CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO ZONA SUR (2813), ESTADO DE TAMAULIPAS

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1 GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1 Localización 2
1.2 Situación administrativa del acuífero 4
2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3 FISIOGRAFÍA 6
3.1 Provincia fisiográfica 6
3.2 Clima 7
3.3 Hidrografía 10
3.4 Geomorfología 11
4 GEOLOGÍA 11
4.1 Estratigrafía 13
4.2 Geología estructural 18
4.3 Geología del subsuelo 18
5 HIDROGEOLOGÍA 19
5.1 Tipo de acuífero 19
5.2 Parámetros hidráulicos 19
5.3 Piezometría 20
5.4 Comportamiento hidráulico 20
5.4.1 Profundidad al nivel estático 20
5.4.2 Elevación del nivel estático 22
5.4.3 Evolución del nivel estático 24
5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 24
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 25
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 25
7.1 Entradas 26
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 26
7.1.2 Infiltración o recarga procedente de cuerpos de agua (Ica) 27
7.1.3 Recarga inducida (Ri) 28
7.2 Salidas 28
7.2.1 Descargas a corrientes superficiales (Dcs) 28
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 29
7.2.3 Descarga a cuerpos de agua (Dca) 29
7.2.4 Evapotranspiración (ETR) 30
7.2.5 Bombeo (B) 31
7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S) 32
8 DISPONIBILIDAD 32
8.1 Recarga total media anual (R) 33
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 33
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 33
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 34
9 BIBLIOGRAFÍA 35

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 Zona Sur, definido con la clave 2813 por la Comisión Nacional del Agua, abarca una superficie de 1,834 km^2 de la porción sur del estado de Tamaulipas. La zona se encuentra delimitada por los paralelos 22° 14' y 22° 45' de latitud norte y los meridianos 97° 47' y 98° 20' de longitud oeste. Colinda al norte con el acuífero Aldama – Soto La Marina, al oriente con el Golfo de México, al occidente con el acuífero Llera – Xicotencatl y al sur con el acuífero Tampico – Misantla del estado de Veracruz (figura 1).

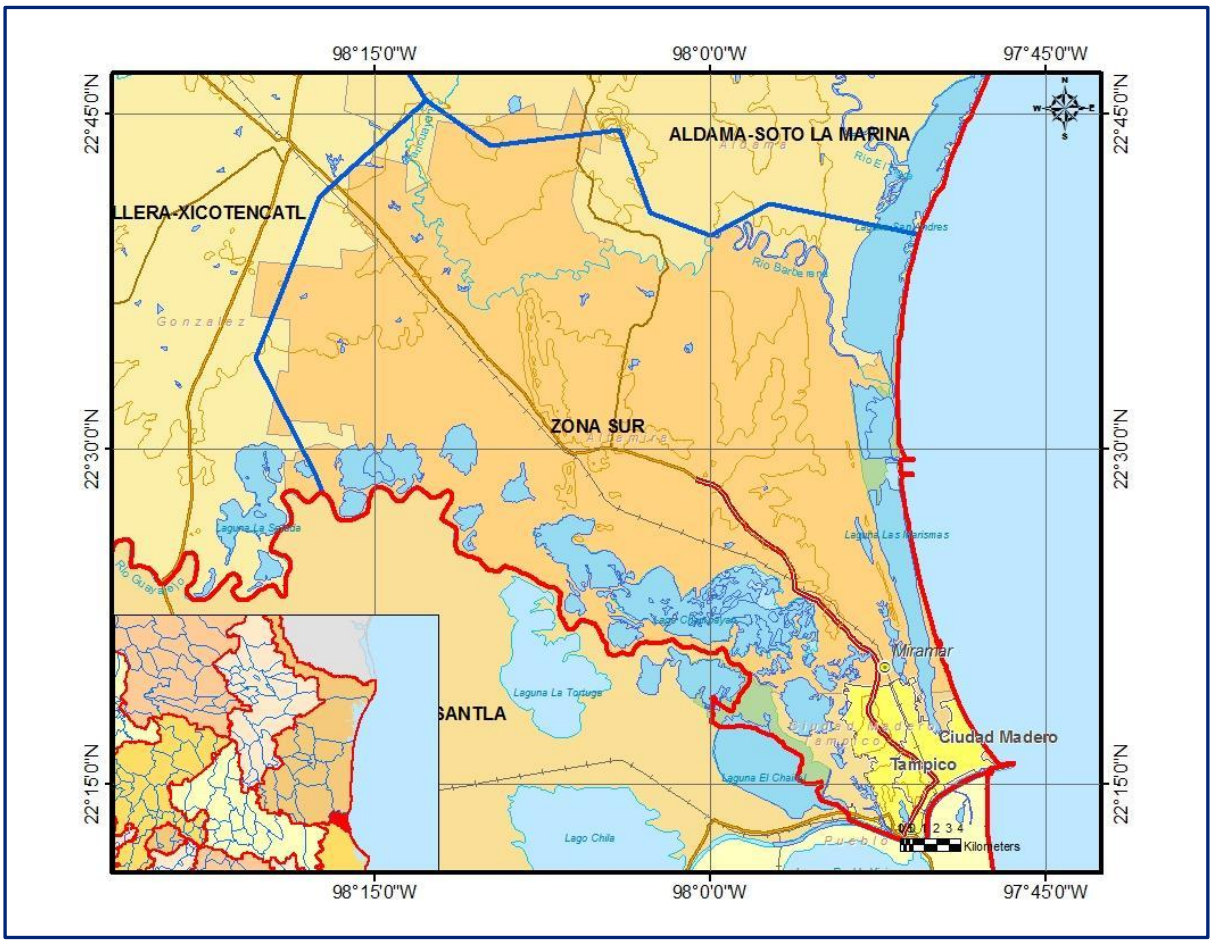


Figura 1. Localización del Acuífero.

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 Zona Sur

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	98	17	21.7	22	28	4.0	
2	98	17	40.2	22	28	51.8	
3	98	20	21.9	22	34	6.4	
4	98	17	29.6	22	41	20.7	
5	98	12	43.9	22	45	40.0	
6	98	9	49.4	22	43	37.2	
7	98	4	5.0	22	44	20.0	
8	98	2	41.6	22	40	36.4	
9	98	0	0.6	22	39	35.6	
10	97	57	19.6	22	41	1.5	
11	97	50	39.7	22	39	39.6	DEL 11AL 12 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
12	97	47	26.6	22	15	37.0	DEL 12 AL 1POR EL LIMITE ESTATAL
1	98	17	21.7	22	28	4.0	

El acuífero se localiza totalmente dentro de los municipios de Altamira, Tampico y Ciudad Madero y algunas pequeñas porciones del municipio de Aldama; destacando en él las poblaciones de Tampico, Altamira, El Fuerte, Cervantes, Cuauhtémoc, Lindavista, San Antonio y El Palmar. El municipio de Tampico es el que tiene la mayor cantidad de habitantes, seguido por el de Ciudad Madero y el de Altamira. En los tres municipios se cuenta con servicio de educación elemental y en los municipios de Tampico y Ciudad Madero se cuenta con Universidades, por lo que el índice de alfabetización es en general, mayor a 90%.

En lo que se refiere a los servicios de salud, en la zona existen clínicas y hospitales de la Secretaria de Salud (SSA), del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) y de consultorios particulares con lo que se atiende a los habitantes de los tres municipios.

Además, el municipio de Tampico cuenta con hospitales de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) y uno de Petróleos Mexicanos (PEMEX). Las principales actividades económicas que se desarrollan en la zona son la agricultura y ganadería (excepto Ciudad Madero), pesca, industria, turismo, comercio y servicios.

El acceso a la zona se puede realizar partiendo de la capital del estado (Ciudad Victoria) donde se toma la carretera estatal No. 70 Victoria - Soto La Marina y a la altura del km 16, se desvía a la derecha por la carretera vía corta que conduce a Estación Zaragoza y de aquí se continua por la carretera federal No. 81 que va hacia González. De ahí se vuelve a tomar la carretera federal No. 80 y después la 180 hasta llegar a las ciudades de Altamira y Tampico.

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece a la región Hidrológico-Administrativa IX Golfo Norte y se encuentra sujeto a la disposición del decreto de veda “Distrito de Riego Llera, Tam.”, publicado el 21 de febrero de 1955, en el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de las aguas del subsuelo en la zona comprendida dentro de los límites de la cuenca hidrológica del Río Guayalejo. En su artículo primero se establece el Distrito de Riego de Llera, Tamps. y se declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas, en la inteligencia que el Distrito tiene los linderos que se presentan en el Decreto.

El segundo acuerdo, indica que el Distrito de riego comprenderá las obras ya construidas y las que posteriormente se construyan, para la mejor distribución del agua, así como los terrenos que ocupan las obras y sus derechos de vía, caminos interiores, que se encuentran dentro de los límites señalados en el Decreto. Artículo tercero se declara subsistente por tiempo indefinido la veda de fecha 27 de julio de 1931, para el otorgamiento de concesiones con aguas del Río Guayalejo y su cuenca tributaria. El artículo cuarto establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de las aguas del subsuelo en la zona comprendida dentro de los límites de la cuenca hidrológica del río citado.

Artículo Quinto.- Excepto cuando se trate de alumbramiento de agua para usos domésticos a partir de la fecha de publicación del presente acuerdo, en el Diario Oficial de la Federación, nadie podrá efectuar obras de alumbramiento, para el aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la zona vedada, ni modificar las existentes, sin previo permiso por escrito, concedida por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, la que solo expedirá en los casos en que los estudios correspondientes, se deduzca, que no se causen perjuicios a terceros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

No existen estudios técnicos realizados en este acuífero. La información fue recabada de los datos obtenidos por el área de aguas subterráneas de la Gerencia Regional Golfo Norte y de las siguientes referencias: Diagnóstico de la Región IX Golfo Norte", Comisión Nacional del Agua (CNA), 1998. Este estudio expone la problemática que enfrenta la región noreste de la República Mexicana con relación a sus recursos hídricos. Contiene una descripción de los principales rasgos hídricos y socioeconómicos de la zona.

Evaluación de la contaminación y niveles de limpieza requeridos en el subsuelo y acuífero de la Refinería Francisco I. Madero", Instituto de Ingeniería (II), 1999. Como parte de los estudios que se han realizado en la Refinería Francisco I. Madero, en este estudio se realiza una descripción de las instalaciones de la refinería, además se cuenta con información de cortes litológicos de 20 piezómetros dentro de las instalaciones, de mediciones piezométricas en el año de 1998 y de muestreo de agua. Sin embargo, aunque se cuenta con mucha información de tipo geológico e hidrogeológico, esta es muy local.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

La zona se encuentra dentro de la Provincia denominada llanura Costera del Golfo Norte (INEGI, 2000), la cual se extiende sobre las costas del Golfo, desde el Río Bravo, (en el tramo que comprende el área de Reynosa, Tamaulipas y la desembocadura de este Río) hasta la zona de Nautla, Veracruz. Hacia el este, esta provincia encuentra su límite con la Provincia de la Sierra Madre Oriental.

Dentro de la provincia de llanura Costera del Golfo Norte hay cuatro subprovincias Fisiográficas; Llanura Costera Tamaulipeca, Llanuras y Lomeríos, Sierra San Carlos y Sierra de Tamaulipas (INEGI, 2000).

La Subprovincia de la Llanura Costera Tamaulipeca se encuentra cubriendo los municipios de Tampico, Ciudad Madero y una parte del municipio de Altamira, la cual se caracteriza por estar cubierta por sedimentos marinos no consolidados, estar 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 muy tendidos.

La Subprovincia de Llanuras y Lomeríos se encuentra cubriendo la parte del municipio de Altamira que no cubre la de Llanura Costera Tamaulipeca. Ésta se caracteriza por estar formada por sedimentos antiguos arcillosos y arenosos, de edades que decrecen hacia la costa (mesozoica y terciaria).

Aunque presenta afloramientos de rocas basálticas de morfología de mesetas, esta subprovincia se caracteriza por presentar extensas llanuras interrumpidas por lomeríos.

En el municipio de Tampico casi toda la superficie es plana, excepto por el cerro de Andonegui al oriente y al denominado Mata Redonda, que son las dos únicas elevaciones importantes que se presentan.

Por otro lado, el municipio de Altamira no presenta relieves accidentados en toda su extensión por ser una región sensiblemente plana; sin embargo, en esta zona se presentan la Sierra de La Palma, el Cerro del Metate, el Cerro del Lagarto, La Cruz y El Esporta.

Finalmente, el municipio de Ciudad Madero es plano casi en su totalidad, excepto en algunas zonas al norte y al oeste, las cuales están formadas por dunas y lomeríos.

3.2 Clima

En el estado de Tamaulipas, el clima responde fundamentalmente a la Influencia de tres condiciones geográficas que son: la latitud a la que se encuentra la entidad, su cercanía al Golfo de México y la altitud de sus tierras.

Por su ubicación geográfica, el área recibe humedad del Golfo de México por la influencia de los vientos del este, misma que está condicionada por la oscilación del anticiclón del Atlántico.

El conocimiento detallado de las características climatológicas de una región permite conocer las condiciones hídricas que en ella se desarrollan, a través del análisis cuidadoso de la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración, factores de gran importancia para el estudio del agua subterránea y su relación con las demás componentes del ciclo hidrológico.

De esta manera podemos conocer la recarga de los mantos acuíferos, así como su comportamiento a través del tiempo, tomando en cuenta las aportaciones por lluvias y las posibles pérdidas por el proceso de evapotranspiración.

En el análisis climatológico se consideraron las estaciones que contaron con un mayor periodo de registros en la zona, así como de sus alrededores con el fin de obtener resultados representativos. En la zona se cuenta con información climatológica de 11 estaciones, siendo las más representativas: Cuauhtémoc, Tampico, El Barranco y Tancol.

A continuación, se hace una breve descripción de las condiciones de precipitación, temperatura y evaporación dentro del área, con base en la información disponible obtenida a partir de las estaciones climatológicas.

Precipitación

Para obtener el valor de la precipitación en el área, se tomaron los datos de 11 estaciones climatológicas (IMTA, 1999). En la tabla 2, se presenta una relación con la ubicación de dichas estaciones y el periodo de años con los que se cuenta con información.

Tabla 2. Relación de estaciones climatológicas (Precipitación)

	CLAVE	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	PERIODO	PREC. MED ANUAL. (mm)
1	28004	ALTAMIRA, ALTAMIRA	22° 24'	97° 56'	1961 – 1972	935.4
2	28006	BARBERENA, ALTAMIRA	22° 37'	98° 10'	1972 – 1983	955.7
3	28016	CAMPO E. CUAUHTEMOC	22° 36'	98° 08'	1969 – 1997	914.2
4	28024	CAÑON DEL DIABLO	22° 25'	98° 02'	1970 – 1998	859.9
5	28025	EJIDO 3 DE MAYO	22° 24'	97° 56'	1971 – 1983	944.5
6	28054	LOS ESTEROS, ALTAMIRA	22° 29'	98° 06'	1961 – 1983	950.1
7	28055	LOS TOMATES, ALTAMIRA	22° 28'	98° 11'	1961 – 1997	826.1
8	28111	TAMPICO, TAMPICO	22° 13'	97° 52'	1961 – 1997	1075.1
9	28130	EL BARRANCO, ALTAMIRA	22° 34'	97° 34'	1972 – 1997	939.5
10	28138	TANCOL, TAMPICO	22° 18'	97° 54'	1972 – 1997	926.1
11	28145	EL APURO, ALDAMA	22° 39'	97° 55'	1973 – 1997	892.8

El periodo de datos es muy variable entre cada estación, además de que en las estaciones de Altamira, Barberena, Ejido 3 de Mayo y Los Esteros, el periodo de observación es muy corto. Por tal motivo se convino en tomar el periodo común de 1973 a 1997. De acuerdo con la información disponible de las estaciones consideradas, la precipitación media anual en la zona es de **919.1** mm

El valor máximo de precipitación se registra durante el mes de septiembre, como se observa en la gráfica de la figura 2., el cual corresponde con el mes de mayor frecuencia de ciclones tropicales. De noviembre a abril, se tiene una menor influencia de los vientos del oeste y de la lluvia, que en ocasiones se asocia con los vientos del norte.

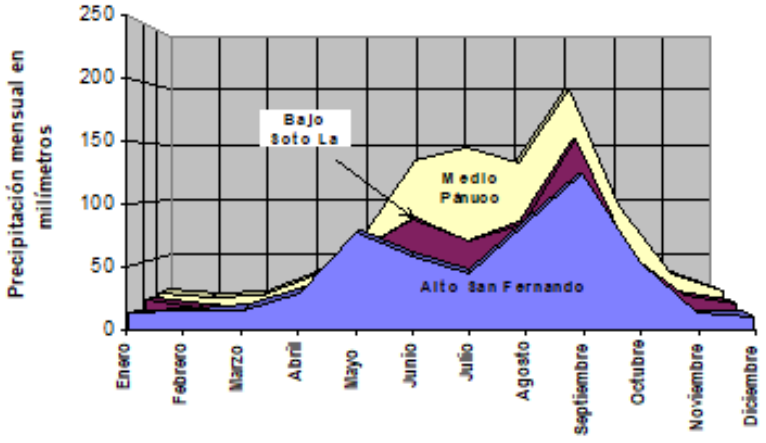


Figura 2. Valores máximos mensuales de precipitación (CNA, 1998)

La distribución de la lluvia mensual, en toda la región, muestra una concentración en el periodo de mayo a octubre, lapso en el que se acumula el 70% de la precipitación anual.

Temperatura

Para obtener el valor de la temperatura media anual en la zona, se obtuvo información de 11 estaciones climatológicas (IMTA, 1999).

En la tabla 3, se presenta una relación con la ubicación de dichas estaciones y el valor promedio de temperatura de acuerdo con el periodo de observación disponible de cada estación.

Tabla 3. Relación de estaciones climatológicas (Temperatura)

	CLAVE	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	PERIODO	TEMP. (° C)
1	28004	ALTAMIRA, ALTAMIRA	22° 24'	97° 56'	1961 – 1972	21.8
2	28006	BARBERENA, ALTAMIRA	22° 37'	98° 10'	1972 – 1983	20.9
3	28016	CAMPO E. CUAUHTEMOC	22° 36'	98° 08'	1969 – 1997	21.6
4	28024	CAÑON DEL DIABLO	22° 25'	98° 02'	1970 – 1998	20.1
5	28025	EJIDO 3 DE MAYO	22° 24'	97° 56'	1971 – 1983	22.7
6	28054	LOS ESTEROS, ALTAMIRA	22° 29'	98° 06'	1961 – 1983	22.9
7	28055	LOS TOMATES, ALTAMIRA	22° 28'	98° 11'	1961 – 1997	22.8
8	28111	TAMPICO, TAMPICO	22° 13'	97° 52'	1961 – 1997	22.4
9	28130	EL BARRANCO, ALTAMIRA	22° 34'	97° 34'	1972 – 1997	22.3
10	28138	TANCOL, TAMPICO	22° 18'	97° 54'	1977 – 1997	23.1
11	28145	EL APURO, ALDAMA	22° 39'	97° 55'	1974 – 1997	22.5

Al igual que en el caso de la precipitación, el periodo de datos es muy variable entre cada estación, y dado que, en las estaciones de Altamira, Barberena, Ejido 3 de Mayo y Los Esteros, el periodo de observación es muy corto, se convino en tomar el periodo común de 1973 a 1997 sin tomar en cuenta los datos de las cuatro estaciones anteriormente mencionadas.

Con base en lo anterior, y de acuerdo con la información disponible de las estaciones consideradas, en la región comprendida por los municipios de Altamira, Ciudad Madero y Tampico la temperatura media anual es de 22° C.

Evaporación

Para el cálculo de la evaporación en la zona, se tomaron los datos de 10 estaciones climatológicas (IMTA, 1999). En la tabla 4, se presenta una relación de las estaciones climatológicas ubicadas dentro del área, y el valor medio anual de evaporación correspondiente al periodo de observación.

Tabla 4. Relación de estaciones climatológicas (Evaporación)

	CLAVE	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	PERIODO	EVAPORACION (mm)
1	28004	ALTAMIRA, ALTAMIRA	22° 24'	97° 56'	1961 – 1972	1465.4
2	28006	BARBERENA, ALTAMIRA	22° 37'	98° 10'	1972 – 1983	1177.5
3	28016	CAMPO E. CUAUHTEMOC	22° 36'	98° 08'	1969 – 1997	1432.6
5	28025	EJIDO 3 DE MAYO	22° 24'	97° 56'	1971 – 1983	1402.4
6	28054	LOS ESTEROS, ALTAMIRA	22° 29'	98° 06'	1961 – 1983	1277.7
7	28055	LOS TOMATES, ALTAMIRA	22° 28'	98° 11'	1961 – 1997	1261.4
8	28111	TAMPICO, TAMPICO	22° 13'	97° 52'	1961 – 1997	1280.9
9	28130	EL BARRANCO, ALTAMIRA	22° 34'	97° 34'	1972 – 1997	1236.8
10	28138	TANCOL, TAMPICO	22° 18'	97° 54'	1977 – 1997	1353.8
11	28145	EL APURO, ALDAMA	22° 39'	97° 55'	1974 – 1997	1506.3

Como se puede observar en la tabla, el periodo de años con datos es muy variable entre cada estación; sin embargo, se tomó en cuenta la información disponible del periodo 1973 – 1987.

De acuerdo con el valor de evaporación de las estaciones consideradas, la evaporación media anual en el área es de 1,345 mm, valor muy superior a la lámina de precipitación que se presenta en esta zona, por lo cual se considera a este valor como representativo de la evaporación potencial; es decir aquella evaporación que ocurriría si toda el área fuera un cuerpo de agua.

3.3 Hidrografía

El acuífero queda comprendido en la Región Hidrológica N° 26 Panuco, cuenca del Río Tamesí y subcuenca del Río Guayalejo, está considerada como una de las cinco más importantes del país, tanto por el volumen de sus escurrimientos, como por la superficie que ocupa. En términos generales, la dirección de las corrientes superficiales es de oeste a este, debido a que las zonas más altas donde inician los escurrimientos superficiales se encuentran hacia el oeste de la zona y la pendiente disminuye hacia el este. En el municipio de Tampico, los ríos que confluyen son el Pánuco y el Tamesí. El primero de ellos forma una cuenca de 96,958 kilómetros cuadrados y arroja un caudal de 16,500 millones de metros cúbicos anuales.

La unión de estos ríos forma una de las corrientes más caudalosas de la República Mexicana que desemboca en el Golfo de México (en cuyo último tramo pasa al sur del municipio de Ciudad Madero). Otros cuerpos de agua lo constituyen la Laguna el Chairel, Carpinteros y numerosas Vegas y Esteros. En el municipio de Altamira los recursos hídricos están constituidos por el río Barberena, ubicado en la parte norte del municipio, que sirve como límite entre Aldama y Altamira, el cual nace en la sierra de Tamaulipas. El río Tamesí marca los límites con el estado de Veracruz. Además, cuenta con otros recursos como los esteros: Los Esteros, El Salado, El Conejo y el Del Norte, así como las Lagunas Quintero y Champayán, entre otras.

3.4 Geomorfología

La Subprovincia de la Llanura Costera Tamaulipeca se caracteriza por estar cubierta por sedimentos marinos no consolidados, estar 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 muy tendidos.

La Subprovincia de Llanuras y Lomeríos se caracteriza por estar formada por sedimentos antiguos arcillosos y arenosos, de edades que decrecen hacia la costa (mesozoica y terciaria). Aunque presenta afloramientos de rocas basálticas de morfología de mesetas, esta subprovincia se caracteriza por presentar extensas llanuras interrumpidas por lomeríos. En el municipio de Tampico casi toda la superficie es plana, excepto por el cerro de Andonegui al oriente y al denominado Mata Redonda, que son las dos únicas elevaciones importantes que se presentan.Por otro lado, el municipio de Altamira no presenta relieves accidentados en toda su extensión por ser una región sensiblemente plana; sin embargo, en esta zona se presentan la Sierra de La Palma, el Cerro del Metate, el Cerro del Lagarto, La Cruz y El Esporta. Finalmente, el municipio de Ciudad Madero es plano casi en su totalidad, excepto en algunas zonas al norte y al oeste, las cuales están formadas por dunas y lomeríos.

4 GEOLOGÍA

Regionalmente, la zona se encuentra en la subprovincia geológica llamada cuenca Tampico – Misantla, la cual se desarrolló durante el Terciario al quedar sumergida la plataforma de Tamaulipas.

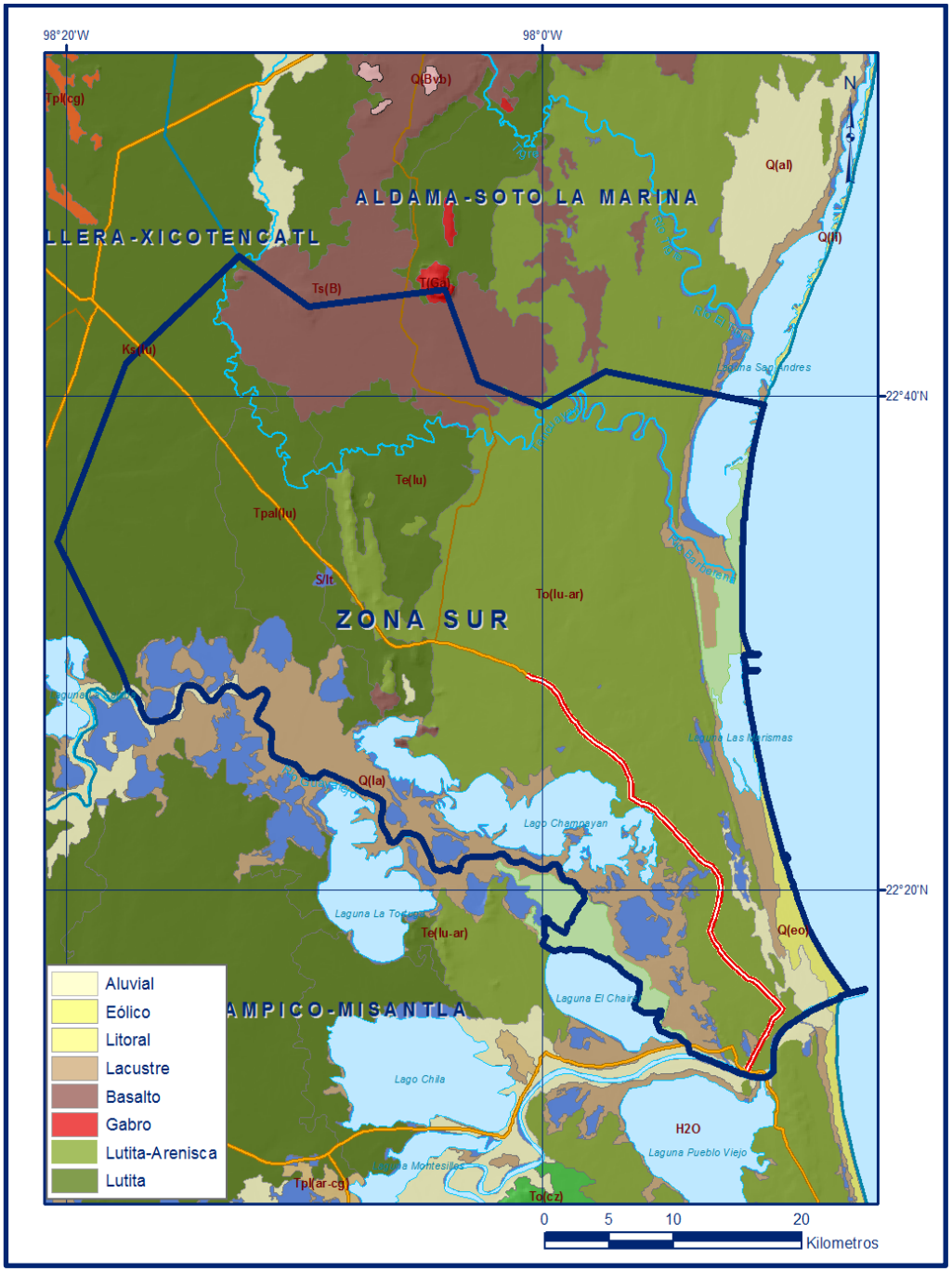


Figura No. 3. Mapa Geológico

La secuencia estratigráfica desde el borde occidental hacia el oriente de la planicie del Golfo está formada por sedimentos depositados desde el Jurásico hasta el reciente. La mayor parte de las rocas que afloran en la región varían del Paleoceno al Mioceno y específicamente en el área de los municipios de Tampico y Ciudad Madero se encuentran sedimentos del Oligoceno, correspondientes a la Formación Mesón y sedimentos del Plio-Pleistoceno.

Los sedimentos del Oligoceno forman gran parte de las elevaciones que sobresalen de las lagunas y esteros en la margen norte del Río Pánuco (Instituto de Ingeniería UNAM, 1999), como se muestra en la figura 3.

4.1 Estratigrafía

A continuación, se presenta la descripción de las unidades geológicas que afloran en el área partiendo de la más antigua a la más reciente.

Km (lu). Formación Méndez

Esta unidad litológica está compuesta de margas, lutitas calcáreas y lodolitas de color gris, con tonalidad clara, azul, verde olivo, crema, café claro y rojo. Entre éstas existen capas de calizas arcillosas de 20 a 30 cm de espesor que por lo general son del mismo color, pero en algunas partes son negras.

Las margas están en capas de 10 cm a un metro de espesor y se intercalan frecuentemente con capas delgadas de bentonita de colores verde, blanca y amarilla. Las lutitas presentan estratificación gruesa, fractura nodular, crucero que produce un aspecto lajoso, en partes microlaminaciones e intemperismo de color amarillo, café crema y gris verdoso. El espesor de esta formación es muy variable, tanto desde su depósito original como por efectos de la erosión, pero en general se le atribuye un espesor entre 250 y 500 m, debido a que los espesores mayores a 500 m medidos en cortes litológicos de pozos corresponden con zonas anómalas por imbricación o repetición de la secuencia.

La edad de esta formación es del Campaniano – Maestrichtiano. Se correlaciona dentro del área con la unidad arcillo-arenosa del Cretácico Superior (Formación Cárdenas). Sobreyace en forma discordante a la formación El Abra y concordante a la San Felipe (parte superior de la unidad de calizas y lutitas del Cretácico Superior) y subyace concordantemente a la unidad arcillosa del Paleoceno.

Esta unidad está expuesta al oeste del área formando un anticlinal de orientación norte – sur limitado por una franja de rocas paleocenas. Estas lutitas se explotan para obtener las arcillas necesarias en la elaboración de cemento.

Tpal (lu). Formación Velasco

Esta unidad está formada por lutitas calcáreas de color gris con tonos verdes intercalados con algunas margas y esporádicas areniscas calcáreas, en algunos sitios tiene yeso. La unidad presenta concreciones calcáreas de formas caprichosas.

Además, esta formación presenta 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 de esta formación medida 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.

La Formación Velasco tiene una edad de Paleoceno – Eoceno. PEMEX ha dividido a esta formación en cuatro miembros (basal, inferior, medio y superior) que se identifican con los microfósiles índices de los cuatro miembros de la Formación Chicontepec. Descansa discordantemente sobre la unidad pelítica del Cretácico Superior y subyace discordantemente a la unidad arcillosa del Eoceno, en el norte está cubierta por mesetas de conglomerado del Plioceno. Esta unidad tiene una morfología de lomeríos suaves y está expuesta conforme a dos franjas de orientación norte – sur en la porción central de la región.

Te (lu). Formación Aragón

Unidad constituida por lutitas ligeramente calcáreas de colores verde y amarillo. Presenta algunos horizontes bentoníticos y algunas capas delgadas de arenisca de grano fino. Tiene una estructura masiva con algunos horizontes de bentonita en la base; hacia la parte alta de esta formación se encuentran láminas de arena fina y pequeños nódulos de pedernal.

El espesor de esta unidad no se ha definido en superficie; sin embargo, en reportes de pozos peroleros se le han asignado espesores de 45 a 76 m. A esta formación se le asigna una edad de Eoceno Inferior. Esta unidad contiene abundantes foraminíferos del género Globigerina. Sobreyace discordantemente a la unidad arcillosa del paleoceno y subyace en igual forma a las unidades arcillo – arenosas del Eoceno y del Oligoceno.

La unidad está parcialmente cubierta por un derrame de basalto, aflora al norte de la laguna Champayán y tiene una morfología de lomeríos suaves.

Te (lu-ar). Formación Chapopote

Consiste de unas margas arenosas interestratificadas con areniscas de grano fino y con algunas lutitas. La unidad presenta estratos delgados de bentonita, en su base se observan algunos horizontes conglomeráticos, tiene color gris claro con tonos verdes.

El espesor de esta formación 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. Esta formación es de edad 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. Esta formación tiene morfología de lomeríos y aflora únicamente al norte de la Laguna Chila.

To (lu-ar). Formación Palma Real y Formación Mesón

Debido a la dificultad que supone delimitar a dos formaciones muy similares por su composición; se unieron, en el plano geológico bajo el símbolo To (lu-ar), a la formación Palma Real y la Formación Mesón.La Formación Palma Real se ha dividido en dos miembros: inferior y superior. El miembro inferior consiste de areniscas con diferentes texturas, margas arenosas de color gris azul (con abundantes microforaminíferos), lentes y bloques de calizas coralinas. El espesor de este miembro es muy variable, pudiéndose presentar espesores en el subsuelo desde 42 m hasta 1550 m, aunque en muchos pozos se mantiene un espesor entre 146 y 270 m, y en otros entre 725 y 991 m.

La edad del miembro inferior, por su contenido faunístico, es del Oligoceno Inferior y Medio (Rupeliano – Bormidiano). Este miembro yace discordantemente sobre los depósitos pelíticos y arcillo–arenosos del Eoceno. Se correlaciona con las formaciones Vicksburg y Frío Marino. 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 de tonos azuloso y verdoso, a veces arenosas de grano fino, en estratos de 1 a 30 cm de espesor; fracturadas e intemperizan en colores crema y café amarillento. Estas lutitas presentan intercalaciones de areniscas grises de grano fino a medio en capas de 1 a 10 cm de espesor, particularmente en la parte superior.

El espesor del miembro superior es muy variable, reportándose espesores desde 80 hasta 870 m por diversos autores. De acuerdo con la información de cortes litológicos de pozos petroleros se pueden definir espesores en rangos de 1025 a 1636 m, de 695 a 965 m y de 200 a 586 m.

La edad del miembro superior, por su contenido fosilífero, es del Oligoceno Medio al Oligoceno Superior – Mioceno Inferior (Chattiano – Auitaniano) donde se puede correlacionar con las formaciones Alazán y Mesón.

La Formación Mesón está constituida por lutitas arenosas, areniscas de grano fino, margas y algunos horizontes de limolitas arcillosas en estratos que varían de delgados a medianos, de color gris con tonos azules e intemperiza en tonos de amarillo. Existen zonas donde se presenta un desarrollo arenoso de grano fino con abundante fauna de los phylum echinodermata, coelenterata y mollusca, además presenta abundantes foraminíferos.

Esta formación tiene una unidad calcárea formada por coquinas, calizas coralinas y algunas areniscas calcáreas, la cual se presenta en forma de lentes dentro de la unidad clástica.

De acuerdo con información de cortes litológicos de PEMEX, se puede determinar que esta formación presenta espesores en el subsuelo muy variables que van desde 132 hasta 991 m, aunque predominan los espesores cercanos a los 200 m.

La edad que se le asigna a esta unidad de acuerdo con su contenido faunístico de la parte superior del Oligoceno Medio y el Oligoceno Superior – Mioceno Inferior (Chattiano – Aquitaniano). Yace discordantemente sobre las formaciones Aragón y Palma Real atestiguando una transgresión. Subyace discordantemente a sedimentos del Mioceno Inferior. Esta unidad arcillo-arenosa se presenta suavemente inclinada hacia el este y aflora en la mayor parte del área cercana a la costa y la unidad calcárea se presenta como unos lomeríos prominentes al oeste de la laguna pueblo viejo, al sureste del área.

T (ga). Intrusivos de Gabro

Unidad constituida por gabros y diabasas de textura holocristalina y color oscuro. Estos intrusivos están emplazados en las rocas arcillosas del Eoceno en el norte de la región. Se encuentran en forma de mantos o de “troncos”. Su expresión morfológica es de prominencias que modifican a los lomeríos. Afloran principalmente al norte y sur del área.

Ts (b). Derrames basálticos

Unidad constituida por basaltos de olivino de color negro y textura afanítica, con estructura vesicular, algunos son amigdaloides con relleno de calcita. Se les puede encontrar desde inalterados hasta muy intemperizados, en algunas zonas son densos y forman grandes bloques con intemperismo esferoidal incipiente, aunque en ocasiones se encuentran inalterados.

Los mejores afloramientos de esta unidad están al norte del área, en donde aparecen como derrames que forman mesetas y están coronados por pequeños volcanes piroclásticos. El material de esta unidad puede utilizarse en la construcción como mampostería, balastro y como escolleras.

Q (al). Depósitos aluviales

Esta unidad agrupa a los depósitos aluviales, a los proluviales y algunos coluviales del área. Está constituida por arcillas, limos, arenas y gravas. En el área de las sierras es por lo general gravosa y presenta lentes de caliche; en la planicie occidental contiene limos y en el oriente del área frecuentemente es arcillo-arenosa.

Los clásticos son de caliza, arenisca, pedernal y basalto y tienen diferentes grados de redondez. 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, como el Pánuco y el Tamesí. La unidad forma abanicos aluviales, rellena valles fluviales y forma planicies aluviales; el espesor de esta unidad se desconoce.

Q (la). Depósitos lacustres

Esta unidad representa a los depósitos arcillosos y arenosos de las lagunas marginales y los de una pequeña cuenca endorreica. Las arcillas son generalmente plásticas y de color oscuro, las arenas son de grano fino. Los sedimentos, donde predominan las arcillas, se presentan interestratificados en capas laminares y delgadas.La unidad presenta una morfología de llanura y está expuesta principalmente, en las partes bajas del sureste del área. No se tiene información del espesor de esta unidad.

Q (eo). Depósitos eólicos

Esta unidad está restringida a la zona litoral y está constituida por la acumulación de arenas de grano fino y medio y de fragmentos de conchas. Estos clásticos son transportados por el viento a partir de los depósitos de playa.

Forman barras y dunas orientadas hacia el norte que presentan estratificación cruzada. En algunas zonas se pueden observar dunas fijas formadas por fragmentos de conchas y cementadas por carbonatos.

Q (li). Depósitos de litoral

Esta unidad es la que presenta menor área de afloramiento. Está constituida por fragmentos de conchas de diversos organismos y por arenas de cuarzo y feldespato de grano fino a medio.

Estos clásticos están sujetos a la acción del oleaje. La acumulación es la evidencia directa del retroceso del mar. Esta unidad presenta en superficie, conchas y partes duras de organismos recientes.

4.2 Geología estructural

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, en cofre, buzantes y recumbentes hacia el este, aunque en la zona 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.

De lo anterior, se puede determinar que en la zona hubo 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

La permeabilidad que ocurre en las rocas cenozoicas es muy significativa; el contenido de fluidos es típicamente de agua salada o aceite. Las rocas de la planicie costera se profundizan suavemente hacia el Golfo de México, excepto donde hay rasgos estructurales regionales, como arcos, fallas, bahías, fosas y, levantamientos tectónicos que afectaron la distribución y espesor de los sedimentos.

La profundidad y algunas veces el espesor de los sedimentos se ven afectados por domos salinos que suben de las profundidades de los estratos de sal jurásica, los cuales son intrusivos a los sedimentos cenozoicos.

El incremento más abrupto de espesor en unidades individuales dentro de distancias cortas está asociado con fallas (formadas contemporáneamente a la depositación).

Relacionado con el fallamiento regional existe una zona anormal de alta presión de fluidos (también llamada geopresión), que ha sido desarrollada por sedimentos del Eoceno cercanos a la costa. La alta geopresión o la transición de la presión hidrostática normal a una alta presión anormal se consideran como la base del flujo del agua subterránea.

El movimiento del agua en la zona de geopresión es lento y los datos de presión indican que generalmente es hacia arriba, donde se encuentra la zona de meteorización. Sin embargo, a causa de la permeabilidad insignificante de los sedimentos, el volumen de agua que fluye fuera de la zona de geopresión es relativamente muy pequeño en relación con el que circula en los sedimentos que contienen aguas meteóricas. La rápida depositación de los sedimentos ha provocado que se hundan poco a poco en la cuenca del Golfo de México, lo que ha dado como resultado un gran volumen de sedimentos compuestos bajo la actual línea costera (figura 4).

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información obtenida, corresponde con un acuífero libre granular, constituido principalmente por arenas, aunque en algunas zonas puede comportarse como de tipo semiconfinado, debido a la presencia de arcillas, en general con buena permeabilidad y niveles estáticos entre 1 y 13 m de profundidad.

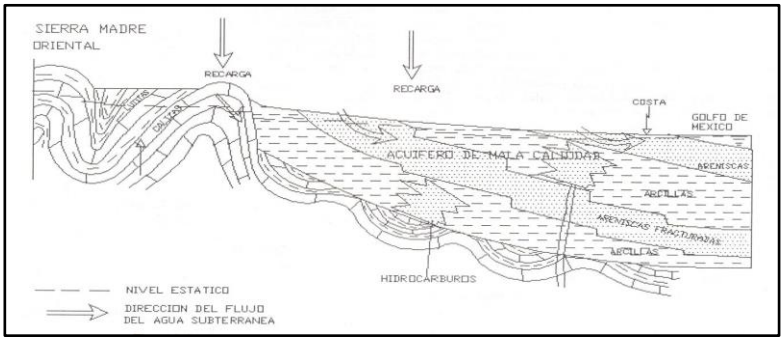


Figura 4. Sección hidrogeológica esquemática de la Provincia Costera del Golfo de México.

5.2 Parámetros hidráulicos

El conocimiento de los parámetros hidráulicos y su distribución espacial son indispensables para conocer el comportamiento hidrodinámico del acuífero. No se han realizado pruebas de bombeo en el acuífero, ni en acuíferos cercanos para poder correlacionar los datos.

El valor de transmisividad se tomó como un valor promedio de la conductividad hidráulica de los datos reportados por la literatura para el tipo de material que conforma al acuífero, multiplicado por el espesor saturado. Dando como resultado T = $2 * 10^{-4}$ m^2/s.

5.3 Piezometría

El comportamiento de la profundidad del nivel del agua en el acuífero se ve influenciado por el agua que aportan, por un lado la corriente del Estero Barberena en las partes norte y central del área, y por el otro los cuerpos lagunares El Conejo, El Gringo, Agua Grande y Los Patos, ya que de acuerdo al nivel del agua que manifiesten dichos cuerpos de agua, la profundidad al nivel estático dentro del acuífero aumenta o disminuye

En general la conformación de curvas piezométricas, reflejan las condiciones de un acuífero costero, en donde las curvas tienden a ser paralelas a la línea de costa, manifestándose los valores más grandes hacia las partes altas y los menores valores en las porciones bajas. Las líneas de flujo son perpendiculares a la línea de costa.

En cuanto al comportamiento piezométrico del acuífero, no se aprecia deformación importante de las isopiezas que permitan definir efectos negativos debidos a la explotación.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Por tratarse de una zona costera, los valores de la profundidad al nivel estático en la mayor parte del área son relativamente someros, encontrándose algunas norias en donde el nivel del agua se encuentra a partir de los 0.6 m de profundidad, principalmente aquellas que se encuentran localizadas muy cerca de la playa (figura 5).

Los valores donde se manifiestan las mayores profundidades al nivel estático (considerado entre los 15.0 y 10.0 m), corresponden a los aprovechamientos localizados en las partes topográficamente mas altas de la zona, y dentro de los cuales se identifican los pozos CNA-5 (Rancho El Bramadero) y CNA-56 (Hacienda La Armenta).

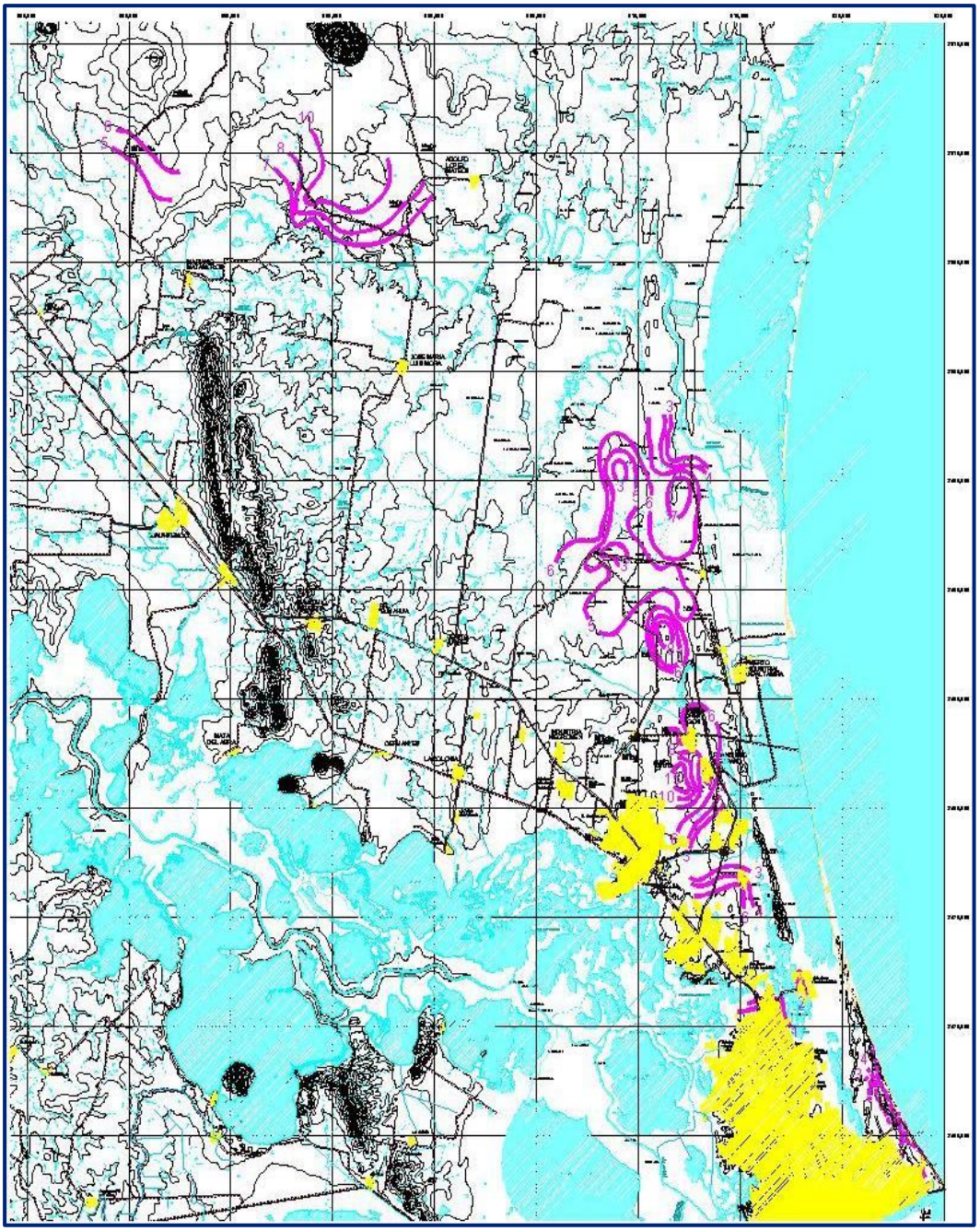


Figura 5 Profundidad al nivel estático. Agosto del 2004

Las zonas con valores de profundidad intermedia (comprendidos entre los 8.0 y 4.0 m), se ubican principalmente en los poblados de Ricardo Flores Magón y Francisco Medrano, donde también coincide con una mayor concentración de aprovechamientos, donde se encuentran las norias CNA-44, 48, 51 y 54. Así también, muy cerca del municipio de Altamira, se encuentran las Colonias Fundadores y La Esperanza en donde la profundidad al nivel del agua alcanza entre 6.0 y 4.0 m, como el caso de las norias CNA-66, 68 y 69.

Por último, la zona en donde los valores de la profundidad al nivel estático se consideran más someros (entre 2.0 y menores a 1.0 m), corresponden a los aprovechamientos localizados en las proximidades de cuerpos de agua como las lagunas El Gringo, Laguna Grande y Los Patos donde muy próxima a estas, se localizan las norias CNA-72, 77, 78, 79 y 80, así como también en las norias ubicadas muy cerca de la costa, rumbo a Playa Miramar y Playa Paraíso en Ciudad Madero (norias CNA-95, 97, 99 y 100).

De acuerdo al análisis de los hidrógrafos, se distinguen tres zonas de acuerdo con la profundidad al nivel del agua: la primera de ellas formada por los pozos que se encuentran cercanos a la línea de costa, encontrando profundidades desde 0.5 a 2 m; la segunda formada por aprovechamientos localizados en la zonas urbanas de los poblados de Altamira y sus alrededores, presentando profundidades del orden de 3 a 7 m; y la tercera formada por las norias ubicadas en la partes topográficamente más altas, encontrando el nivel del agua entre 7 y 12 m de profundidad.

Así mismo se cuenta con información de piezometría de noviembre de 1998 de 27 aprovechamientos, donde de acuerdo a esta información, en el municipio de Altamira hacia la parte noroeste, norte y oriente de este municipio el acuífero se aloja en areniscas y arenas de la Formación Mesón del Terciario Inferior, donde su nivel estático fluctúa de 2.5 a 10 m de profundidad. En los municipios de Tampico y Madero el nivel estático fluctúa en las partes topográficamente bajas de 1.20 a 2.50 m. y en las partes altas de 5 a 10 m. El comportamiento de la profundidad al nivel del agua en el acuífero se ve influenciado por el agua que aportan, por un lado, la corriente del Estero Barberena en las partes norte y central del área, y por el otro los cuerpos lagunares El Conejo, El Gringo, Agua Grande y Los Patos, ya que de acuerdo al nivel del agua que manifiesten dichos cuerpos de agua, la profundidad al nivel estático dentro del acuífero aumenta o disminuye.

5.4.2 Elevación del nivel estático

En la configuración de curvas de igual elevación del nivel, para el mes de agosto de 2004, se manifiestan elevaciones máximas de 28 a 23 msnm, hacia la población de Adolfo López Mateos, medias de 20 y 15 msnm, hacia los poblados de Aquiles Serdán y la colonia Las Prietas en la porción central del área, y mínimas de 3 msnm hasta elevaciones que se encuentran por debajo del nivel medio del mar, principalmente en las norias que se encuentran cercanas a la costa, al noreste de Ciudad Madero.

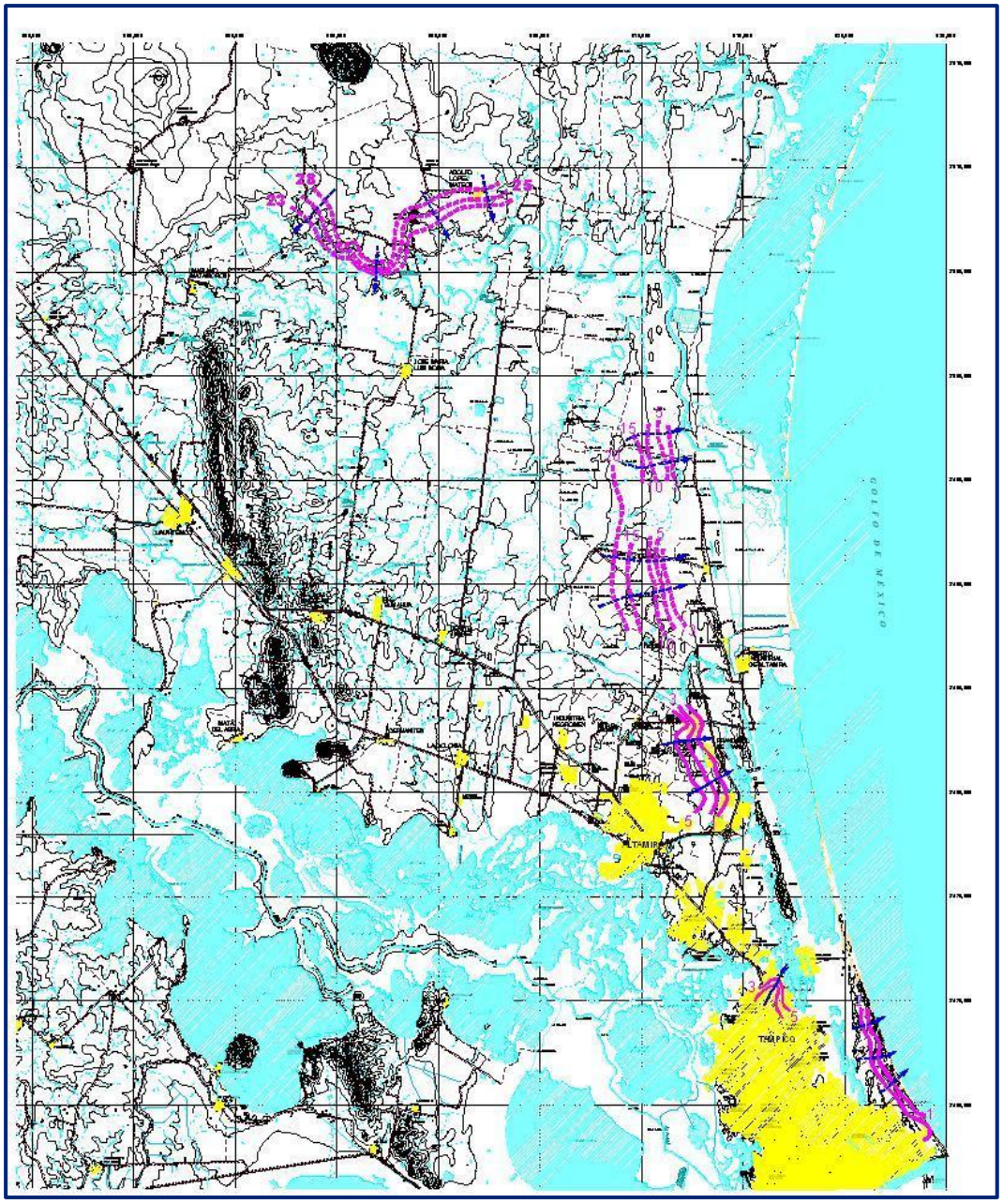


Figura 6. Elevación del nivel estático. Agosto del 2004

La configuración indica la diferenciación de 3 zonas con gradientes hidráulicos que varían en una secuencia media-alta-media. Partiendo de la parte norte del área, en la zona en donde se ubican los aprovechamientos cercanos al poblado de Adolfo López Mateos, el gradiente hidráulico cambia de 0.005 a 0.004; misma condición que se presenta en las norias ubicadas en la zona de Francisco Medrano. Posteriormente el gradiente se incrementa en el área comprendida entre los poblados de Aquiles Serdán, Lomas del Real y la colonia Las Prietas, donde se incrementa a 0.008 y 0.01, condición que se manifiesta por ser esta una de las zonas en donde el nivel del agua se presenta a mayor profundidad, que otras regiones del área de topografía similar.

Finalmente, el gradiente se atenúa hacia la zona comprendida por los aprovechamientos localizados al noreste de Ciudad Madero, muy cerca de la línea de costa bajando a 0.003, seguramente por el efecto que da la cercanía con la playa y que se considera que debe corresponder a la zona de ínter-digitación con el agua salobre marina. De acuerdo con la configuración de curvas de igual elevación del nivel estático, y debido a la distribución de los aprovechamientos dentro del área, se presentan principalmente dos direcciones de flujo.

La primera de ellas es la que se presenta en la parte norte del área, misma que se forma como resultado de la configuración de curvas de elevación del nivel estático de los aprovechamientos localizados cerca del poblado de Adolfo López Mateos, y cuya dirección preferencial es del noroeste al sureste, aunque en la zona donde se ubica el poblado El Manantial, es casi con dirección norte-sur.

La segunda se presenta en la región en donde se ubican la mayoría de los aprovechamientos, en la porción centro y sur del área y que coincide con las partes topográficamente más bajas, en donde además influye la dirección de las corrientes superficiales y la cercanía con la línea de costa, así la dirección de flujo en la zona ubicada entre los poblados de Aquiles Serdán y Lomas del Real tiene una orientación prácticamente del oeste al este, mientras que a partir del poblado de Ricardo Flores Magón y hacia el sur del área la dirección de flujo presenta una orientación con una ligera tendencia hacia el noreste.

5.4.3 Evolución del nivel estático

En general la conformación de curvas piezométricas, reflejan las condiciones de un acuífero costero, en donde las curvas tienden a ser paralelas a la línea de costa, manifestándose los valores más grandes hacia las partes altas y los menores valores en las porciones bajas. Las líneas de flujo son perpendiculares a la línea de costa. En cuanto al comportamiento piezométrico del acuífero, no se aprecia deformación importante de las isopiezas que permitan definir efectos negativos debidos a la explotación.

5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Con respecto a resultados de la calidad del agua se tiene solo el monitoreo realizado en noviembre de 1988 a 17 aprovechamiento, estos arrojaron valores de Sólidos Disueltos Totales de 409 a 2739 y con respecto a los cloruros estos varían de 49 a 1099.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo a la información del REPDA a marzo de 2003, existen en la zona 119 aprovechamientos con los que se extrae un volumen anual de 1.45 hm^3, distribuidos como se muestra en la tabla 5 y en forma gráfica en la figura 7 y 8.

Tabla 5. Relación de aprovechamientos y volumen de extracción en el área

USO	Nº DE APROVECHAMIENTOS	VOLUMEN DE EXTRACCIÓN EN hm^3
PÚBLICO URBANO	21	1.35
DOMESTICO	82	0.028
PECUARIO	9	0.040
SERVICIOS	5	0.015
INDUSTRIAL	2	0.017
TOTAL	**119**	**1.45**

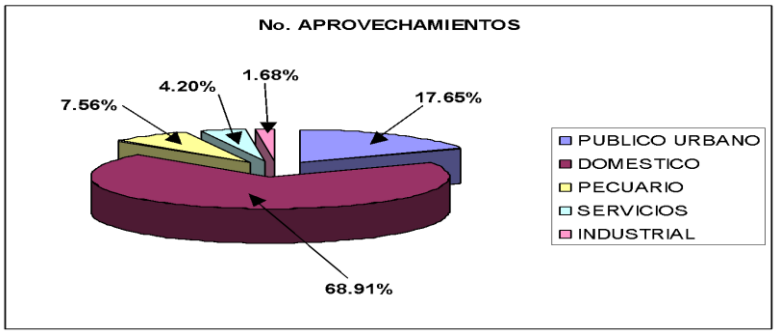


Figura 7. Aprovechamientos de la zona

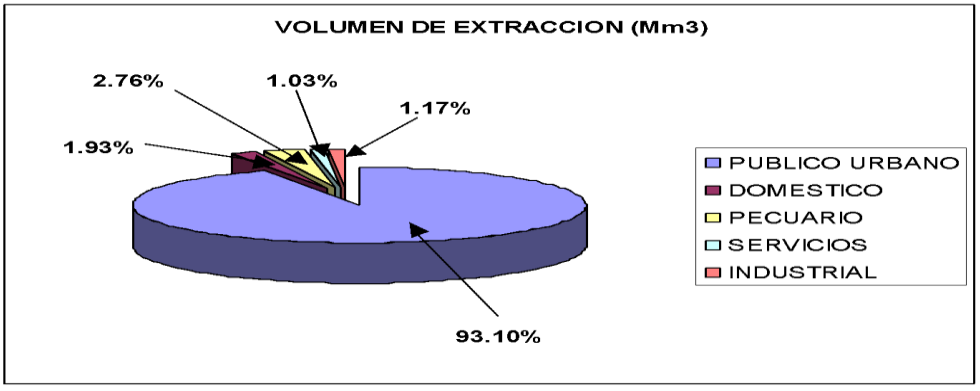


Figura 8. Volumen de extracción Anual según su uso

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 definido.

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

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de almacenamiento

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 de un acuífero:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Este término contempla la infiltración por lluvia en el área de balance y se considera como la incógnita, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$Rv + Ica + Ri – Dcs – Dca - Sh - ETR - B = \pm \Delta V(S)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical
Ica: Infiltración procedente de cuerpos de agua
Ri: Recarga inducida
Dcs: Descargas a corrientes superficiales
Dca: Descargas a cuerpos de agua
Sh: Salidas subterráneas por flujo horizontal
ETR: Evapotranspiración
B: Bombeo
ΔV(S): Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = Dcs + Dca + Sh + ETR + B \pm \Delta V(S) - Ica - Ri$$

al despejar los valores de las demás incógnitas en la ecuación de balance nos da un valor **de 14.1 hm^3/a (Millones de metros cúbicos anuales).**

7.1.2 Infiltración o recarga procedente de cuerpos de agua (Ica)

Con relación a las aportaciones por cuerpos de agua superficial, gran parte del límite suroeste del acuífero (30 km aprox.)

Desde Tampico hasta Mata del Abra, está en contacto con el Sistema Lagunario, estimando que de acuerdo a la constitución litológica que prevalece en la zona (lutitas, areniscas y arenas), estas dos últimas en ciertas áreas deben tener relación directa con alguna laguna donde se debe generar la infiltración hacia el acuífero,

Pero por no contar con obras subterráneas en esta franja con las cuales podríamos inferir donde se genera la infiltración, se ha estimado conservadoramente que de los 30 km.

laS están en relación directa con la laguna, solo en un 20 % (6 km.) se produce ésta, determinando la infiltración hacia el acuífero de la siguiente manera.

$$Q = B * i * T$$

Donde:
Q= Gasto;
T= Transmisividad;
B= Longitud de la celda;
i= Gradiente hidráulico.

Para la selección del valor de conductividad hidráulica, y por no contar con pruebas de bombeo, se consideró el que nos indica la literatura para este tipo de material que conforma el acuífero (areniscas y arenas) se le asignó un valor de 2×10^{-4} m/s. Para el gradiente hidráulico se asignó el valor de (1×10^{-2}).

El gasto total obtenido fue de **0.4 hm³/año** (tabla 6).

Tabla 6. Cálculo del caudal estimado de entrada subterránea de cuerpos de agua

CELDA	I	B	T	Q
		m	m^2/s	m^3/s
1	0.01	6,000	$2 X 10^{-4}$	$1.2 X 10^{-2}$
				1,037 m^3/día
				378,432 m^3/año
			TOTAL 4	**X 10^{-1} hm^3/a**

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Corresponde al volumen de agua que recibe el acuífero derivado de prácticas de riego, es decir el volumen infiltrado por riego será igual a un coeficiente de infiltración el cual estará en función del tipo de material donde se aplica el riego, multiplicado por el volumen de agua aplicado en riego, ir = vol.r (ci).

En esta zona de acuerdo el Registro Público de Derecho de Agua, el volumen utilizado de agua subterránea para este uso es de 14.6 hm^3 de aguas superficiales del Río Tamesi, Lagunas La Puente y San Andrés, agua subterránea para este uso no hay. Por lo tanto, tomando el coeficiente de infiltración de 2%, tendremos.

Ri = (14.6) (0.02)
Ri = 0.29 hm^3/año

7.2 Salidas

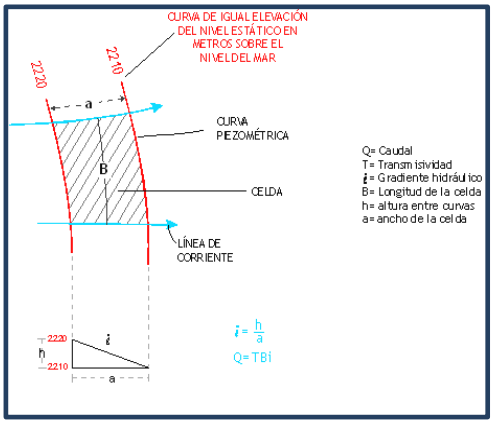
La descarga del acuífero ocurre principalmente por Salidas a corrientes superficiales (Dc), Salidas subterráneas hacia el mar (Sh), Descarga a cuerpos de agua (Dca), la evapotranspiración (ETR) y el Bombeo (B).

7.2.1 Descargas a corrientes superficiales (Dcs)

Constituye el volumen de agua que integra el gasto base de una corriente y tomando en base el plano de configuración de la elevación del nivel estático para agosto de 2004, se determinaron 2 salidas hacia el Río Barberena, localizado al norte de la zona, la primera se ubica a la altura de las comunidades de López Mateos y Benito Juárez y la segunda entre El Barranco y Aquiles Serdán, las cuales se determinaron por la expresión de Darcy:

Q = B * i * T

Donde:
Q= Gasto;
T= Transmisividad;
B= Longitud de la celda;
i= Gradiente hidráulico;



En la tabla 7 se muestra como se determinó el caudal de descarga a corrientes superficiales, cuyo caudal total fue de **0.3 hm³/año.**

Tabla 7. Cálculo para obtener el caudal estimado de salida a corrientes

CELDA	H1	H2	dh	dl	i	B	T	Q
	m	m	m	m		m	m^2/s	m^3/s
1	25	23	2	200	0.01	5000	$2 X 10^{-4}$	$1 X 10^{-2}$
2	5	3	2	300	0.006	1000	$2 X 10^{-4}$	$1.2 X 10^{-3}$
							TOTAL	**$3.4 X 10^{-1}$ hm^{-3}/a**

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Corresponde a los volúmenes de agua que en forma subterránea circulan hacia zonas continuas o bien descarga hacia el mar, y tomando en base el plano de configuración de la elevación del nivel estático para agosto de 2004, se determinó una salida por flujo subterráneo hacia el mar en el extremo sureste del área, las cual se estimó tomando en cuenta los siguientes parámetros de la Ley de Darcy

$$T = Kb$$

K= Conductividad hidráulica ($K = 2 X 10^{-4}$ m/s)

b= Espesor estimado por donde se genera la descarga al mar (1.0 m)

Aplicando el mismo criterio para determinar las descargas a corrientes superficiales el valor redondeando obtenido es de **0.2 hm³/año** (tabla 8).

Tabla. 8. Cálculo para obtener el caudal estimado de salidas horizontales

CELDA	h1	h2	Δh	Δl	i	B	T	Q
	m	m	m	m		m	m^2/s	m^3/s
1	2	1	1	200	0.005	5000	$2 X 10^{-4}$	$5 X 10^{-3}$
							TOTAL	**$1.5 X 10^{-1}$ hm^{-3}/a**

7.2.3 Descarga a cuerpos de agua (Dca)

En relación a las aportaciones a cuerpos de agua superficial, con base el plano de configuración de la elevación del nivel estático para agosto de 2004, se determinaron dos salidas por flujo subterráneo hacia la zona de las Lagunas El Conejo en el área del Ejido Francisco Medrano y El Gringo, aplicándose nuevamente la expresión de Darcy, se obtuvó un valor de **0.2 hm³/año** como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Cálculo para obtener el caudal estimado de descarga hacia cuerpos de agua

CELDA	h1	h2	Δh	Δl	i	B	T	Q
	m	m	m	m		m	m^2/s	m^3/s
1	3	1	2	300	0.006	4000	2×10^{-4}	1.5×10^{-1}
2	5	3	2	150	0.013	500	2×10^{-4}	0.04×10^{-2}
							TOTAL	**2×10^{-1} hm^{-3}/a**

7.2.4 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). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

En toda el área de balance los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Se aplicó el método de Turc para calcular que la lámina de Evapotranspiración real es de 793.3 mm anuales, considerando valores medios anuales de temperatura de 22° C y precipitación de 919 mm.

De la ecuación de Turc:

$$L = 300 + 25\,(T) + 0.05\,(T)^3$$
$$L = 300 + 25\,(22) + 0.05\,(22)^3$$
$$L = 300 + 550 + 532.4 = 1382.4$$

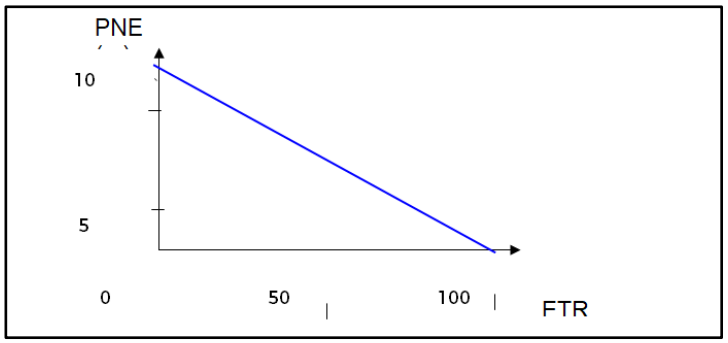
$$EVT_L = \frac{919}{1.15} = 793.3 \text{ mm.}$$

$$EVT_L = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

P = Precipitación

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 10 m, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 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 entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



El resultado de este proceso se presenta en la tabla 10, en la que se muestra que el valor de la evapotranspiración real calculado es de **11.6 hm³ anuales**.

Tabla 10. Cálculo de la Evapotranspiración real

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km2)	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR	% ETR	VOLUMEN ETR (hm3/año)
0	2	0.8	0.7933	0	0.8	0.5
0	3	1.1	0.7933	0	0.7	0.6
0	4	22.0	0.7933	0	0.6	10.5
0	5	0.1	0.7933	0	0.5	0.0
	Total	24.0				11.6

7.2.5 Bombeo (B)

El bombeo, normalmente es el volumen mayoritario de descarga de los acuíferos en explotación y se encuentra constituido por los volúmenes extraídos del subsuelo para satisfacer diversos usos y demanda de los usuarios establecidos en la zona.

Dentro de la zona geohidrológica, de acuerdo al Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), existen 99 aprovechamientos subterráneos con los cuales se extrae un volumen de **2.5 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para el cálculo del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la evolución del nivel estático registrada en unos aprovechamientos en noviembre de 1998 correlacionándolos con el recorrido realizado en agosto del 2004, no observándose una variación significativa en el nivel**.**

Por esas razones, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, **ΔV(S) = 0**.

Solución de la ecuación de balance

De esta manera, el único parámetro de los que intervienen en la ecuación de balance que queda por determinar es la infiltración por lluvia (Rv), por lo que, despejando este término en la ecuación de balance, se tiene:

$$Rv = Dcs + Dca + Sh + ETR + B \pm \Delta V(S) - Ica - Ri$$

$$Rv = 0.3 + 0.2 + 0.2 + 11.6 + 2.5 + 0 - 0.4 - 0.3$$

$$Rv = 14.1 \text{ hm}^3 \text{/año}$$

De esta manera, la recarga total es la suma de todas las entradas:

$$R = Rv + Ica + Ri$$

$$R = 14.1 + 0.4 + 0.3$$

$$14.8 \text{ hm}^3 \text{/año}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 **14.8 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 **3.6 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 (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **4,004,477 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.

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 14.8 –3.6 – 4.004477
DMA = 7.195523 hm³/año.

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **7,195,523 m³ anuales.**

9 BIBLIOGRAFÍA

Pruebas de Bombeo (Segunda Edición). 1996. Comision Nacional del Agua. Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Geotecnia.