

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SAN CARLOS (2804), 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.....	8
3.4	Geomorfología	9
4	GEOLOGÍA.....	9
4.1.	Estratigrafía	10
4.2.	Geología estructural.....	15
4.3.	Geología del subsuelo	16
5	HIDROGEOLOGÍA.....	17
5.1	Tipo de acuífero	17
5.2	Parámetros hidráulicos.....	18
5.3	Piezometría	18
5.4	Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1	Profundidad al nivel estático	18
5.4.	Elevación del nivel estático.....	19
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	21
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	22
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	23
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
7.1	Entradas.....	24
7.1.1	Recarga vertical (Rv)	24
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	25
7.2	Salidas.....	26
7.2.1	Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	26
7.2.2	Evapotranspiración (ETR)	26
7.2.3	Bombeo (B).....	28
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	28
8	DISPONIBILIDAD.....	29
8.1	Recarga total media anual (R).....	29
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	29
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	30
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	30
9	BIBLIOGRAFÍA	31

1 GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero San Carlos, definido con la clave 2804 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-occidental del estado de Tamaulipas, entre los paralelos 24° 6' y 24° 57' de latitud norte y los meridianos 98° 38' y 99° 13' de longitud oeste; abarca una superficie aproximada de 3,237 km²(figura 1). Limita al norte con el acuífero Méndez-San Fernando, al este con el acuífero Jiménez-Abasolo, al sur con los acuíferos Márgenes del Río Purificación y Victoria-Casas, al oeste con el acuífero Hidalgo-Villagrán, todos ellos pertenecientes al estado de Tamaulipas y al noroeste con el acuífero Citrícola Sur, perteneciente al estado de Nuevo León.

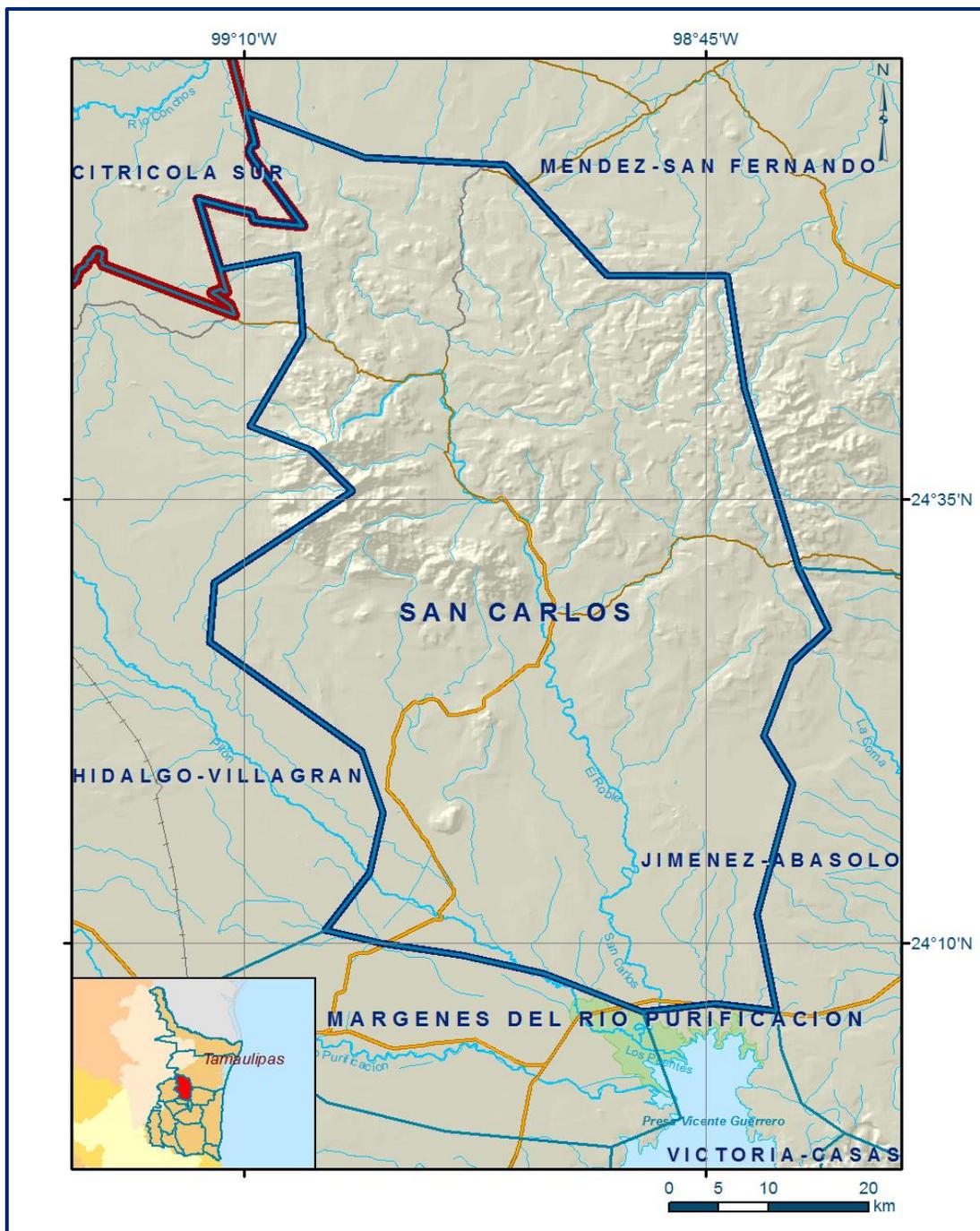


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente abarca totalmente los municipios San Carlos y San Nicolás. Y parcialmente los municipios Jiménez, Padilla, Villagrán, Hidalgo y Burgos.

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 San Carlos

ACUIFERO 2804 SAN CARLOS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	9	53.4	24	56	47.4	
2	99	3	27.2	24	54	13.4	
3	98	55	52.9	24	53	48.5	
4	98	50	22.8	24	47	38.3	
5	98	43	51.8	24	47	33.4	
6	98	42	54.9	24	41	11.7	
7	98	40	1.3	24	31	8.2	
8	98	38	24.5	24	27	41.4	
9	98	40	21.8	24	25	49.5	
10	98	41	54.1	24	21	42.8	
11	98	40	20.8	24	19	0.7	
12	98	42	14.3	24	11	39.1	
13	98	41	11.2	24	6	13.9	
14	98	44	29.0	24	6	37.0	
15	98	48	28.2	24	6	8.8	
16	98	53	43.3	24	8	17.5	
17	98	58	13.3	24	9	20.9	
18	99	2	35.8	24	9	59.7	
19	99	5	38.3	24	10	43.6	
20	99	3	14.4	24	13	57.6	
21	99	2	28.3	24	17	21.7	
22	99	3	38.8	24	20	48.2	
23	99	11	52.8	24	26	59.3	
24	99	11	37.3	24	30	19.1	
25	99	4	8.9	24	35	28.5	
26	99	6	20.5	24	37	47.2	
27	99	9	42.3	24	39	7.0	
28	99	6	49.7	24	44	12.3	
29	99	7	7.2	24	48	45.7	
30	99	11	19.1	24	47	55.2	DEL 30 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	99	9	53.4	24	56	47.4	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero San Carlos, pertenece al Organismo de Cuenca Golfo Norte. La mayor parte del acuífero se encuentra sujeto 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, etc.* publicado el 10 de febrero de 1964 en el Diario Oficial de la Federación (DOF), esta veda se clasifica como tipo III, que permite extracciones limitadas para usos doméstico, industrial, de riego y otros. En el extremo norte y algunas regiones de la porción oriental no existe veda para la extracción de agua subterránea. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En su territorio no se localiza Distrito o Unidad de Riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero San Carlos se han realizado dos estudios hidrogeológicos de evaluación que se describen a continuación:

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN EL ACUÍFERO (2804) SAN CARLOS, ESTADO DE TAMAULIPAS. Elaborado por la Empresa DSK TECHNOLOGIES, S. A. DE C. V. para la Comisión Nacional del Agua, en 2007. El objetivo de este estudio fue realizar un recorrido piezométrico y nivelar los brocales de una red de pozos piloto que se definió para el monitoreo de los niveles del agua subterránea, con la información obtenida fue posible elaborar las configuraciones del nivel estático. Incluyó actividades de campo como piezometría y nivelación de brocales. Entre sus conclusiones más importantes destacan que los valores de profundidad al nivel estático varían de 2 a 20 m, con los valores más profundos registrados en las inmediaciones de San Carlos, San Nicolás en las localidades El Gavial y Las Ánimas; en tanto que los más someros se observaron en los extremos noroeste y sureste. Se definió una piezométrica y se registró la existencia de 106 aprovechamientos, de los cuales 70 fueron pozos y 36 norias.

Con respecto a la elevación del nivel estático, se observaron valores de 700 msnm en el extremo nor-noroeste del acuífero, hacia la zona de San Nicolás, descendiendo a 500 msnm hacia El Gavial y San Carlos. Del centro al sur, la dirección del flujo subterráneo franca hacia sur, hasta los 200 msnm que se registran en las comunidades Nuevo San Antonio y Cinco de Mayo.

ESTUDIOS PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS: PALMILLAS-JAUMAVE, OCAMPO-ANTIGUO MORELOS Y SAN CARLOS EN EL ESTADO DE TAMAULIPAS. Elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo S. A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para contar con información necesaria que permita 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 y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas de Erwin Raisz (1964) el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica VIII Llanura Costera del Golfo Norte. Para INEGI (1997), la superficie cubierta por el acuífero se ubica en la Provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo Norte, que en la porción norte del territorio del acuífero comprende la Subprovincia Sierra de San Carlos y al sur la Subprovincia Llanuras y Lomeríos.

Esta provincia fisiográfica se extiende por la costa del Golfo desde el río Bravo -en el tramo que va de Reynosa, Tamaulipas a su desembocadura- hasta la zona de Nautla, Veracruz.

Dentro del Territorio Nacional limita al noroeste con la provincia de la Gran Llanura de Norteamérica, al oeste con la Sierra Madre Oriental, al este con el Golfo de México y al sur con la provincia del Eje Neovolcánico. Al norte del Río Bravo se introduce en territorio de los estados norteamericanos de Texas y Louisiana y según la fisiografía estadounidense, abarca la provincia de Florida y se extiende hacia el norte sobre el Océano Atlántico hasta Nueva Inglaterra. En México abarca parte de los estados de Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Hidalgo y Veracruz. La provincia comienza en sus límites occidentales a unos 400 msnm (con un mínimo de 150 en Reynosa y un máximo de 500 en el área de Monterrey).

A diferencia de la Llanura Costera del Golfo Sur, integra claramente una costa de emersión, ya que entre los materiales aflorantes dominan los sedimentos marinos no consolidados (arcillas, arenas y conglomerados), cuya edad aumenta conforme su distancia respecto de la costa (desde cuaternarios, pasando por Plioceno, Oligoceno y Eoceno hasta cretácicos superiores en las proximidades de la Sierra Madre Oriental); los ríos que desembocan en sus costas (Bravo, Soto La Marina, Tamesí, Pánuco, Tuxpan, Cazones, Tecolutla, Nautla y otros) no depositan aluviones en su territorio; existe salinidad en las zonas costeras de la porción norte; hay presencia de extensas barras que encierran pequeñas lagunas.

Los sedimentos marinos antiguos -oligocénicos y miocénicos- de la porción sur de la provincia se aproximan a la costa al oeste de Tamiagua y se extienden al norte hasta Ciudad Victoria, Tamps. Abundan depósitos arcillosos del Cretácico Superior en las regiones de Ciudad Mante y Monterrey. En esta última zona se presentan numerosos islotes de aluviones recientes. La provincia encierra las discontinuidades fisiográficas de las Sierras de San Carlos y Tamaulipas. La primera, cuyas cimas varían de 800 a 1000 msnm con un máximo de 1400 msnm, está dominada por calizas del Cretácico fuertemente intrusionadas con rocas ígneas intermedias. La segunda, más extensa pero con altitudes semejantes, también se encuentra dominada por calizas, con intrusiones de rocas ácidas.

La Subprovincia Sierra de San Carlos está constituida por un conjunto de cuerpos intrusivos ígneos sobre calizas. Se extiende de sur a norte entre las cuencas superiores de los ríos Conchos y Soto la Marina, hacia el límite con Nuevo León con una elevación máxima de 1700 m. Entre sus elevaciones mayores destacan los cerros del Diente, La Virgen, San Pablo, El Jabalí, Loma del Perico y Mesa de La Malinche, al igual que en la zona de San Nicolás. La Sierra de San Carlos es rica en minerales y tiene una zona boscosa importante.

La Subprovincia Llanuras y Lomeríos está dominada por sedimentos antiguos arcillosos, de edades que decrecen hacia la costa (mesozoicos y paleógeno-neógenos); se encuentran también afloramientos de rocas lávicas basálticas; algunos muy extensos como lo que se localizan al norte de Tampico, que tienen morfología general de mesetas; y otros pequeños, dispersos al sureste de Ciudad Victoria. No obstante, el paisaje de la zona se caracteriza por sus extensas llanuras interrumpidas por lomeríos.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García para la República Mexicana, se determina que en la región prevalece grupo de clima templado subhúmedo (CW) y semicálido subhúmedo (ACW). De acuerdo a la elevación topográfica de la zona, se presentan variantes en franjas paralelas orientadas en sentido norte sur. Hacia la parte centro y norte del acuífero se presenta el tipo de clima (A)C(wo) y (A)C(wo)x' que son tipos semicálido subhúmedo del grupo C con temperatura media anual de 18° C. Hacia el sur, el tipo de clima es BSI(h')w: semiárido cálido, con temperatura media mayor de 22° C.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de la estación San Carlos, que se localiza en la porción central del acuífero, cuyo registro comprende el periodo 1962-2009.

De acuerdo con estos datos se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **774.1 mm y 22.5 °C**, respectivamente. En cuanto a la evaporación potencial su valor promedio anual es de **1559 mm**. El periodo de lluvias se registra de mayo a septiembre.

3.3 Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 25 “San Fernando- Soto La Marina”, Subregión Hidrológica 25 B “Río San Fernando” perteneciente a la cuenca del Río Soto La Marina. Esta Región Hidrológica, abarca la parte central del estado y una porción sureste. En ella se registra la totalidad de los escurrimientos que desembocan en el Golfo de México, situados entre las cuencas de los ríos Panuco y Bravo.

Una de las principales corrientes superficiales que se encuentra dentro del acuífero es el arroyo San Carlos, que se origina en la Cabecera municipal de San Carlos, donde nacen los arroyos Blanco, La Unión, Las Nueces, Bagre, El Gavilán y El Pedregoso. A partir de su origen recorre 6 km y se unen a él por su margen izquierda los escurrimientos provenientes de las cañadas Tía Juana y El Carricito, sigue su cauce 6 km y recibe los escurrimientos provenientes de la cañada El Muerto, continúa su desarrollo y entra a su cauce la aportación de los arroyos Los Mimbres, El Milagro y El Trejo así como los escurrimientos generados en las cañadas Chica, La Piedra y Huizache.

Aguas abajo recibe la aportación del arroyo El Derramadero, en su último tramo de 24 km se une al río Pilón. En total tiene una longitud aproximada de 80 km. La dirección principal de este arroyo es norte-sureste, y en su trayectoria atraviesa los ejidos Mérida, San Francisco de los Morales, Palo Blanco, Lázaro Cárdenas, Santa Ana, Manuel López, La Providencia, Santa Cruz, La Chona, El Ranchito y El Apartadero, entre otros. En la zona no existen estaciones hidrométricas ni tampoco infraestructura hidráulica para el almacenamiento y control de las corrientes superficiales, sólo una pequeña presa ubicada en la porción centro-sur del acuífero, aproximadamente a 9 km al sureste del poblado La Gavia. La red de drenaje presenta un patrón dendrítico.

3.4 Geomorfología

La porción norte del acuífero se encuentra dominada por la Sierra San Carlos o La Chiquita, formada por la intrusión de granitos y sienitas sobre las rocas calizas cretácicas; presenta elevaciones que varían de 500 hasta 1800 msnm; al norte de esta sierra se presentan pliegues orientados en sentido este-oeste originados por el empuje de la intrusión que formó la Sierra de San Carlos.

Estas elevaciones se encuentran disectadas por numerosas cañadas y cañones. Las sierras presentan un desarrollo morfológico de madurez temprana que corresponde a antiformal y sinformales suaves y simétricas.

Los intrusivos forman estructuras cóncavas y lineamientos curvilineales. La región sur del acuífero presenta elevaciones de hasta 500 msnm y lomeríos cuya elevación varía de 200 a 300 msnm.

4 GEOLOGÍA

La distribución de las unidades litoestratigráficas en la Provincia de la Sierra Madre Oriental y Planicie Costera del Golfo, es el resultado de los eventos geológicos que definieron diferentes ambientes y medios de depósito a través del tiempo geológico (figura 2).

Durante el Jurásico ocurrió una trasgresión regional con variaciones locales que depositaron sedimentos marinos; las variaciones paleogeográficas locales dieron origen a diversas litofacies que constituyen las formaciones Olvido y La Casita (no afloran en el área del acuífero).

Durante el Cretácico, continúa el depósito de sedimentos marinos el cual culmina a finales de dicho periodo al emerger los sedimentos y ser plegados por la Orogenia Laramide, durante este periodo se depositaron las formaciones Tamaulipas Inferior (Cupido), Otates (La Peña), Tamaulipas Superior (Aurora), Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe y Méndez.

Posteriormente durante el Paleógeno-Neógeno, el intemperismo y erosión de las partes topográficamente altas dieron origen a los conglomerados, proceso que continúa hasta el reciente.

Formación Tamaulipas Inferior

Este nombre fue utilizado originalmente por L. W. Stephenson en 1921 para nombrar a una serie de calizas y dolomías de color gris claro con fractura aporcelanada, lentes y nódulos de pedernal ámbar a blanco, que afloran en el núcleo de la Sierra de Tamaulipas. Muir y Humphrey describen a esta formación como calizas de estratificación mediana a gruesa de color gris claro y gris oscuro con nódulos de pedernal, con dolomitización en su porción basal.

En el área del acuífero aflora en el Cañón Agua de Lumbre; se encuentra intrusionada en la Sierra Chiquita y el Cerro El Diente de la Sierra de San Carlos, donde está constituida por calizas de textura microcristalina y dolomitas de color gris a gris oscuro con líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación, en estratos que varían de unos centímetros a 2 m de espesor, con pequeños mantos de óxido de hierro interestratificados y lajeamiento perpendicular al rumbo de la estratificación.

Los escasos restos de microfósiles determinan condiciones de depósito de cuenca; se midió un espesor de 270 m en la Sierra de San Carlos. En el norte del país (Nuevo León y Coahuila) se correlaciona con la Formación Cupido.

Formación Otates

El nombre por Muir en 1936, para denominar el intervalo arcillo-calcáreo que separa estratigráficamente a los paquetes de calizas de las Formaciones Tamaulipas Inferior y Superior. Su localidad tipo se encuentra en el Cañón de los Otates, ubicado sobre el flanco occidental de la Sierra de Tamaulipas. Inicialmente se consideró como horizonte y posteriormente se le ha dado el rango de formación debido a su amplia extensión y significado en cuanto a la magnitud del evento geológico-sedimentológico que representa. Está constituida por calizas arcillosas de estratificación delgada en alternancia con lutitas, de estructura laminar ligeramente carbonosas, de color gris oscuro. Su espesor se estima de 6 a 13 m, hacia el Cerro del Diente se localiza marcadamente en los cañones circundantes.

En el norte del país (Nuevo León y Coahuila) se correlaciona con la Formación La Peña. Se le asigna una edad correspondiente al Aptiano Superior debido a la presencia del fósil índice *Dufrenoya Justinae*. Aflora en el Cerro del Diente.

Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Tamaulipas Inferior y Superior, respectivamente, y están definidos por el cambio de los cuerpos

de micrita de las formaciones encajonantes. Por su contenido fósil se asigna al Aptiano Superior y su ambiente de depósito es de mar abierto con aporte de terrígenos de áreas tectónicamente activas.

Formación Tamaulipas Superior

Este nombre fue introducido a la literatura geológica por la L.W. Stephenson en 1921, para designar una sección de calizas criptocristalinas de color crema claro y capas medianas, con líneas estilolíticas gruesas paralelas a los planos de estratificación y lentes de pedernal de color gris y castaño oscuro, cuya localidad tipo se localiza en la Sierra de Tamaulipas.

Es posible distinguir dos miembros: el inferior está representado por calizas de textura fina, de color crema en capas de espesor medio y ocasionalmente con lentes de pedernal; el miembro superior se compone de calizas de color amarillento, en capas de espesor delgado y con nódulos de pedernal de color gris. En el norte del país (Nuevo León y Coahuila) se correlaciona con la Formación Aurora. Aflora en el Cerro del Diente y en los cañones profundos de las sierras.

Formación Cuesta del Cura

Definida por Imlay, en la superficie cubierta por el acuífero está representada por una alternancia de calizas densas color gris y calizas arcillosas color gris con intercalaciones de lutitas calcáreas de color café claro, bandas y lentes de pedernal negro, en una estratificación ondulante y formando estructuras boudinage. Su espesor varía de 30 a 60 m y sus contactos inferior y superior son concordantes y transicionales con las formaciones Tamaulipas Superior y Agua Nueva, respectivamente. Aflora en el Cerro del Diente. Su ambiente de depósito está asociado a mares poco profundos en los que junto con la precipitación del carbonato de calcio se depositaron arenas, arcillas y sílice que formaron la gran cantidad de bandas de pedernal negro.

Formación Agua Nueva

Nombre que Stephenson (1921) dio a una sección de calizas con pedernal, intercaladas con lutitas negras carbonosas. En la zona están constituida por calizas arcillosas color café y gris oscuro, con alternancia de lutitas laminares color café rojizo en un espesor promedio de 180 m; su contacto es concordante y transicional con la Formación Cuesta del Cura sobre la que descansa.

Es común encontrar hacia la base de esta formación, capas de bentonita de color verde que sirven como horizonte índice para marcar su contacto inferior. Por su contenido faunístico, se le ha asignado una edad Cenomaniano-Turoniano y se le correlaciona con la Formación Indidura del noreste del país.

Formación San Felipe

Esta formación fue descrita inicialmente por Jeffreys en 1910, en su localidad tipo de la ranchería de San Felipe y San Luis Potosí, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, donde consiste de calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentoníticas de colores verde y gris claro. Su espesor promedio es de 130 m y se correlaciona con la Formación Parras en el estado de Coahuila. Está constituida por una alternancia de calizas y lutitas grises que presentan intercalaciones de calizas arcillosas, margas de color gris y verde, así como bentonita. En el área se encuentra sobre los flancos de las sierras. Subyace a la Formación Méndez cuyo contacto es transicional y sobreyace a la Formación Agua Nueva en forma concordante.

Formación Méndez

Es el nombre que Jeffreys utilizó, para describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris azulado 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 está representada por lutitas de fractura concoidal con aislados estratos de areniscas de grano fino color café. Su fracturamiento es típico por el intemperismo, produciéndose un intenso lajamiento y pizarrosidad, dando origen a montículos con apariencia de dunas, subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales.

Su espesor promedio es de 300 m y en el estado de Coahuila se correlaciona con la Formación Difunta. 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.

Formación Reynosa

Unidad litoestratigráfica constituida por un conglomerado de cantos de caliza y rocas ígneas, bien empacados por un cementante calcáreo. Presenta un color gris claro y son poco resistentes al intemperismo.

Tiene un espesor muy variable, pero generalmente pequeño de 2 a 15 m, forma lomeríos redondeados. Su depósito se llevó a cabo por corrientes fluviales y se encuentra cubriendo discordantemente a rocas preexistentes, principalmente del Cretácico Superior.

Rocas Ígneas Intrusivas

Aflora en la porción noroeste del acuífero, conformando la estructura de mayor realce topográfico en la región que es la Sierra de San Carlos considerada como un cuerpo ígneo batolítico de composición mineralógica desde alcalina hasta calcoalcalina, de edad paleógena-neógena. Se considera que los Cerros Sacramento y Libro de Oro, son apófisis de este batolito por su composición mineralógica de sienitas; hacia la parte Norte varía su composición a gabroica. El complejo alcalino presenta una textura fanerítica de grano grueso a medio con manchas oscuras por el contenido de minerales máficos.

Las rocas ígneas intrusivas se presentan en forma de lacolitos, stocks, apófisis, diques y sills; representan cuatro fases de intrusión, la primera corresponde a cuerpos de composición diorítica-cuarzomonzonítica que aflora en el área del Patado.

La segunda está representada por intrusivos de composición granodiorítica-sienítica que afloran al poniente del acuífero y en los cerros del Diente, El Jatero y El Sacramento. La tercera corresponde a cuerpos de gabros que afloran de manera alineada, cruzando diagonalmente. Por último cuerpos de diabasa afloran en la región noreste. A todas ellas se les asigna una edad Oligoceno por su posición estratigráfica.

Discordantemente sobre las rocas antes mencionadas afloran rocas traquíticas en el cerro El Sacramento, que por su posición estratigráfica se les asigna una edad Mioceno-Plioceno; cubriendo parcialmente a las unidades sedimentarias se presentan derrames de basalto.

El emplazamiento de los cuerpos ígneos neógenos ocasionó la formación de pequeñas áreas de metamorfismo en el contacto intrusivo-roca sedimentaria originando skarns en los Cerros del Diente y El Patado; mármol en el Cerro del Diente; y en la periferia de algunos apófisis de intrusivos donde la litología dominante son lutitas o margas sobre las calizas, se aprecia el desarrollo de hornfels (Carta Geológica-Minera G14-D61 "San Carlos", SGM, 2000).

Aluvión Cuaternario

Está representado por abanicos aluviales, terrazas y depósitos granulares, constituidos principalmente por arcillas y gravas, producto de la erosión de las rocas calcáreas que constituyen las sierras, que se acumularon en las partes topográficamente más bajas. Su espesor es muy reducido en los valles, menor de 20 m, y aumenta un poco en los cauces fluviales.

4.2. Geología estructural

La posición, modelo y fisiografía de las montañas que forman la Sierra de San Carlos, son el resultado de un desarrollo estructural sujeto a una serie de disturbios ocurridos a principios del Paleógeno-Neógeno.

Regionalmente, las deformaciones orogénicas del Cretácico y principios del Paleógeno coinciden con un cambio en el movimiento de las placas tectónicas, ya que la Placa de Norteamérica y la Placa Paleopacífica que convergen de manera oblicua empezaron a realizarlo frontalmente y con mayor velocidad. Tardy supone la existencia de una cabalgadura de dirección Norte-Noreste de centenares de kilómetros que coloca la secuencia pelágica de la cuenca interna (Mesa Central y Cadena de la Sierra Madre Oriental) sobre las Plataformas San Luis-Valles y Coahuila, con secuencias arrecifales y subarrecifales; el modelo de este autor, presume el desprendimiento de la secuencia de la cuenca interna a partir del nivel de los yesos oxfordianos y establece la posibilidad de que el basamento pueda formar parte de este fenómeno tectónico.

Se estima que las características tectónicas de las estructuras que constituyen la Sierra de San Carlos son primeramente reflejo de la existencia de esfuerzos compresionales que produjeron un levantamiento y suave plegamiento en dirección E-W, paralelo a los ejes de las estructuras anticlinales y sinclinales.

El segundo periodo de desarrollo estructural, se debió a una intensa actividad ígnea, en donde la secuencia sedimentaria de Edad Cretácica fue intrusionada, provocando su arqueamiento y originando estructuras dómicas, que son incongruentes con los pliegues causados por la actividad orogénica, el tercer período lo constituye la actividad volcánica (derrames de basalto, latitas y traquitas) que cubren a las rocas anteriores y se considera un evento más tardío atribuido a un fenómeno de distensión.

Las rocas y estructuras mencionadas anteriormente se encuentran afectadas por fallas inversas, formadas como consecuencia de los plegamientos, se encuentran también un gran número de fallas de tipo normal. Así mismo se tiene algunas fracturas y diques que afectan las rocas de la Formación Méndez. La geología estructural se explica dentro de un modelo de tectónica de placas, relacionado con la apertura del Golfo de México. Esta evolución inició en el Pérmico-Triásico con el evento orogénico Ouachita – Marathon, seguido por el rompimiento de la Pangea durante el Triásico Superior al Jurásico Medio, lo que dio origen a una margen pasiva que duró hasta el Cretácico Superior.

Esta evolución culmina con la deformación iaramídica durante el Neógeno Temprano (Padilla y Sánchez, 1986). Las estructuras presentes muestran bajo grado de deformación y están constituidas sólo por antiformas y sinformas muy abiertas, de pendientes suaves, que se orientan en dirección NW-SE. Tectónicamente el Terreno Coahuila tiene su posible origen en la Orogenia Ouachita-Marathon-Apalachiana, originada por la colisión entre África-América del Sur y América del Norte, durante el Pensilvánico-Pérmico (Graham *et al*, 1975). Este evento de colisión produjo acreción de terrenos tipo flysch, depósitos de mar profundo, depósitos vulcanosedimentarios e intrusiones tipo arco contra América del Norte, que se supone ocurrieron por obducción, presentando metamorfismo de bajo grado. Estos terrenos constituyen el basamento de la región oriental de México (Carta Geológica-Minera G14-D61 “San Carlos”, SGM, 2000).

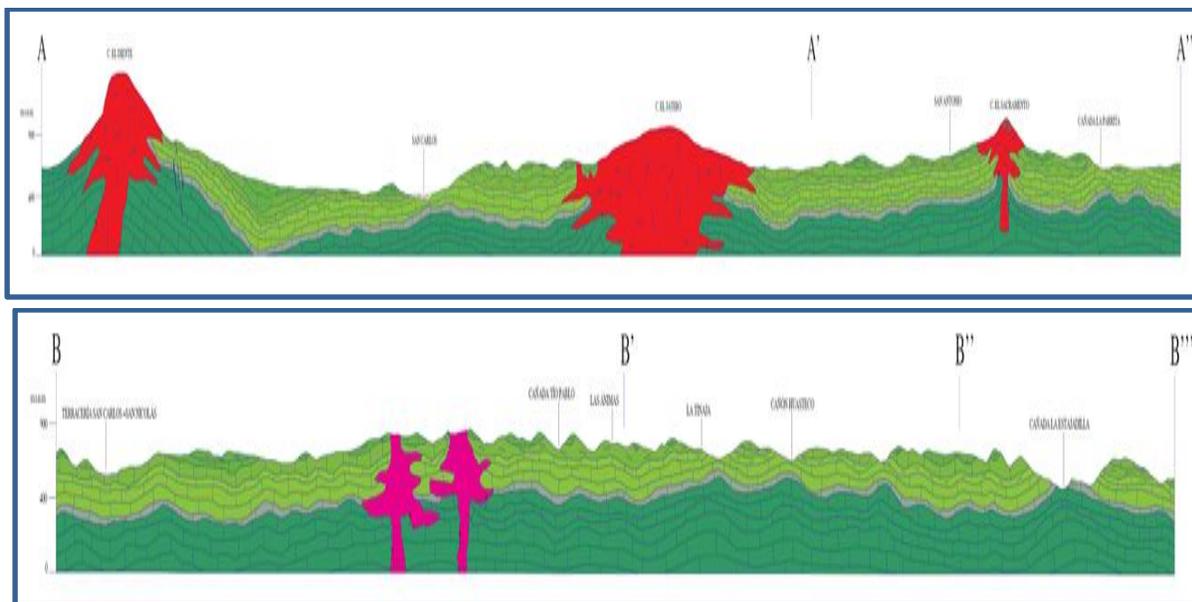
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información hidrogeológica y de la geología superficial recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variable y conglomerados, de permeabilidad baja a media, que constituyen los valles y los piedemonte.

La porción inferior está conformada por los depósitos clásticos del Conglomerado Reynosa así como la secuencia de lutitas y margas de las formaciones Méndez, San Felipe y Agua Nueva, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Este es el acuífero que actualmente se explota, de bajo rendimiento, que generalmente proporciona caudales inferiores a 5 lps.

Las calizas de las formaciones Cuesta del Cura y Tamaulipas Superior, constituyen horizontes acuíferos profundos que no han sido explorados en la zona. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias al desaparecer el fracturamiento, así como los distintos tipos de rocas metamórficas y rocas ígneas intrusivas. A mayor profundidad las barreras al flujo subterráneo y el basamento están representadas por las calizas arcillosas y lutitas que conforman la Formación Otates.

En la figura 3 se presentan dos secciones geológicas esquemáticas, ubicadas en la porción centro-este del acuífero, que muestran la disposición de las unidades geológicas del subsuelo.



Fuente: Carta Geológica-Minera G14-D61 "San Carlos", SGM, 2000. Escala 1:50,000

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

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 muy reducido y presentan permeabilidad generalmente baja.

La porción inferior se aloja en los depósitos del Conglomerado Reynosa y en lutitas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Debido a la alternancia de secuencias arcillo-calcáreas es posible inferir la presencia de horizontes acuíferos confinados en las calizas cuyas áreas de recarga se localizan en las sierras limítrofes del valle, los cuales no han sido explorados aún.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 15 pruebas de bombeo de corta duración en etapa de abatimiento y recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **0.01** a **$35.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un valor promedio de **$6.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , pero con predominio de valores inferiores a $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de **0.000000145** a **0.000732 m/s** con un valor promedio de **0.000157 m/s**. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento. Debido a los materiales que constituyen la parte superior del acuífero, se le asignó un valor de rendimiento específico de **0.01**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información piezométrica correspondiente a los años 2007 y 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

Debido a que la posición de los niveles del agua subterránea no registró cambios significativos en el periodo 2007 - 2010, las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático presentan prácticamente la misma posición y distribución geográfica. Por esta razón únicamente se describen las configuraciones correspondientes al año 2010.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo a la configuración de profundidad al nivel estático para 2010, mostrada en la figura 4, se observa que los valores varían de 2 a 32 m, aumentando gradualmente a lo largo del cauce de los ríos y arroyos y hacia los flancos de las elevaciones que los encajonan, conforme se asciende topográficamente.

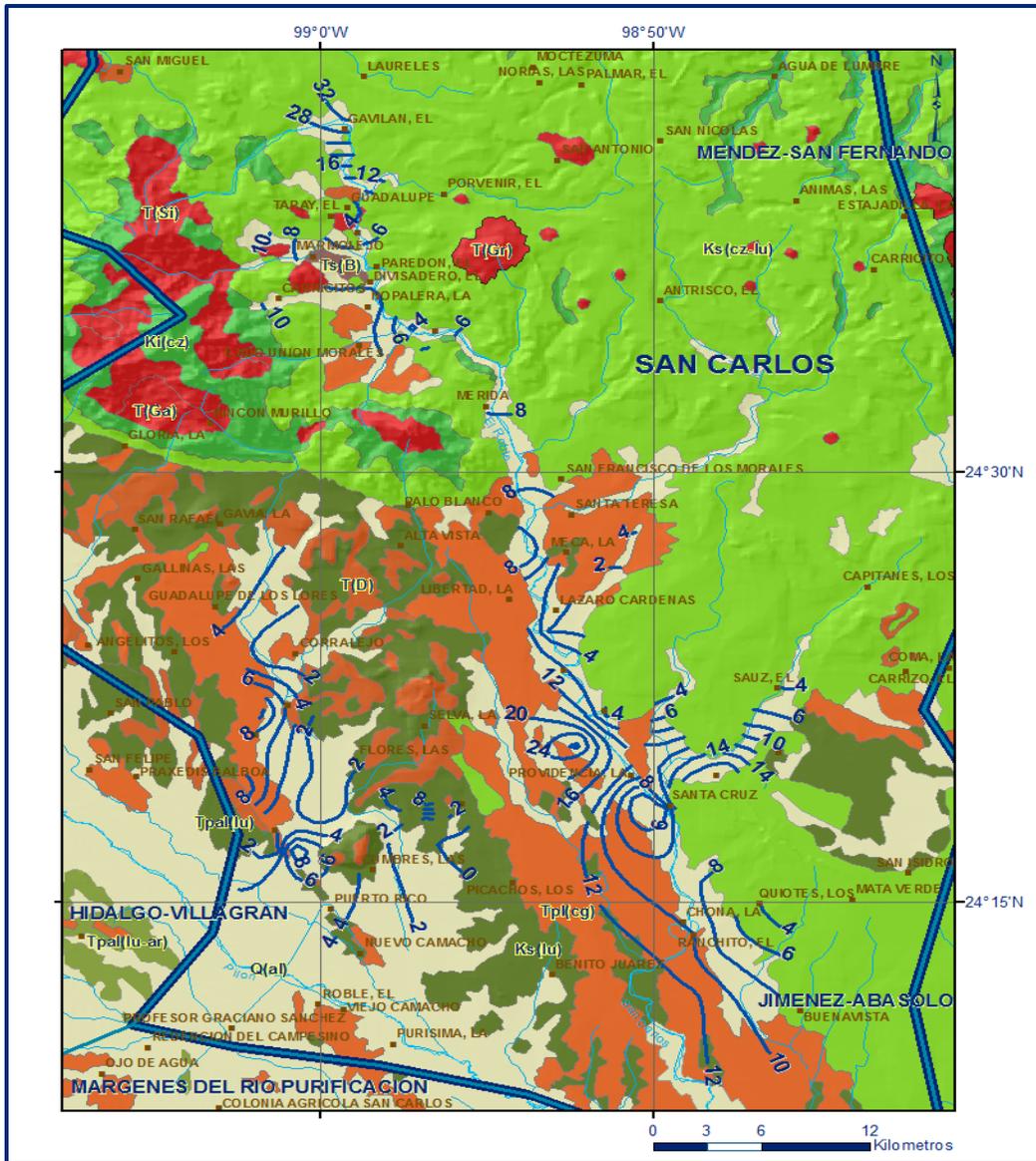


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

Las mayores profundidades se presentan en las inmediaciones de ejido El Gavilán y los valores más someros se registran en la porción sur del acuífero, hacia el límite con el acuífero Márgenes del Río Purificación y hacia la presa “Vicente Guerrero”.

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, mostrada en la figura 5, se observa que los valores varían entre 560 a 150 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad.

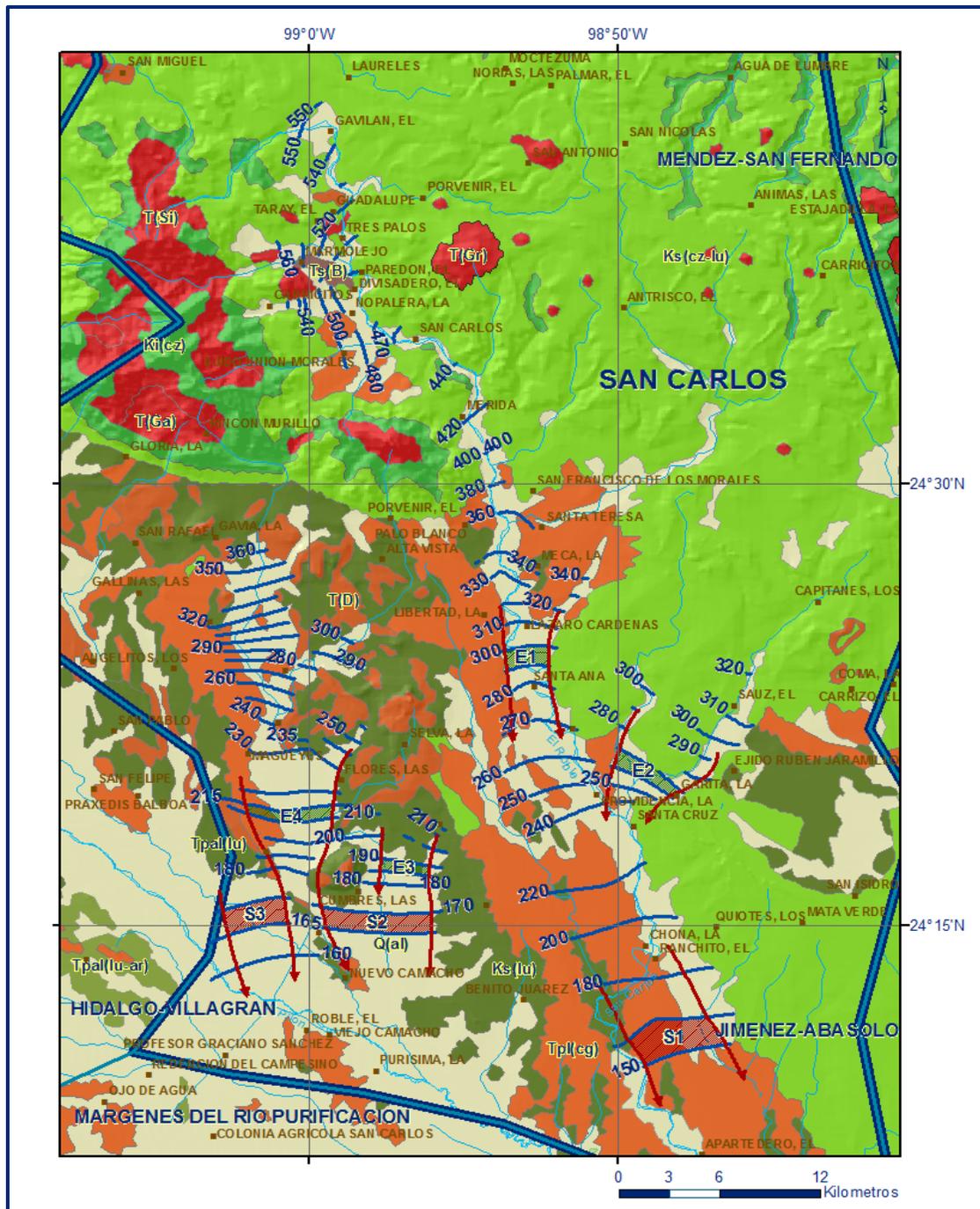


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

Los valores más altos se localizan en el Ejido Marmolejo desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía hacia el sur y sureste hasta el ejido Buenavista, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur, paralelo a la dirección de escurrimiento del río San Carlos.

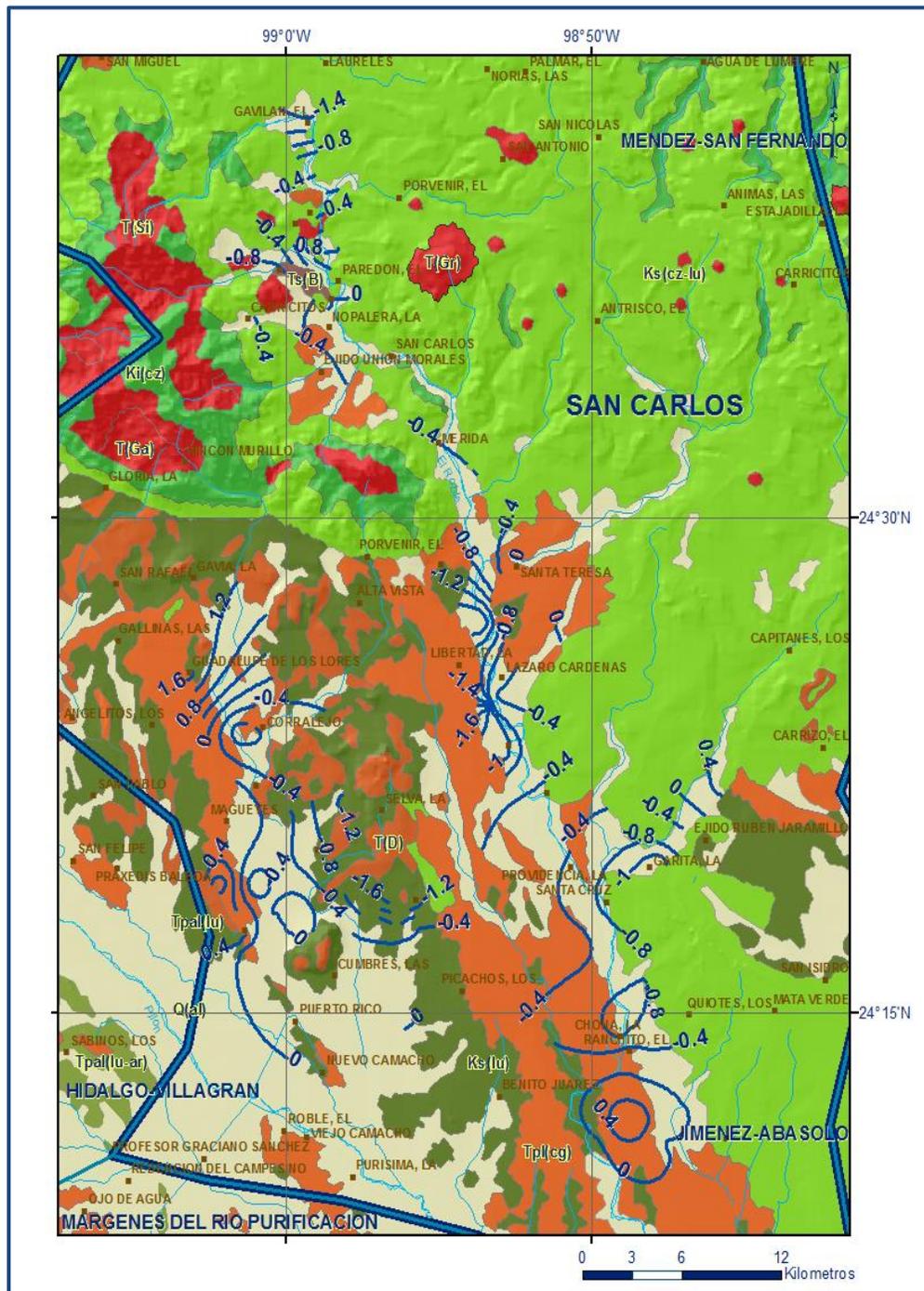


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2007-2010)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 52 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (34 pozos, 18 norias), para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron: Temperatura (°C), Potencial de Hidrogeno (pH), Conductividad Eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$) y Sólidos Totales Disueltos (mg/l), para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

En general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece 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, sólo en algunos aprovechamientos emplazados en caliza y lutitas se excede el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido por la norma para consumo humano. La concentración de los STD varía de 280 a 2000 ppm, los valores se incrementan de sur a norte, en la dirección preferencial del flujo subterráneo.

De acuerdo con los iones dominantes, predomina la familia del agua bicarbonatada-cálcica que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas calizas.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el censo de aprovechamientos realizado en 2010, se registró la existencia de 127 aprovechamientos, de los cuales, 49 son norias y 78 pozos. Del total 111 aprovechamientos se encuentran activos (43 norias y 68 pozos) y 16 inactivos.

El volumen de extracción estimado es de **1.6 hm^3** anuales, de los cuales 1.0 hm^3 (62.5%) se destinan al uso agrícola, 0.4 hm^3 más (25.0%) para uso público-urbano y 0.2 hm^3 (12.5%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó con información para el periodo 2007-2010, en un área total de **330 km^2** del acuífero que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos

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

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 de un acuífero:

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

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

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, la baja permeabilidad del suelo y el riego agrícola es incipiente, se considera que para fines del balance de aguas subterráneas no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

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 las salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$E_h + R_v - S_h - B - E_{TR} = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Dónde:

Eh: Entrada por flujo subterráneo horizontal;

Rv: Recarga vertical;

B: Bombeo;

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ETR: Evapotranspiración;

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen almacenado;

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

$$Rv = Sh + B + ETR - Eh \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

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.

Las entradas al acuífero, tienen su origen en las zonas de recarga localizadas en las sierras que rodean al valle.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para 2010, mostrada en la figura 5.

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:

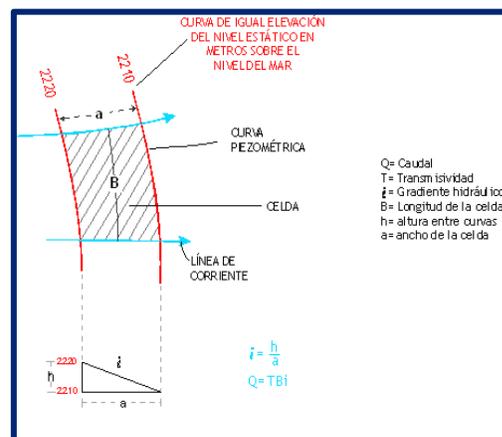
$$Q = T * B * i$$

Donde:

T = Transmisividad en el canal de flujo

B = Largo del canal de flujo

i = Gradiente hidráulico



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se pueden observar que el volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **6.7 hm³/año**.

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	2400	1200	10	0.008333	0.0025	0.0500	1.6
E2	4000	1000	10	0.010000	0.0030	0.1200	3.8
E3	4000	1000	10	0.010000	0.0005	0.0200	0.6
E4	5200	1200	10	0.008333	0.0005	0.0217	0.7
Total entradas							6.7

7.2 Salidas

Las descargas ocurren principalmente por las salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh), bombeo (B), evapotranspiración (ETR) y también un volumen se descarga como caudal base (Q_b).

7.2.1 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 para 2010, mostrada en la figura 5. El valor de las salidas subterráneas, como se muestra en la tabla 3, asciende a **4.4 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo

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	4800	2000	10	0.005000	0.005	0.1200	3.8
S2	6000	1200	5	0.004167	0.0005	0.0125	0.4
S3	4400	2000	5	0.002500	0.0005	0.0055	0.2
Total entradas							4.4

7.2.2 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.

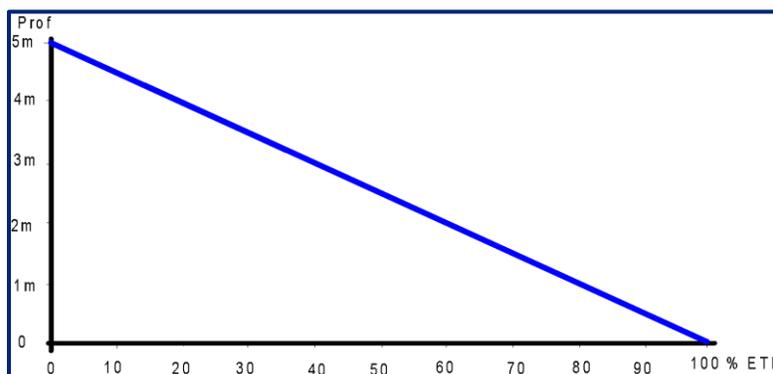
Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR (mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	22.5		
P(mm) =	774.1	P ² =	599230.81
L =	1432.03125	L ² =	2050713.5
ETR (mm)	709.0		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior.

Tomando en cuenta una superficie de 60 km² con niveles freáticos someros inferiores a 5 m, en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y una lámina de evapotranspiración obtenida de 709 mm. Por lo tanto **ETR = 17.0 hm³/año.**

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción de agua subterránea es de **1.6 hm³ anuales.**

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se utilizó la configuración de la evolución del nivel estático para el periodo 2007-2010 que se muestra en las figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.1, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión

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

Donde:

ΔVS : Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²)

h: Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Considerando un abatimiento promedio anual de 0.10 m en los 330 km² del área de balance y un valor de rendimiento específico de 0.01, se obtiene un volumen de cambio de almacenamiento que asciende a **- 0.3 hm³.**

Solución de la ecuación de balance

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

$$Rv = Sh + B + ETR - Eh \pm \otimes V(S) \quad (2)$$

$$Rv = 4.4 + 1.6 + 17.0 - 6.7 - 0.3$$

$$Rv = 16.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

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

$$Rt = Eh + Rv$$

$$Rt = 6.7 + 16.0$$

$$Rt = 22.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **22.6 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 **5.1 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 **5,466,416 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 22.6 - 5.1 - 5.466416 \\ \text{DMA} &= 12.033584 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **12,033,584 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2007. Actualización de mediciones piezométricas en el acuífero (2804) San Carlos, estado de Tamaulipas, realizado para la por la Empresa DSK Technologies, S. A. de C.V.