8
3.4	Geomorfología.....	11
4	GEOLOGÍA.....	11
4.1	Estratigrafía.....	13
4.2	Geología estructural	21
4.3	Geología del subsuelo	23
5	HIDROGEOLOGÍA	24
5.1	Tipo de acuífero.....	24
5.2	Parámetros hidráulicos.....	25
5.3	Piezometría	25
5.4	Comportamiento hidráulico.....	25
5.4.1	Profundidad al nivel estático	25
5.4.2	Elevación del nivel estático	27
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	29
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	30
6	CENSOS DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	30
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	31
7.1	Entradas	31
7.1.1	Recarga vertical (Rv)	32
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	33
7.1.3	Retorno de riego (Rr)	33
7.2	Salidas.....	35
7.2.1	Evapotranspiración (ETR)	35
7.2.2	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	36
7.2.3	Bombeo (B)	37
7.2.4	Descarga a través de manantiales (Dm).....	37
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	38
8	DISPONIBILIDAD	38
8.1	Recarga total media anual (R).....	39
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	39
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	39
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	40
9	BIBLIOGRAFÍA	41

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 Aldama-Soto La Marina, definido con la clave 2809 por la Comisión Nacional del Agua se localiza en la porción suroriental del estado de Tamaulipas, entre los paralelos 22° 39' a 24° 30' de latitud norte y los meridianos 98° 40' y 98° 24' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 9,605 km²(figura 1).



Figura Localización el acuífero

Limita al norte con los acuíferos Méndez-San Fernando y Jiménez-Abasolo, al sur con el acuífero Zona Sur, al oeste con el acuífero Victoria-Casas, al suroeste con Llera-Xicoténcatl; todos ellos pertenecientes al estado de Tamaulipas; al este su límite natural es el Golfo de México.

Geopolíticamente, comprende casi la totalidad de los municipios Aldama y Soto La Marina, así como pequeñas porciones de Abasolo, Altamira, Casas y San Fernando. 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

ACUÍFERO 2809 ALDAMA-SOTO LA MARINA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	50	39.7	22	39	39.6	
2	97	57	19.6	22	41	1.5	
3	98	0	0.6	22	39	35.6	
4	98	2	41.6	22	40	36.4	
5	98	4	5.0	22	44	20.0	
6	98	9	49.4	22	43	37.2	
7	98	12	43.9	22	45	40.0	
8	98	15	51.3	22	50	32.1	
9	98	14	11.8	23	2	16.6	
10	98	15	26.2	23	7	20.9	
11	98	15	14.5	23	12	6.5	
12	98	16	45.6	23	14	53.3	
13	98	22	32.9	23	14	48.1	
14	98	23	48.6	23	16	45.0	
15	98	20	29.1	23	17	38.3	
16	98	23	57.2	23	25	41.4	
17	98	23	45.1	23	32	20.3	
18	98	20	38.7	23	37	26.2	
19	98	21	30.4	23	42	4.2	
20	98	18	57.0	23	46	12.9	
21	98	23	0.3	23	51	41.1	
22	98	23	55.4	23	56	32.2	
23	98	21	1.7	23	57	26.1	
24	98	16	32.3	23	57	22.7	
25	98	12	2.0	23	58	37.8	
26	98	9	21.7	24	5	49.0	
27	98	6	20.6	24	7	40.8	
28	98	1	37.9	24	6	24.8	
29	97	59	13.6	24	8	47.3	
30	98	0	33.9	24	15	22.9	
31	97	57	38.5	24	16	40.8	
32	97	57	46.1	24	19	40.8	
33	98	0	27.8	24	22	9.5	
34	97	55	59.3	24	23	28.7	
35	97	50	5.3	24	25	55.7	
36	97	40	37.4	24	29	57.2	DEL 36 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	97	50	39.7	22	39	39.6	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Aldama-Soto La Marina, pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Norte y al Consejo de Cuenca Río San Fernando-Soto La Marina, instalado el 26 de agosto de 1999. El acuífero se encuentra parcialmente vedado, sólo una pequeña porción de su extremo oriental está sujeta a las disposiciones del “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende los Municipios de Madero, Villagrán, San Carlos y otros del Estado de Tamaulipas”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 10 de febrero de 1964. Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

En la mayor parte de su superficie no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Aldama-Soto La Marina, clave 2809, 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 con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

El usuario principal del agua es el público-urbano. En una pequeña porción de su extremo noroccidental se localiza parte del Distrito de Riego 086 “Río Soto La Marina”. A la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el territorio que cubre el acuífero y sus alrededores se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación con el objetivo principal de conocer su geometría, disponibilidad, condición de explotación y la calidad del agua subterránea.

A continuación, se mencionan los más importantes en orden cronológico.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA Y EVALUACIÓN DE ACUÍFEROS EN DIVERSAS ZONAS DEL ESTADO DE TAMAULIPAS, 1980; Consultores, S. A., elaborado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Incluye actividades de censo e hidrometría, muestreo de agua subterránea para análisis químicos y sondeos geofísicos.

Concluye que el agua en las captaciones con profundidades mayores de 50 m, es en general de mala calidad ya que las concentraciones de sólidos totales disueltos son mayores de 1000 ppm, alcanzando valores de 11,000 ppm en algunas áreas. Los caudales específicos obtenidos, menores de 1 lps/m, reflejan la baja permeabilidad de los sedimentos que conforman el acuífero.

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DEL ACUÍFERO LLERA-XICOTÉNCATL, Elaborado por FYA Consultores, Ingeniería y Construcción, S.A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Golfo Norte en 2003.

El objetivo de este estudio fue actualizar la información piezométrica en la red de pozos piloto. Entre sus actividades incluyó el censo de aprovechamientos y la hidrometría de las extracciones. Con los datos recabados fue posible definir el comportamiento piezométrico del acuífero.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN EL ACUÍFERO VICTORIA-CASAS, EN EL ESTADO DE TAMAULIPAS, 2006. Realizado por Geofísica y Perforaciones del Medio Ambiente, para la Comisión Nacional del Agua. Tuvo como objetivo obtener información piezométrica en una red de pozos piloto que permitieron definir el comportamiento de los niveles piezométricos.

Confirma los caudales bajos de extracción y gastos específicos menores a 2 lps/m, debido a que la gran mayoría de los aprovechamientos son someros y están perforados en depósitos aluviales de granulometría fina y/o lutitas.

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 Provincias Fisiográficas

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, la porción norte en la Subprovincia Fisiográfica Llanura y Costera Tamaulipeca, las regiones noroccidental y centro-sur en la Subprovincia Llanuras y Lomeríos y el extremo occidental en la Discontinuidad Sierra de Tamaulipas.

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 Llanura Costera Tamaulipeca se caracteriza por estar cubierta por sedimentos marinos no consolidados, muy próxima al nivel del mar, y por contar con una superficie donde predominan las llanuras que son inundables hacia la costa y están interrumpidas al oeste por lomeríos.

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.

La provincia contiene las Discontinuidades Fisiográficas de las Sierras de San Carlos y Tamaulipas. La primera, cuyas cimas mayores de 800 msnm y valores máximos de 1,400 msnm, está dominada por calizas del Cretácico fuertemente intrusionadas con rocas ígneas intermedias.

La segunda, es más extensa pero con altitudes semejantes, también se encuentra dominada por calizas intrusionadas por rocas ígneas de composición intermedia.

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 22 estaciones que tienen influencia en la superficie del acuífero: Abasolo, Aldama, Barberena, Cañón del Diablo, Al Apuro, El Carrizal, El Charco Largo, El Chijol, El Mayab, El Nacimiento, La Encarnación, La Esperanza, La Pesca, Las Lajitas, Paso del Aura, Rancho 22 de Diciembre, República Española, Santa Isabel, Santa Juana, Santa María de Los Nogales, Soto La Marina y Tenacitas. De acuerdo con los registros de estas estaciones para el periodo 1970-2009, se determinaron valores promedio anuales de temperatura y precipitación de **23.7 °C** y **880.4 mm**, respectivamente. En cuanto a la evaporación potencial media anual su valor es de **1,300 mm**.

3.3 Hidrología superficial

El territorio que comprende el acuífero está ubicado en la Región Hidrológica 25 “San Fernando-Soto La Marina”, Subregión Hidrológica Río San Fernando, cuenca Río Solo La Marina y Laguna de San Andrés-Laguna Morales, subcuencas Río Soto La Marina, Laguna de San Andrés y Laguna Morales.

La hidrografía regional está integrada por la corriente del Río San Fernando y sus afluentes, Arroyo La Misión, Río Soto La Marina o Purificación, Río Pílon, Río Corona, Arroyo Grande y Río Barberena. Además se debe incluir el embalse de la Presa Vicente Guerrero construida en el Río Soto La Marina a 56 Km al noreste de Cd. Victoria, Tamaulipa.

También la Presa Cerro Prieto comprendida en los poblados de Linares y Hualahuises, pertenecientes al Estado de Nuevo León en la cuenca del Río San Fernando, así como la Laguna Madre situada en el litoral del Golfo de México, desde la desembocadura del Río Soto La Marina hasta el lindero norte de esta región hidrológica.

La Subregión Hidrológica Río Soto La Marina, se ubica al noreste del país, comprende parte de los estados de Nuevo León y Tamaulipas, con una superficie total de 21,475 km², se localiza entre los paralelos 97° 44' 24" y 99° 59' 42" de longitud oeste y los meridianos 23° 10' 28" y 24° 44' 23" de latitud norte.

La superficie que drena es de 21,475 km² de los cuales 3,047 km² (14.2%) corresponden al Estado de Nuevo León y 18,428 km² (85.8%) al Estado de Tamaulipas; tiene como límites: al norte las cuencas del Río San Fernando y Laguna Madre; al sur la Región Hidrológica No. 26 Río Pánuco; cuenca del Río Guayalejo y las cuencas del Río San Rafael o Carrizal y Laguna Morales de la Región Hidrológica 25 San Fernando-Soto La Marina; al oeste la Región Hidrológica No. 37 El Salado y al este el Golfo de México. La Cuenca del Río Soto La Marina se divide en tres zonas:

Soto La Marina 1 Comprende desde la cortina de la Presa Vicente Guerrero hasta la Presa derivadora La Patria es Primero, drena una superficie de 131 km², se ubica entre los paralelos 98° 30' y 98° 40' de longitud oeste y los meridianos 24° 03' y 23° 53' de latitud norte.

Se encuentra delimitada al norte y al sur por las cuencas hidrológicas Area no Aforada y Río Soto La Marina 2; al este por la cuenca hidrológica Río Soto La Marina 2 y al oeste por la cuenca hidrológica Area no Aforada. Este tramo discurre a través del Cañón de Soto La Marina cruzando la Sierra de Tamaulipas, se caracteriza por pequeños escurrimientos de corto desarrollo sin aportaciones significativas, con un desarrollo total de 27 km.

Río Soto La Marina 2 comprende desde la Presa derivadora La Patria es Primero hasta la estación hidrométrica Soto La Marina, drena una superficie de 3,188 km² y geográficamente se ubica entre los paralelos 98° 08' y 98° 46' de longitud oeste y los meridianos 24° 35' y 23° 35' de latitud norte.

Se encuentra delimitada al norte por las cuencas hidrológicas del Río San Fernando y Laguna Madre; al sur por las cuencas hidrológicas Area no Aforada y Río Soto La Marina 3; al este por las cuencas hidrológicas Río Soto La Marina 3 y Laguna Madre y al oeste por las cuencas hidrológicas Río Soto La Marina 1 y Area no Aforada.

Las aportaciones principales en la Cuenca Hidrológica Río Soto La Marina 2, son por su margen izquierda el arroyo El Salado y el Arroyo Flechadores también llamado Arroyo Jiménez o Dren San Manuel, este tramo sirve como dren del Distrito de Riego 086 Río Soto La Marina, y por la margen derecha recibe los arroyos Espadeño, Sacramento y Lagartos; sus aportaciones más importantes provienen de los manantiales La Azufrosa, localizados a 7 km aguas abajo de la cortina de la Presa La Patria es Primero. La corriente principal tiene un desarrollo total de 106 km.

Río Soto La Marina 3 comprende desde las estaciones hidrométricas Soto la Marina y Paso del Aura hasta su desembocadura al Golfo de México, drena una superficie de 1,454 km² y geográficamente se ubica entre los paralelos 97° 44' y 98° 28' de longitud oeste y los meridianos 23° 57' y 23° 33' de latitud norte.

Está delimitada al norte por la cuenca hidrológica de la Laguna Madre; al sur por las cuencas hidrológicas Río Palmas y Laguna Morales; al este por el Golfo de México y al oeste con la cuenca hidrológica Río Soto La Marina 2, con un desarrollo total de 77 km.

El Río Soto La Marina tiene su origen en la vertiente este de la Sierra Madre Oriental, resultado de la confluencia del Río Purificación y del Río Corona. Fluye en dirección este, y luego de cruzar la zona norte de la Sierra de Tamaulipas, atraviesa el cañón Boca de la Iglesia.

En su curso superior, en ciertas zonas, se conoce como Río Blanco y Río Purificación. Luego el río discurre por la llanura costera, recibiendo el aporte del Arroyo Jiménez.

Posteriormente su curso continúa en dirección sur y luego pasa por la localidad Soto La Marina, donde recibe el aporte del Arroyo Las Palmas; finalmente, desemboca en el Golfo de México. Algunos kilómetros antes de su desembocadura, se desarrolla el delta del río que posee dos ensenadas, Las Garzas y del Brito.

3.4 Geomorfología

De acuerdo a los rasgos geomorfológicos presentes en el acuífero, ubicado entre la Sierra Madre Oriental y las estribaciones occidentales de la Sierra de Tamaulipas, la mayor parte de su superficie presenta una morfología caracterizada por 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 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.

Sólo en la porción occidental, en los límites con los acuíferos Victoria-Casas y Llera-Xicoténcatl, se presentan elevaciones mayores de 200 msnm que alcanzan los 800 msnm.

En estas zonas las rocas poco resistentes, como las margas y lutitas, expuestas ampliamente en la zona, son disectadas rápidamente, generando barrancas moderadamente profundas con laderas verticales; los conglomerados ha sido intensamente erosionados, permaneciendo sólo como afloramientos aislados delimitados por valles fluviales.

La red de drenaje presenta un patrón dendrítico en las zonas topográficamente más altas y paralelo en la planicie costera, con desarrollo de meandros en el Río Soto La Marina.

4 GEOLOGÍA

Regionalmente, la zona de estudio se encuentra ubicada en la Subprovincia Geológica llamada Cuenca Tampico-Misantla, la cual se desarrolló durante el Terciario al quedar sumergida la Plataforma de Tamaulipas (Figura 2).

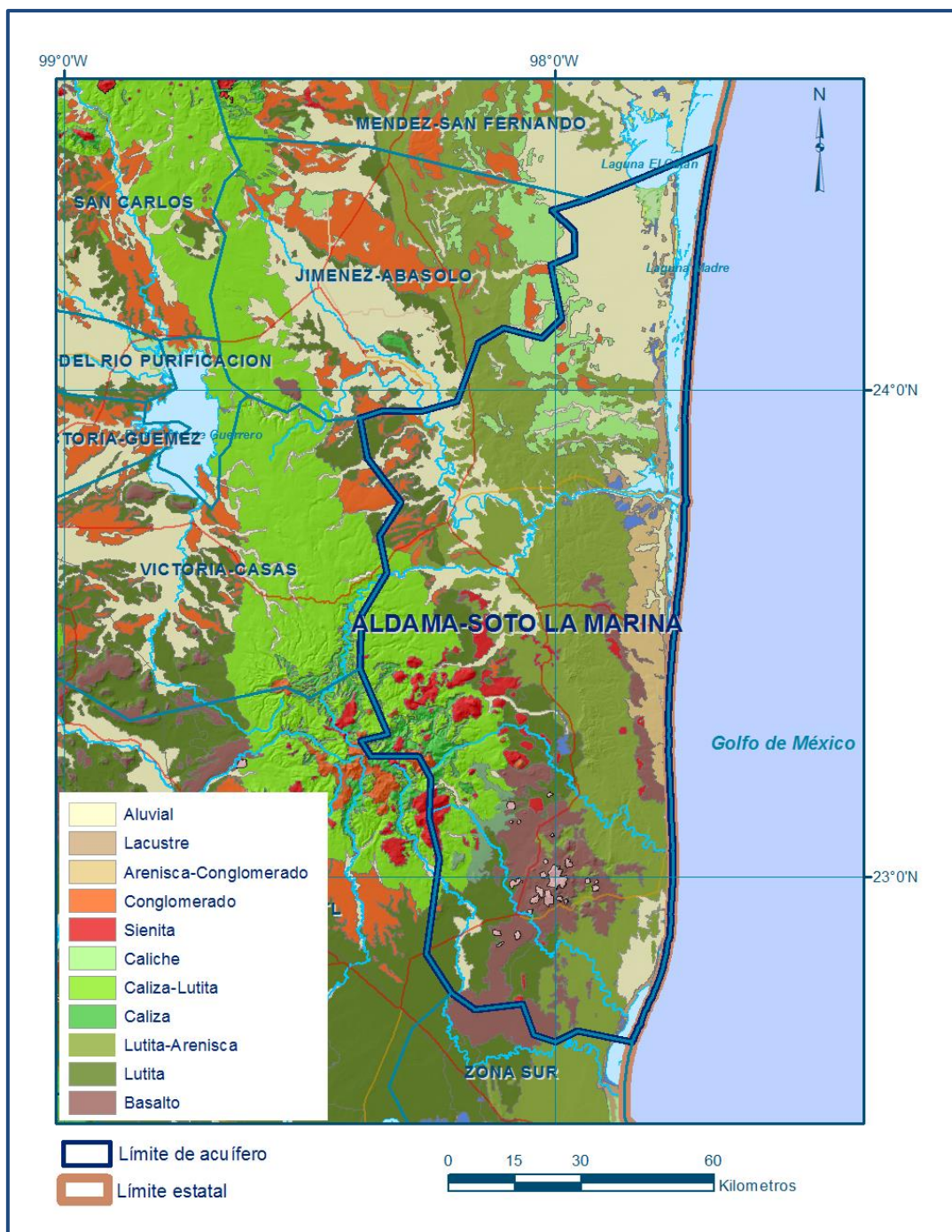


Figura 2. Geología general del acuífero

El marco litológico que predomina en la superficie está dominado por depósitos de origen marino que corresponden a una unidad arcillosa, compacta e impermeable, estratificada en capas delgadas, con interestratificaciones de lentes o delgados estratos de arenisca.

Por la posición que guardan en la superficie, se infiere que fueron sometidos a plegamiento moderado y no presentan rasgos de fracturamiento.

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 geología regional de la zona está constituida por rocas sedimentarias e ígneas intrusivas y extrusivas, cuyo registro estratigráfico abarca el periodo comprendido entre el Jurásico y el Reciente.

A continuación, se describen brevemente las unidades litológicas que conforman la columna estratigráfica de la región, en orden cronológico de la más antigua a la más reciente.

JURÁSICO

Formación Zuloaga

Está constituida por calizas en estratos delgados, medianos y gruesos, con presencia de un conglomerado basal de clásticos de arenisca y fragmentos de rocas ígneas dentro de una matriz areno-arcillosa. Presenta un espesor aproximado de 400 m y aflora en el área de Huizachal–Peregrina, fuera del límite del acuífero.

Formación La Casita

Descansando sobre la unidad anterior se presenta un espesor que varía entre 70 y 90 m de estratos delgados y medianos de areniscas calcáreas, calizas arcillosas con nódulos y lentes de pedernal, margas arenosas y calizas arcillo-arenosas; en ocasiones las areniscas presentan estratificación cruzada. No aflora dentro de la superficie que cubre el acuífero

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Tamaulipas

Nombre definido por L.W. Stephenson 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, 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.

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. Sobreyace a la Formación Tamaulipas Superior y subyace a la Formación San Felipe. Aflora en el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental, y en el flanco poniente de la Sierra de Tamaulipas.

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 pizarroicidad, 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)

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

Constituida por lutitas ligeramente calcáreas de color verde y amarillo que presentan algunos horizontes bentoníticos y capas delgadas de arenisca de grano fino. Sus afloramientos tienen una morfología de lomeríos suaves, de estructura masiva con algunos horizontes de bentonita en la base; hacia la cima presenta láminas de arena fina y pequeños nódulos de pedernal. Su espesor no se ha definido en superficie; sin embargo, en reportes de pozos petroleros se le ha asignado espesores de 45 a 76 m. 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 Chapopote

Consiste de margas arenosas interestratificadas con areniscas de grano fino y con algunas lutitas, de color gris claro con tonos verdes que se presentan en forma de lomeríos. La unidad presenta estratos delgados de bentonita y en su base se observan algunos horizontes conglomeráticos. Su espesor no ha sido bien definido en superficie, pero en cortes litológicos de pozos petroleros se le ha definido un espesor de 73 a 170 m. Su edad corresponde al Eoceno Superior (Bartoniano–Ludiano), de acuerdo con los foraminíferos fósiles que contiene. Sobreyace en forma discordante a los depósitos pelíticos del Eoceno y subyace en igual forma a la unidad arcillo – arenosa del Oligoceno.

Formación Palma Real

Se ha dividido en dos miembros: inferior y superior. El miembro inferior consiste de areniscas con 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 del Eoceno. El miembro superior se distingue del miembro inferior por la ausencia de ciertas especies de microfósiles y está compuesto, en términos generales, por lutitas de color gris con tonos azulado y verdoso, a veces arenosas de grano fino, 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 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 Tuxpan

Fue definida por Dumble, E.T. en 1911. Está constituida por capas de lutitas arenosas, areniscas, 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 basaltos de olivino que presentan estructura vesicular y en menor proporción amigdaloides con relleno de calcita; se presentan desde inalterados hasta muy intemperizados, en forma de derrames lávicos de forma tabular.

Estos 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 principalmente al norte del acuífero, en forma aislada y encima de los depósitos de las formaciones Méndez y Velasco.

Rocas ígneas intrusivas

Están representadas por gabros y diabasas de textura holocristalina y color oscuro, emplazados en las rocas arcillosas del Eoceno en el sur de la región, en forma de mantos o de “troncos”. Su expresión morfológica es de prominencias que modifican los lomeríos y en la Sierra de Tamaulipas.

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 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, al desaparecer el fracturamiento, así como las rocas ígneas intrusivas. A mayor profundidad, el basamento geohidrológico regional está representado por las lutitas y areniscas de la Formación La Casita.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, producto de la erosión de las rocas que constituyen las sierras que delimitan los valles, cuyo espesor es de algunas decenas y presentan permeabilidad generalmente baja debido a la predominancia de sedimentos de granulometría, excepto en los cauces de los ríos y arroyos donde la permeabilidad es mayor.

La porción inferior del acuífero se aloja en rocas sedimentarias y volcánicas (basaltos) así como en areniscas y lutitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Debido a la alternancia de secuencias arcillo-calcáreas y la presencia de sedimentos lacustres en la zona costera, es posible inferir la presencia de horizontes **acuíferos confinados o semiconfinados** en las calizas cuyas áreas de recarga se localizan en las sierras limítrofes del valle. Estas unidades no han sido exploradas aún, pero representan mayor potencial.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades llevadas a cabo en el estudio realizado en el 2013, se reinterpretaron 8 aforos. Adicionalmente, se cuenta con la información de por lo menos 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 **1.6×10^{-2} a $1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (1382.4 a $1.3 \text{ m}^2/\text{d}$)**, con un valor promedio de **$4.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (397.4 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 $7.6 \text{ m}^2/\text{d}$)**, 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 **0.05**.

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 2 a 70 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 la Sierra de Tamaulipas y lomeríos que lo delimitan.

Los niveles más someros se registran a lo largo de los cauces de los ríos y arroyos, en torno de presas 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 Coronel, La Piedra, Pichujumo, El Tigre y Aldama (figuras 3a y 3b).

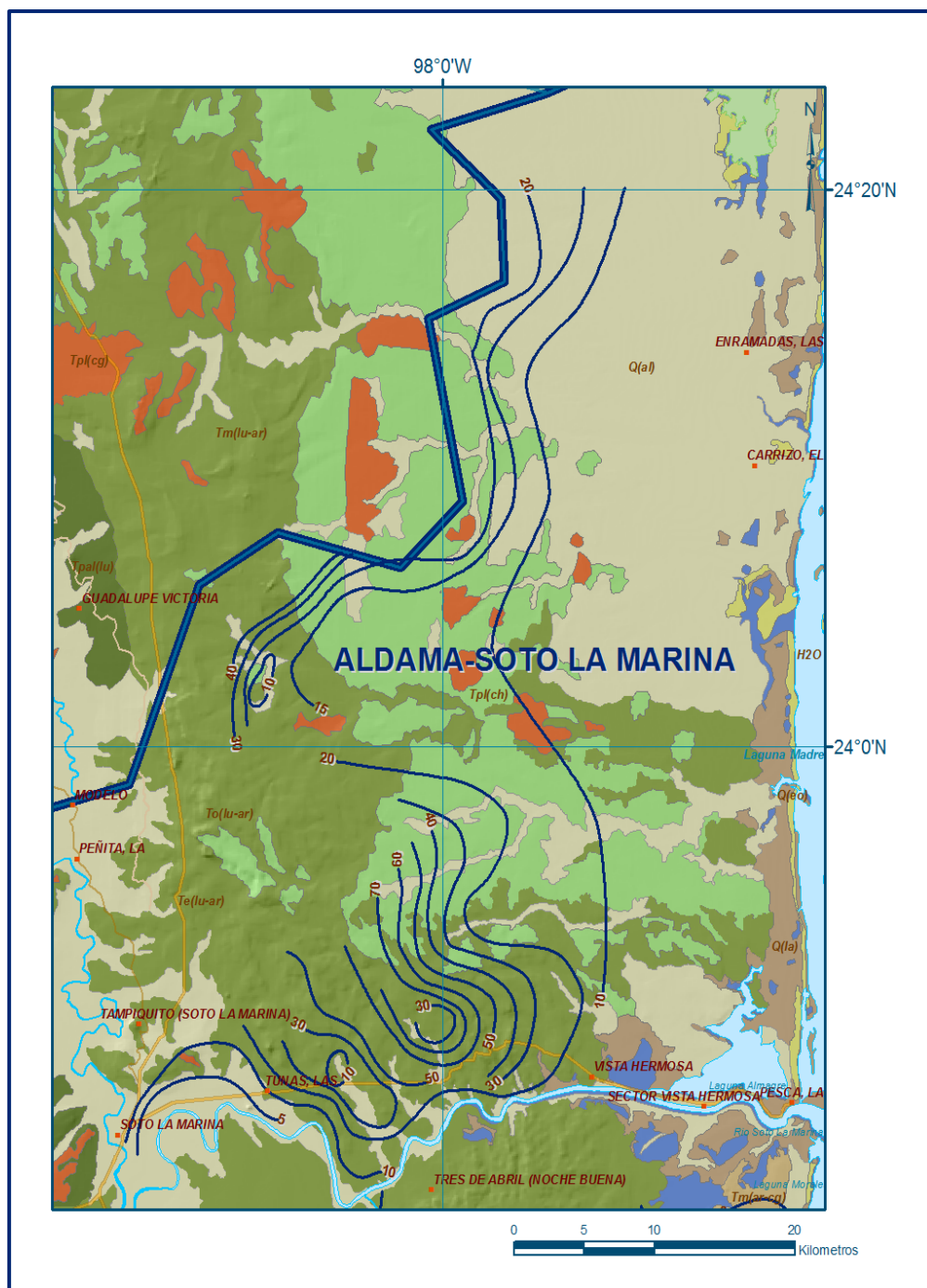


Figura 3a. Profundidad al nivel estático en m (2013)

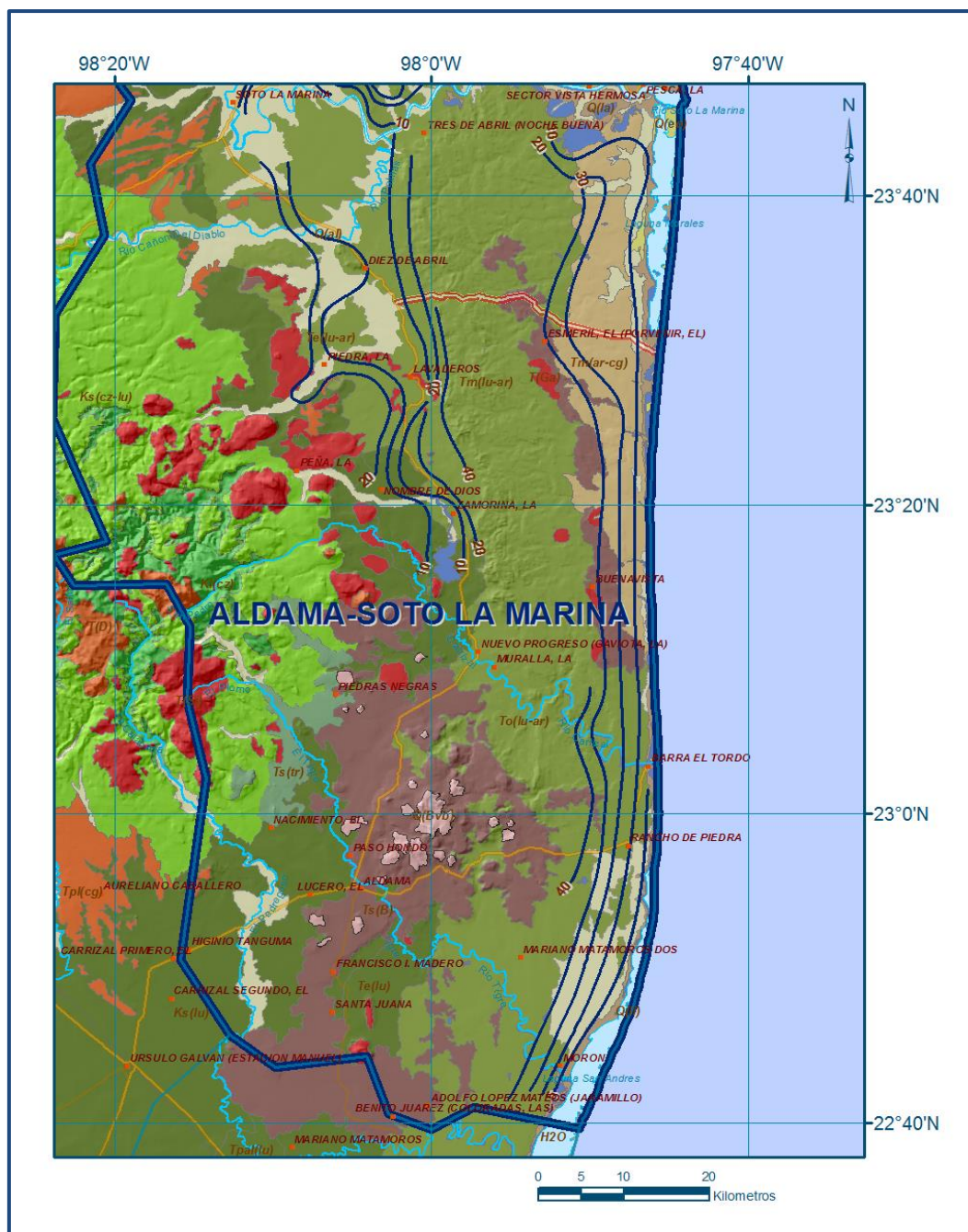


Figura 3b. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2013 presenta valores que varían de 5 a 150 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.

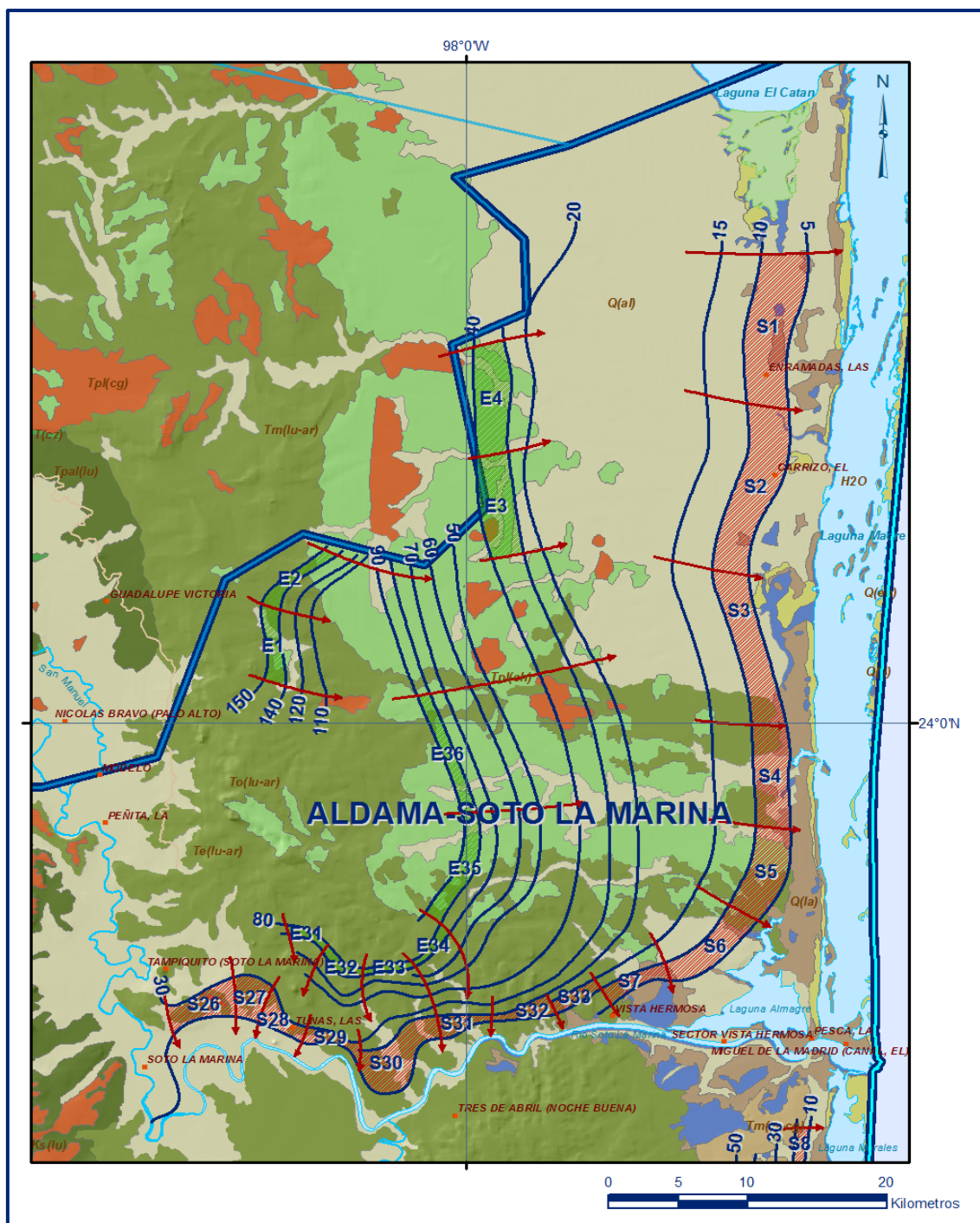


Figura 4a. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

Los valores descienden gradualmente desde las zonas topográficamente más altas, ubicadas hacia la Sierra de Tamaulipas y lomeríos que delimitan el valle, hacia la zona costera, mostrando de esta manera una red de flujo con dirección preferencial oeste-este (figuras 4a y 4b).

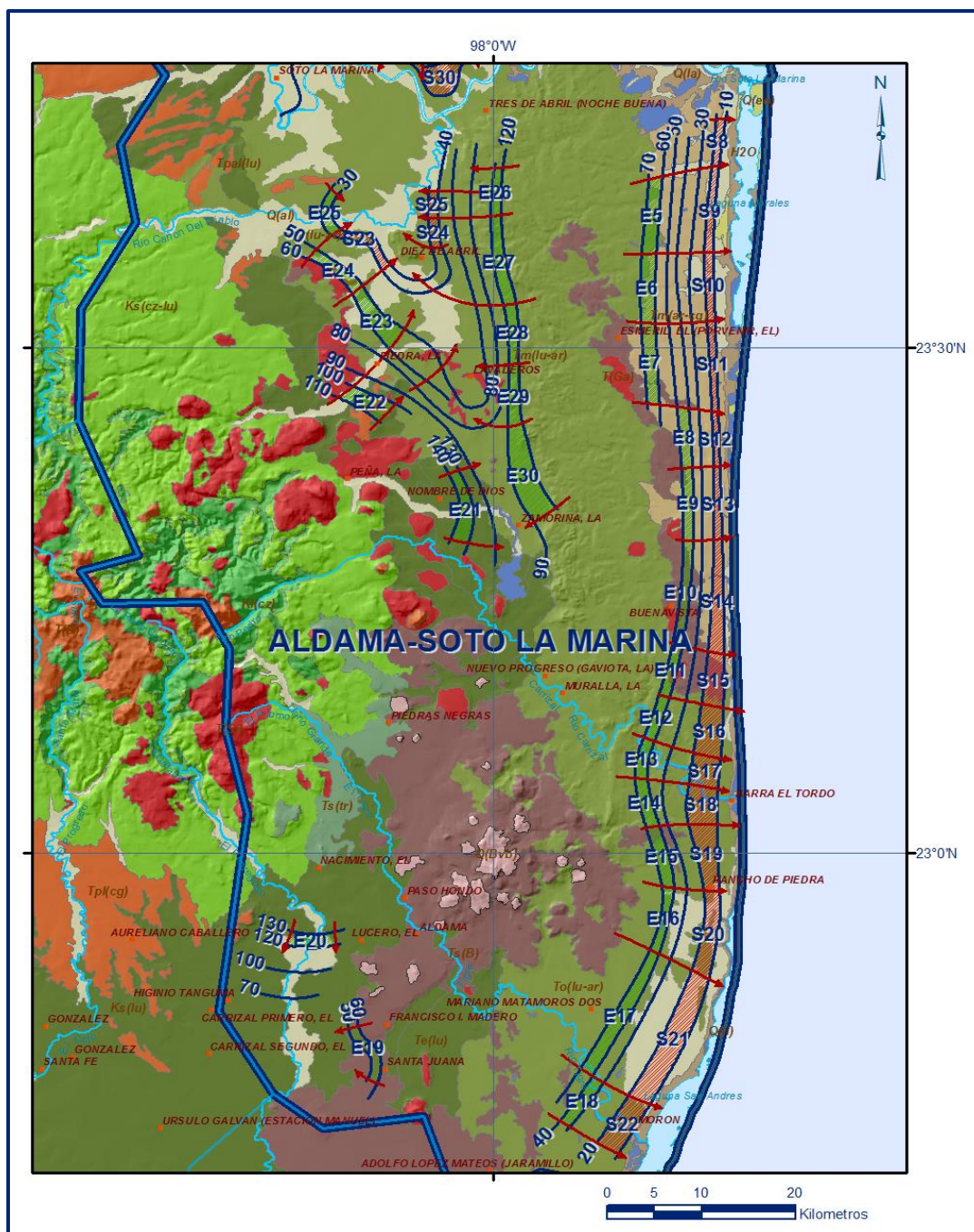


Figura 4b. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2010-2013, se presentan valores puntuales de 2 a 4 m, tanto de recuperación como de abatimiento. Sin embargo, 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.

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 286 a 2000 mg/l, 40 de los aprovechamientos sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 mg/l establecido por 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, de 1132 a 2000 mg/l que corresponden principalmente a norias ubicadas en la zona costera. Las menores concentraciones se registran en las áreas topográficamente más altas, que representan las zonas de recarga, y las más altas hacia la zona costera y hacia los ríos, confirmando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo.

Los valores de conductividad eléctrica variaron de 626 a 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que la clasifican como agua dulce a salobre, de acuerdo con American Public and Health Association (APHA), 1995. La temperatura del agua varía de 26.7 a 32.5 °C y el pH de 5.57 a 7.4.

6 CENSOS 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: 125 pozos y 21 norias y 4 manantiales; del total de obras, 136 están activas y los 14 restantes inactivas (pozos). Del total de obras activas, 111 (93 pozos y 18 norias) se destinan al uso pecuario y doméstico, 20 para uso público-urbano (18 pozos, 2 norias), 1 solo pozo para uso agrícola, 2 sin equipo de bombeo temporalmente y de 2 más se desconoce su uso. Los 4 manantiales se destinan a los usos doméstico y pecuario.

El volumen de extracción conjunta asciende a **0.7 hm³ anuales**, de los cuales 0.4 hm³ (57.1 %) se destinan al uso público-urbano, 0.2 hm³ (28.6%) son para uso agrícola, y 0.1 hm³ (14.3 %) para usos doméstico y pecuario.

Adicionalmente, a través de 4 **manantiales** se descarga un caudal conjunto muy pequeño, aproximadamente 1.5 lps, que representa un volumen anual de **0.05 hm³**, destinado a los usos doméstico y pecuario. Para fines del balance, se considera despreciable.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2010-2013, en un área de balance de **3400 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:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (Rt) 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 otras fuentes de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, debido a que el volumen de agua utilizado para uso público-urbano es pequeño, para fines del balance de agua subterránea sólo se considera la recarga por retorno de riego agrícola R_r , debida principalmente al uso de agua superficial.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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:

$$R_v + R_r + E_h - B - Sh - ETR - D_m = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- R_v :** Recarga vertical
- R_r :** Retornos de riego
- E_h :** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B :** Bombeo
- Sh :** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR :** Evapotranspiración
- D_m :** Descarga a través de manantiales
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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:

$$Q = B * i * T$$

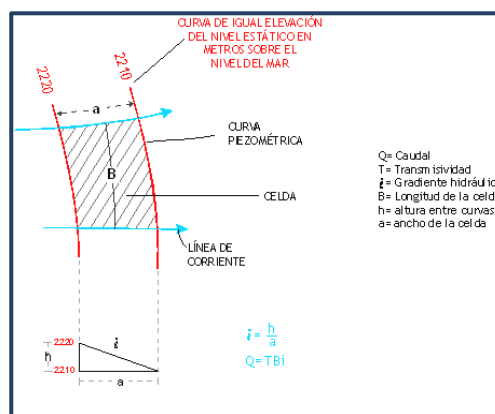
Donde:

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 muestran los valores obtenidos, en la que se puede observar que su valor es de **51.4 hm³ anuales**.

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.

7.1.3 Retorno de riego (Rr)

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.

Tabla 2. Cálculo de entradas 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)
E1	7140	510	10	0.01961	0.0005	0.0700	2.2
E2	5100	410	10	0.02439	0.0003	0.0373	1.2
E3	9795	2040	10	0.00490	0.0003	0.0144	0.5
E4	6530	1735	10	0.00576	0.0003	0.0113	0.4
E5	8370	1430	10	0.00699	0.0005	0.0293	0.9
E6	7550	1835	10	0.00545	0.0005	0.0206	0.6
E7	9185	1630	10	0.00613	0.0010	0.0563	1.8
E8	5510	1530	10	0.00654	0.0010	0.0360	1.1
E9	9795	1430	10	0.00699	0.0010	0.0685	2.2
E10	12245	1225	10	0.00816	0.0020	0.1999	6.3
E11	5510	920	10	0.01087	0.0010	0.0599	1.9
E12	6120	1020	10	0.00980	0.0005	0.0300	0.9
E13	4080	920	10	0.01087	0.0005	0.0222	0.7
E14	5510	1120	10	0.00893	0.0005	0.0246	0.8
E15	6120	2040	10	0.00490	0.0005	0.0150	0.5
E16	7345	2345	10	0.00426	0.0008	0.0251	0.8
E17	13675	2550	10	0.00392	0.0005	0.0268	0.8
E18	8570	2450	10	0.00408	0.0003	0.0105	0.3
E19	5715	1430	10	0.00699	0.0030	0.1199	3.8
E20	4285	1530	10	0.00654	0.0030	0.0840	2.6
E21	8570	1225	10	0.00816	0.0005	0.0350	1.1
E22	4695	2245	10	0.00445	0.0005	0.0105	0.3
E23	7755	2040	10	0.00490	0.0010	0.0380	1.2
E24	6325	1630	10	0.00613	0.0003	0.0116	0.4
E25	4080	1430	10	0.00699	0.0008	0.0228	0.7
E26	4490	1225	30	0.02449	0.0005	0.0550	1.7
E27	8775	1430	30	0.02098	0.0005	0.0920	2.9
E28	8165	1225	30	0.02449	0.0005	0.1000	3.2
E29	7345	1120	30	0.02679	0.0005	0.0984	3.1
E30	10205	1835	30	0.01635	0.0005	0.0834	2.6
E31	3675	610	10	0.01639	0.0005	0.0301	0.9
E32	2865	815	10	0.01227	0.0005	0.0176	0.6
E33	3875	715	10	0.01399	0.0005	0.0271	0.9
E34	3060	1020	10	0.00980	0.0005	0.0150	0.5
E35	8165	1735	10	0.00576	0.0003	0.0141	0.4
E36	9590	1530	10	0.00654	0.0003	0.0188	0.6
Total entradas							51.4

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. Si consideramos que para uso agrícola se utilizan 20.2 hm³ anuales, de 0.2 hm³ de agua subterránea y 20.0 hm³ de aguas superficiales (15 hm³ provenientes de la presa “República Española” y 5.0 hm³ de la presa “Lavaderos”), y el 15% de coeficiente de infiltración, el volumen del retorno de riego es 3.0 hm³ anuales. **Rr = 3.0 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 = 23.7 °C y de precipitación 880.4 mm, que se muestra a continuación:

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

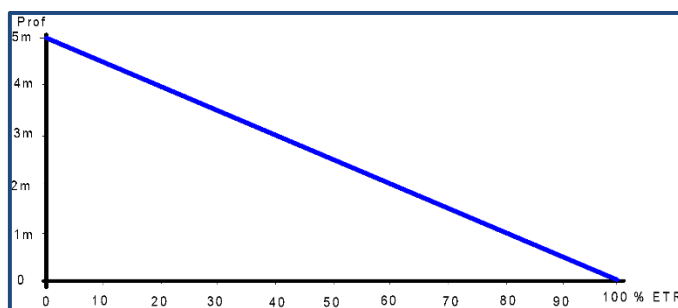
$$L = 300 + 25T + 0.05T^2$$

T (°C) =	23.7		
P(mm) =	880.4	P ² =	775104.16
L =	1558.10265	L ² =	2427683.87
ETR (mm)	797.3		

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 550 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 797.3 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 **175.4 hm³** anuales.

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración (2013)

Profundidad promedio (m)	Área (km ²)	%	Lámina ETR (m)	ETR (hm ³ /año)
3.0	550	0.4	0.7973	175.4

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 la elevación del nivel estático del año 2013, mostrada en la figura 4. El valor estimado del volumen es de **33.3 hm³ anuales** y se muestra en la tabla 4.

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de la extracción asciende a **0.7 hm³ anuales**.

Tabla 4.- Cálculo 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	12245	3570	5	0.00140	0.0010	0.0171	0.5
S2	13470	3265	5	0.00153	0.0010	0.0206	0.7
S3	10815	2865	5	0.00175	0.0010	0.0189	0.6
S4	7140	2040	5	0.00245	0.0005	0.0088	0.3
S5	7550	2345	5	0.00213	0.0003	0.0048	0.2
S6	7140	2245	5	0.00223	0.0010	0.0159	0.5
S7	4285	815	5	0.00613	0.0005	0.0131	0.4
S8	5510	920	10	0.01087	0.0010	0.0599	1.9
S9	8470	1225	10	0.00816	0.0010	0.0691	2.2
S10	7960	1430	10	0.00699	0.0010	0.0557	1.8
S11	9185	1000	10	0.01000	0.0010	0.0919	2.9
S12	4895	920	10	0.01087	0.0010	0.0532	1.7
S13	10000	1120	10	0.00893	0.0010	0.0893	2.8
S14	12450	950	10	0.01053	0.0010	0.1311	4.1
S15	5715	1325	10	0.00755	0.0005	0.0216	0.7
S16	5510	2245	10	0.00445	0.0005	0.0123	0.4
S17	2855	3675	10	0.00272	0.0005	0.0039	0.1
S18	4895	3470	10	0.00288	0.0005	0.0071	0.2
S19	7550	2345	10	0.00426	0.0005	0.0161	0.5
S20	8570	2855	10	0.00350	0.0008	0.0240	0.8
S21	14490	3470	10	0.00288	0.0010	0.0418	1.3
S22	8165	2655	10	0.00377	0.0005	0.0154	0.5
SUBTOTAL HACIA EL MAR Y LAGUNAS							25.0
S23	7345	1225	10	0.00816	0.0010	0.0600	1.9
S24	3400	970	10	0.01031	0.0005	0.0175	0.6
S25	2655	980	10	0.01020	0.0005	0.0135	0.4
S26	5715	2245	20	0.00891	0.0008	0.0407	1.3
S27	2450	3265	20	0.00613	0.0005	0.0075	0.2
S28	4285	2040	20	0.00980	0.0008	0.0336	1.1
S29	3470	1325	20	0.01509	0.0005	0.0262	0.8
S30	5715	2040	10	0.00490	0.0005	0.0140	0.4
S31	4080	1020	10	0.00980	0.0005	0.0200	0.6
S32	4895	1120	10	0.00893	0.0005	0.0219	0.7
S33	4080	1250	5	0.00400	0.0005	0.0082	0.3
SUBTOTAL HACIA RÍOS							8.3
Total salidas							33.3

7.2.4 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, únicamente se identificaron 4 manantiales; que en conjunto descargan un caudal de 1.5 lps equivalente a un volumen anual de **0.05 hm³ anuales**, que para el propósito del balance se considera despreciable.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático 2010-2013, se presentan valores puntuales de 2 a 4 m, tanto de recuperación como de abatimiento; en la mayor parte del acuífero los niveles no se registran tiempo y espacio y no cubren el área total de explotación del acuífero.

Los niveles del agua subterránea tienen cambios estacionales: durante las lluvias responden de manera muy rápida al efecto de la recarga y tienen una recuperación, en tanto que durante cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea. Las mediciones piezométricas se encuentran dispersas en la época de estiaje se producen abatimientos. Por lo tanto, para fines del balance de aguas subterráneas, se considera que no existen variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea. $\Delta V(S) = 0$

Solución a la ecuación de balance

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

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

$$R_v = 33.3 + 0.7 + 175.4 - 0.0 - 51.4 - 3.0 + 0$$

$$R_v = 155.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$R_t = R_v + E_h + R_r$$

$$R_t = 155.0 + 51.4 + 3.0$$

$$R_t = 209.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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. Para este caso, su valor es de **209.3 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural

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 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 este caso, su valor es **de 112.7 hm³ anuales**, que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

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 (REPD), 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 **18,293,917 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 209.3 - 112.7 - 18.293917 \\ \text{DMA} &= 78.306083 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **78,306,083 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2006. Estudios de actualización de mediciones piezométricas en el acuífero Victoria-Casas, en el Estado de Tamaulipas. Realizado por Geofísica y Perforaciones del Medio Ambiente, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Actualización mediciones piezométricas en los acuíferos Aldama-Soto La Marina, Tamaulipas, y Tampico-Misantla, Veracruz. Realizado por Corín y Anaya, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2013. Estudio Geohidrológico en los acuíferos Aldama-Soto La Marina, Estado de Tamaulipas, y Tampico-Misantla, Estado de Veracruz. Realizado por GEOPSA, S.A. de C.V.