

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL CARMEN-SALINAS-VICTORIA
(1924), ESTADO DE NUEVO LEÓN**

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	6
3.3 Hidrografía.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	8
5. HIDROGEOLOGÍA.....	14
5.1 Tipo de Acuífero	14
5.2 Parámetros hidráulicos	16
5.3 Piezometría.....	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2 Elevación al nivel estático.....	19
5.4.3 Evolución de los niveles estáticos.....	20
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	24
7.1 Entradas.....	24
7.1.1 Recarga natural.....	24
7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (Eh)	25
7.1.3 Recarga inducida (Ri)	26
7.2 Salidas	26
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	26
7.2.2 Bombeo (B).....	27
7.2.3 Manantiales (Dm).....	28
7.2.4 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	28
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	29
8. DISPONIBILIDAD	30
8.1 Recarga total media anual (R).....	30
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	30
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	31
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	31
9. BIBLIOGRAFÍA	32

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 El Carmen-Salinas-Victoria, definido con la clave 1924 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro del estado de Nuevo León, entre los paralelos 25° 34' y 26° 20' de latitud norte y entre los meridianos 99° 39' y 100° 37' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 3,587 km²(figura 1).

Limita al norte con los acuíferos Lampazos-Villa Aldama, Sabinas Paras, al noreste con el acuífero Agualeguas-Ramones, al este con los acuíferos China-General Bravo y Campo Papagayos, al sur limita con los acuíferos Citrícola Norte, Área Metropolitana de Monterrey y Campo Topo Chico, al suroeste con el acuífero Campo Durazno, al oeste con el Campo Mina y al noroeste con el acuífero Campo Jaritas. En su interior se ha diferenciado otro acuífero denominado Campo Cerritos

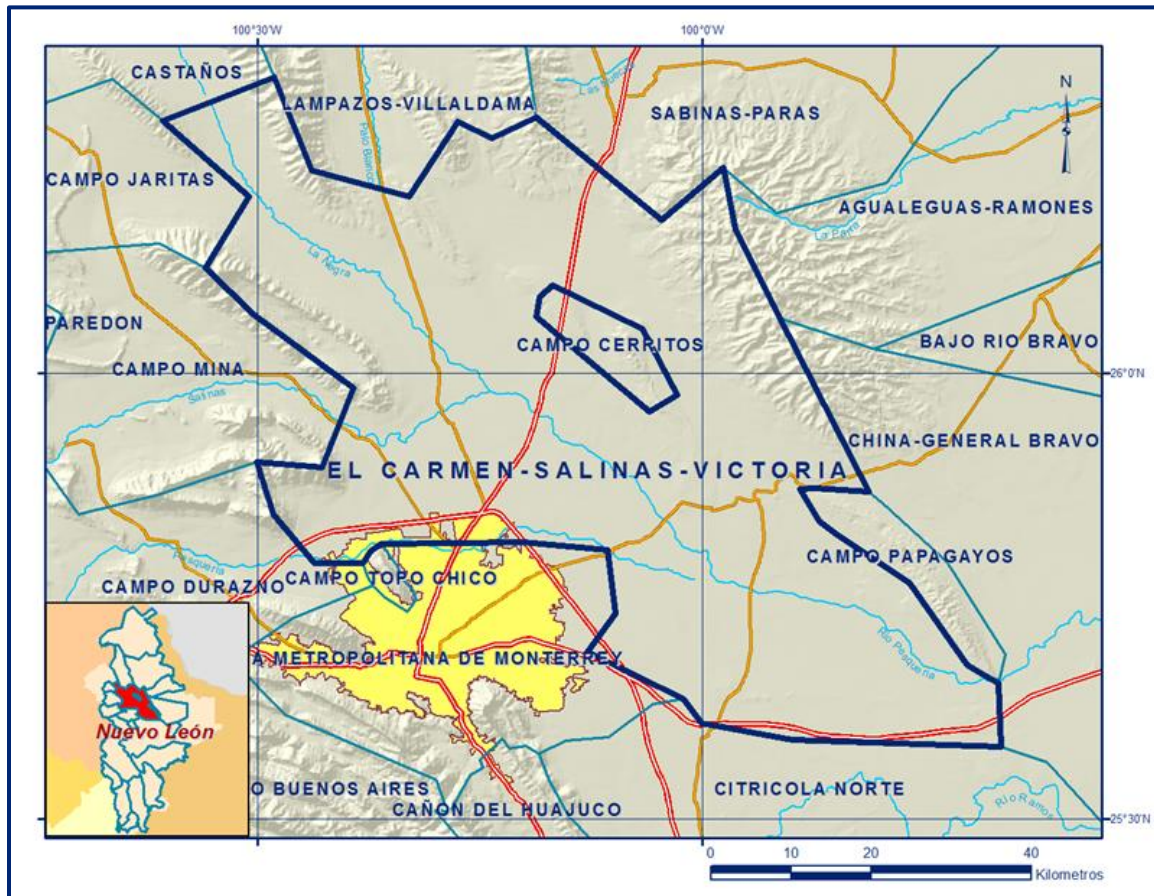


Figura 1. Localización del acuífero.

El acuífero El Carmen-Salinas-Victoria, se localiza a 35 km al norte de Monterrey, este sistema acuífero abarca una extensión de 3,618 km² de superficie total. Geopolíticamente comprende en su totalidad los municipios de El Carmen, Ciénega de Flores, General Zuazua y Pesquería y parcialmente los municipios Marín, Salinas Victoria, Hidalgo, Abasolo, General Escobedo, Apodaca, Higuera, Doctor González, Los Ramones, Cadereyta Jiménez, Juárez, Mina y García. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero.

ACUÍFERO 1924 EL CARMEN-SALINAS-VICTORIA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	100	10	55.1	26	5	12.3
2	100	11	9.2	26	3	48.3
3	100	3	32.5	25	57	26.4
4	100	2	52.0	25	57	52.3
5	100	1	40.0	25	58	32.8
6	100	4	0.3	26	3	0.7
7	100	10	2.5	26	5	56.2
8	99	53	55.8	25	35	20.3
9	100	0	3.5	25	36	24.4
10	100	1	16.9	25	38	5.3
11	100	7	43.5	25	41	14.3
12	100	5	48.9	25	43	49.3
13	100	6	21.2	25	48	5.4
14	100	12	2.9	25	48	36.4
15	100	21	36.7	25	48	31.9
16	100	22	19.2	25	48	3.4
17	100	22	53.0	25	47	12.7
18	100	26	6.9	25	47	11.9
19	100	28	53.9	25	50	29.6
20	100	29	59.7	25	54	0.5
21	100	25	37.4	25	53	39.4
22	100	23	31.0	25	59	2.4
23	100	30	11.9	26	3	55.4
24	100	33	27.7	26	7	7.0
25	100	30	34.2	26	11	53.9
26	100	36	22.1	26	17	1.5
27	100	28	49.6	26	19	58.5
28	100	26	19.9	26	13	40.3
29	100	19	45.9	26	11	55.9
30	100	16	26.3	26	16	57.2
31	100	14	11.4	26	15	53.1
32	100	11	10.5	26	17	15.8
33	100	2	43.4	26	10	20.2
34	99	58	32.9	26	13	53.4
35	99	57	43.5	26	9	41.1
36	99	54	45.4	26	3	43.7
37	99	48	47.1	25	52	2.9
38	99	52	23.4	25	52	15.6
39	99	53	23.2	25	52	14.2
40	99	52	6.7	25	50	1.8
41	99	50	57.4	25	49	9.4
42	99	45	59.8	25	45	53.3
43	99	42	7.3	25	40	21.6
44	99	40	58.4	25	39	37.5
45	99	40	2.6	25	39	9.1
46	99	39	51.7	25	34	48.8
1	100	10	55.1	26	5	12.3

1.2 Situación administrativa del acuífero

La porción poniente del acuífero se encuentra vedada, mediante un decreto tipo II que amplía la zona vedada para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los terrenos que ocupa y circundan la ciudad de Monterrey, N. L., publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de diciembre de 1956. En su artículo primero menciona, que se amplía la zona vedada para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los terrenos que ocupa y circundan la ciudad de Monterrey, Estado de Nuevo León, a que se refiere el decreto de fecha 27 de junio de 1951, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 17 de julio del mismo año, para incluir también los terrenos comprendidos dentro de la poligonal que ahí se describe.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

a) En las oficinas de la Gerencia de Aguas Subterráneas en la Ciudad de México y en la Gerencia Regional VI, Río Bravo en Monterrey, Nuevo León, únicamente existe información de registros de pozos perforados por la SARH de 1975 a 1982 en los municipios de Guadalupe (fuera del área), Cadereyta-Jiménez, Doctor González, Pesquería, El Carmen, Monterrey, Santa Catarina y Salinas Victoria. No se han realizado estudios hidrogeológicos previos.

b) Reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos de los valles de: Sabinas-Paras, El Carmen-Salinas Victoria y Citrícola Sur, en el estado de Nuevo León. Contrato GAS-001-PRO 03. Realizado por la Compañía Lesser y Asociados, S, A. de C. V. en el 2003, para la Comisión Nacional desagua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Exploración y Monitoreo Geohidrológico.

En donde se estableció una red de monitoreo piezométrico que incluyo 64 puntos de medición. Con los datos de la profundidad al nivel estático medidos en noviembre del 2003 en los pozos que constituyen la red piezométrica, se trazó una configuración, observándose que esta fluctúa entre 5 y 10 m de profundidad. Las cotas de los brocales de los pozos que integran la red piezométrica fueron obtenidas mediante interpolación de las curvas de las cartas topográficas del INEGI escala 1:50 000.

A partir de las cotas de los brocales y las profundidades medidas en cada pozo, se obtuvo la elevación del nivel estático la cual se configuro, trazando curvas que van desde 400 msnm ubicadas en la parte central norte del área de estudio, (alrededor de Doctor González) y que disminuyen gradualmente hacia el sur y sureste para llegar a bajar hasta la cota 220 msnm. El flujo subterráneo presenta una dirección de circulación NNW al SSE, a la altura de Doctor González. En la parte sur, entre el Fraccionamiento Campestre Los Girasoles y la refinería de PEMEX, el agua subterránea circula con una dirección oeste-este.

En esta zona no se contó con información piezométrica de años anteriores, que permitiera obtener valores y evolución del nivel estático respecto al tiempo.

c) Actualización Hidrogeológica del acuífero El Carmen-Salinas Victoria, N. L. Contrato GAS-006-PRO04. 2004. Realizado por la compañía Desarrollo y Sistemas, S. A. Para la Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Y cuyos principales resultados son los que se tomaron como base para realizar el presente documento y que fueron revisados en su debido momento durante la realización del estudio.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

La zona se ubica en dos provincias fisiográficas (Raisz, 1964), la V denominada “Sierra Madre Oriental” que cruza la zona del acuífero de sureste a noroeste, abarcando la mitad norte de la misma. La otra provincia es la VIII “Llanura Costera del Golfo Norte” que abarca la mitad restante.

La provincia fisiográfica V, a su vez está representada en la zona por la subprovincia 23 denominada “Sierras y Llanuras Coahuilenses”, que abarca una superficie dentro de la poligonal del acuífero de 2,193.5 km² (60%). La provincia fisiográfica VIII a su vez se encuentra diferenciada en el área por la subprovincia fisiográfica 36 “Llanuras y Lomeríos”; que cubre una superficie de 1,682.5 km² (40 %) dentro de la zona de influencia del acuífero.

Las topoformas existentes en la zona son básicamente tres: las sierras ubicadas al norte y noreste, son las que configuran el parteaguas de la cuenca hacia al norte; los lomeríos (ubicados al este, sureste y sur), son los que le dan forma a la cuenca y contienen al sistema acuífero El Carmen-Salinas-Victoria, además de funcionar como zonas de recarga al acuífero; mientras que la llanura se extiende en la parte central de la cuenca y es aquí en donde se localiza la zona de explotación del acuífero; esta llanura además, corresponde a una planicie aluvial.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de climas de Köppen, modificados por E. García (1964), se presentan dos grupos de climas dentro del área: el Grupo de clima seco (B) que ocurre en el 65% del área y el Grupo de clima templado (C) que se manifiesta en el 35% restante del área. A su vez el grupo de clima seco (B) presenta dos tipos de climas uno semiseco (BS1), con lluvias de verano y escasas a lo largo del año y otro tipo de clima seco (BS0), con lluvias de verano y escasas en todo el año.

Dentro del primer tipo (BSI) se presentan a su vez en el área dos subtipos, el primero es el subtipo semiseco semicálido (BSI hw) con lluvias en verano en donde el porcentaje de precipitación invernal está entre 5 y 10.2 y los inviernos son cálidos. El siguiente subtipo de clima es el semiseco muy cálido y cálido (BSI (h') hw), con lluvias en verano y en donde el porcentaje de precipitación invernal está entre 5 y 10.2 y los inviernos son cálidos. Por lo que respecta al tipo de clima Seco (BSo), se presenta dentro del área en forma de dos subtipos, el primero es el subtipo seco semicálido (BSo hw) con lluvias en verano y en donde el porcentaje de precipitación invernal está entre el 5 y 10.2% y los inviernos son frescos. El subtipo siguiente es el seco muy cálido y cálido (BSo (h') hw) con lluvias en verano y en donde el porcentaje de precipitación invernal es entre 5 y 10.2% y los inviernos son cálidos.

El grupo de clima templado se manifiesta de la forma del subgrupo de climas semicálidos ((A)C) en donde la temperatura media anual es mayor de 18° C y la temperatura del mes más frío es entre -3 y 18° C. Este subgrupo ocurre en el 35.2% del área en forma de dos tipos, el primero es el tipo semicálido subhúmedo con lluvias escasas todo el año ((A)Cx') y en donde el porcentaje de lluvia invernal es menor de 18%; el siguiente tipo se presenta en una muy pequeña superficie del área (1.6%); este tipo es el semicálido subhúmedo con lluvias en verano ((A)C(Wo)), agrupa los subtipos menos húmedos de los semicálidos subhúmedos y en donde la precipitación del mes más seco es menor de 40 mm y la precipitación invernal es entre 5 y 10.2%.

3.3 Hidrografía

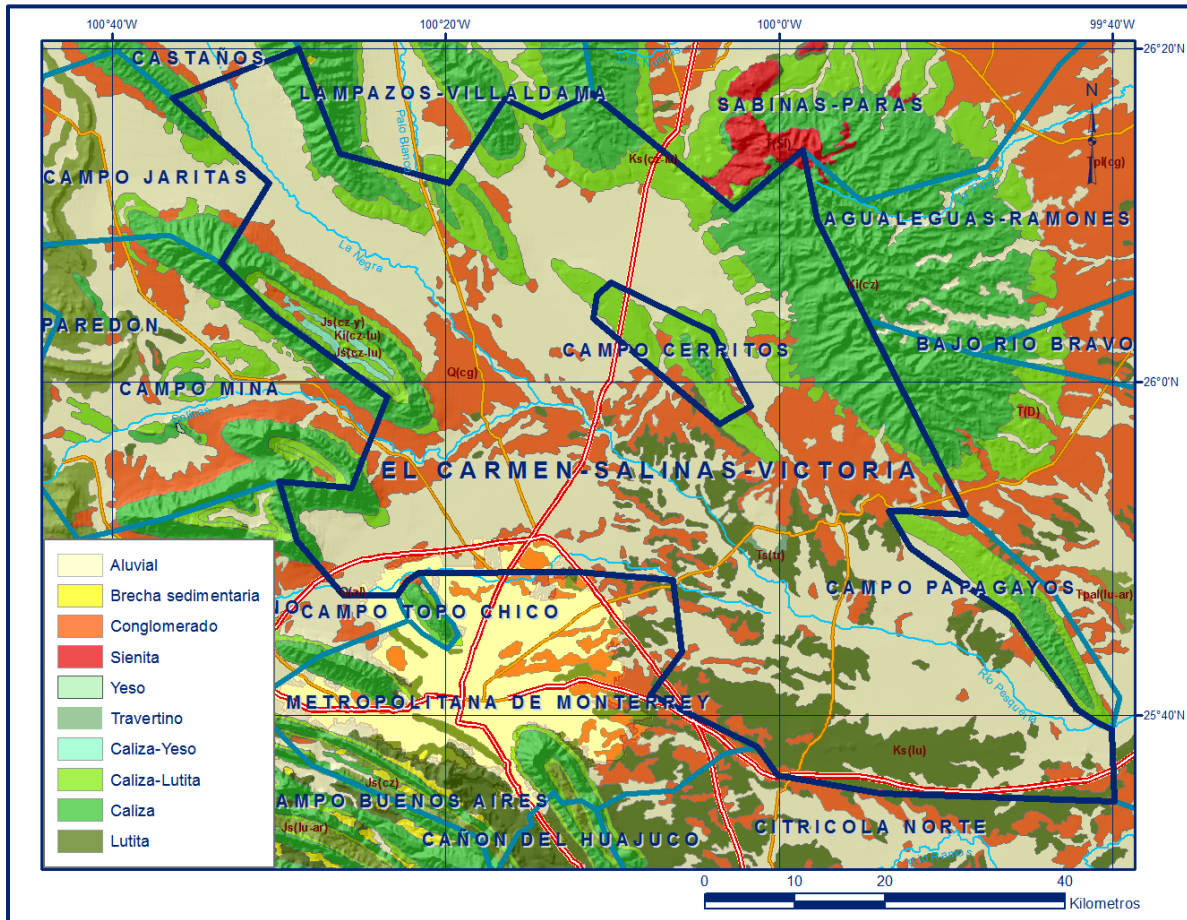
El acuífero se ubica en la región hidrológica Bravo-Conchos específicamente en la Cuenca Río Bravo-San Juan, delimitado por el parteaguas de esta cuenca hacia el norte, abarcando una superficie cuyas coordenadas geográficas extremas son: 26° 20' y 25° 30' de latitud norte y 99° 40' y 100° 40' de longitud oeste.

Los principales ríos que existen dentro de los límites geográficos del acuífero son: El río La Negra que confluye con el Río Salinas, existe otro río llamado Doctor González que junto con el anterior se incorporan dentro del área al Río Pesquería que es el más importante.

Fuera de la zona, el Río Pesquería confluye con el Río San Juan antes de llegar a la localidad de Doctor Coss, finalmente éste último río se incorpora al Río Bravo que desemboca en el Golfo de México. No existe dentro del área cuerpos de agua superficial de importancia.

4. GEOLOGÍA

Las rocas que afloran en el área son exclusivamente sedimentarias, cuyas edades varían del Jurásico Superior al Holoceno (figura 2).



Calloviense-Oxfordense

Caracterizado por la Formación Minas Viejas, la cual se localiza dentro del área, en la Sierra Minas Viejas que limita a la zona por el noroeste. Esta formación se caracteriza por la presencia de yesos y lutitas. También aflora en la Sierra San Miguel, en forma de yesos. En el plano geológico aparece en color azul con la clave Js (Y).

Oxfordense-Kimmeridgense

Aflora en el área como Formación Zuloaga, la cual se caracteriza por la presencia de calizas dolomitizadas y en algunas ocasiones con intercalaciones de yesos.

Se localiza en la Sierra Minas Viejas al noroeste de la zona y en el interior de la sierra de San Miguel, sobreyaciendo a los Yesos de la Formación Minas Viejas. La formación Zuloaga tiene su localidad tipo en la Sierra Sombreretillo, al norte de Melchor Ocampo, Zac. Esta misma formación también aflora en la Sierra de La Silla y está representada por calizas dolomitizadas. En el plano geológico se representa en azul con la leyenda Js (cz-lu).

Thitonense

Aflora en el área como la Formación Pimienta caracterizada como calizas arcillosas de color gris oscuro a negro y lutitas calcáreas de color negro, con lentes y bandas de pedernal negro y algunas intercalaciones de margas grises. Lateralmente existe un cambio de facies hacia la Formación La Casita, ya que la Formación Pimienta se formó en un ambiente de aguas más profundas. Esta formación aflora en la Sierra Minas Viejas, localizada al oeste-noroeste. También se localiza en la Sierra de Gomas, la cual se ubica al noroeste. En el plano geológico está representada esta formación en color azul con la clave Js (lu).

También a esta edad corresponde la Formación La Casita, la cual está caracterizada por la presencia de areniscas calcáreas de color gris y grano medio, margas arenosas gris oscuro y calizas arcillosas grises y negras. Se localiza en las sierras del sur de Monterrey y en la Sierra de La Silla. En el plano geológico se representa en color azul con la leyenda Js (lu-ar). La localidad tipo de esta formación se localiza en el Cañón de la Casita a 50 km al SW de Saltillo, Coahuila. Las rocas de estas edades afloran en las sierras que limitan por el sur a la Ciudad de Monterrey, así como en el interior de la Sierra de Los Frailes que se limita a la zona por el suroeste y en la Sierra de Minas Viejas que limita por el oeste y en el interior de la Sierra de Gomas.

Cretácico

Se encuentra presente prácticamente en toda el área y ha sido cortado por pozos incluso formaciones del Cretácico Inferior a más de 1390 m de profundidad.

Cretácico Inferior

Está representado en la zona por las formaciones: Tamaulipas Inferior, Taraises, Cupido y La Peña. Todas estas formaciones afloran en el área, con excepción de la Formación Tamaulipas Inferior, la cual únicamente se encontró en el subsuelo a una profundidad mayor de 1390 m.

Berriasiense – Barremiense

Formación Tamaulipas Inferior. Esta formación fue cortada por el pozo Gomas 3 que se localiza al noroeste de la zona, justo en la porción suroeste de la Sierra de Gomas; la formación fue cortada a una profundidad de 1390 m, teniendo un espesor de 259 m. Se caracteriza por la presencia de calizas densas, criptocristalinas y microcristalinas, de color blanco y crema con frecuentes intercalaciones gruesas de calcarenitas de color crema con nódulos de pedernal.

Berriasiense – Hauteriviense

Formación Taraises. Esta formación aflora en la Sierra de San Miguel, sobreyaciendo a la Formación La Casita del Jurásico Superior y en la Sierras Minas Viejas y de Gomas, sobreyaciendo a la Formación Pimienta del Jurásico Superior.

Está constituida por calizas café oscuro a negro, arcillosas, con intercalaciones de lutitas negras. En el subsuelo fue cortada por los pozos: Cerritos 1 (119 0m), pozo Gomas 2 (330 m) pozo Gomas 3 (145 m), ubicados en el municipio de Salinas Victoria; y los pozos Cajete 1 (305 m) y Gloria 1 (195 m) en el municipio de Mina.

Hauteriviense – Aptiense

Formación Cupido. Está formada por calizas masivas de color gris oscuro, aflora en la Sierra de San Miguel, al oeste del valle, así como en la sierra Minas Viejas y en la Sierra de Gomas.

Aptiense

Formación La Peña. Constituida por calizas arcillosas, esta formación aflora sobreyaciendo a la Formación Cupido y en el subsuelo también fue cortada por los mismos pozos que cortaron a la Formación Cupido.

Cretácico Medio

Está representado por los afloramientos dentro de la zona de las formaciones: Kiamichi, Aurora Cuesta del Cura y por el Grupo Washita. Todas estas formaciones afloran en el área.

Albiense

Aflora en el área ya sea como la Formación Kiamichi o como la Formación Aurora, la primera está constituida por lutitas calcáreas y la segunda por calizas arcillosas.

Se encuentran aflorando en la parte central (rocas del Cretácico Inferior) de las sierras que delimitan al valle de Salinas Victoria, en las sierras de Gomas, Minas Viejas, Picachos, Papagayos y San Miguel.

Albiense – Cenomaniense

Formación Cuesta del Cura. Esta formación está constituida en la zona por calizas criptocristalinas de color gris claro y gris crema, con intercalaciones de lutitas calcáreas, laminares, con abundancia de pedernal negro. Se encuentra aflorando únicamente en la sierra de San Miguel. Grupo Washita.

Este grupo se caracteriza por la presencia de calizas arcillosas con intercalaciones de lutitas calcáreas. Aflora en todas las sierras de la zona con excepción de la Sierra de San Miguel, en donde se encuentra presente la Formación Cuesta del Cura, que es de la misma edad que el Grupo Washita, aunque algunos autores consideran a la Formación Cuesta del Cura más antigua que el Grupo Washita.

Cretácico Superior

Está representado por los afloramientos en la zona de las siguientes formaciones: Indidura, Agua Nueva, Eagle Ford, San Felipe, Austin, Parras, Méndez y Difunta. Siendo la más importante, desde el punto de vista hidrogeológico, la Formación Méndez pues es en ella en donde se localiza el acuífero El Carmen-Salinas-Victoria.

Cenomaniense – Santoniense

Formación Indidura. Constituida por lutitas calcáreas y margas, aflora al oeste de la Sierra Los Frailes, localizada al oeste de la zona del acuífero.

Cenomaniense – Turoniense

Formación Agua Nueva. Constituida por calizas arcillosas de color gris a negro, con alternancia de lutitas laminares calcáreas de color negro, con lentes y nódulos de pedernal negro. Presenta también horizontes de bentonita verde.

Esta formación aflora dentro del área únicamente en las sierras Los Frailes y en la sierra San Miguel, las cuales se localizan al oeste de la zona. Eagle Ford. Esta formación es similar en edad a la Formación Agua Nueva, solo que, a diferencia de la primera, se encuentra conformada por lutitas calcáreas de color café. Aflora en la Sierra Minas Viejas, en la sierra de Gomas, así como en la Sierra de Mamulique, Higueras y en la Sierra de Papagayos.

Coniacense – Santoniense

Formación San Felipe. Constituida por calizas arcillosas de color gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentónicas de color verde y gris claro. Aflora en la Sierra de Papagayos, Sierra de Higueras y en la Sierra de La Silla la cual se localiza al sureste de Monterrey.

Formación Austin. Conformada por una alternancia de calizas y lutitas calcáreas, aflora en la Sierra Papagayos, Sierra Picachos, Sierra Higueras, Sierra Mamulique, Sierra de Gomas y en la Sierra de Minas Viejas.

Formación Parras. Constituida por lutitas calcáreas con alternancia de calcarenitas, aflora al oeste de la Sierra Los Frailes. Esta formación se encontró en el subsuelo únicamente en el pozo Metropolitano 5 de la Ciudad de Monterrey entre las profundidades de 12 y 80 m.

Campanense – Maestrichtense

Formación Méndez. Fue descrita por primera vez por G. Jeffreys en 1910, su localidad tipo se localiza inmediatamente al este de la estación Méndez (km 629.3 del FFCC Tampico-San Luis Potosí).

En la zona está constituida por lutitas arenosas calcáreas con proporciones de calcita de 15 a 25%, presenta delgadas intercalaciones de limonitas color amarillo ocre y pirita diseminada, en algunas zonas puede presentar intercalaciones de caliza gris y gris verde; en el mapa geológico está representado por la clave Ks (lu).

Generalmente en los primeros 15 m se presentan lutitas alteradas, que son las que le confieren características de semiconfinamiento al acuífero, de los 15 a los 20 m se encuentran ligeramente alteradas y a partir de los 20 m las lutitas se encuentran compactas y sin alteraciones, pero con porcentajes de calcita que pueden ser del 15 al 25%.

El ambiente de depósito de esta formación es de cuenca. Tiene un espesor dentro del área de 60 a 100 m de profundidad, siendo mayor hacia el sureste; en algunas porciones del valle aflora de manera libre principalmente hacia la porción sureste, mientras que en otras áreas se encuentra cubierta por el Conglomerado Reynosa (porción central) y en otras por aluvión y/o suelos del Cuaternario; se distribuye por todo el valle, abarcando inclusive los municipios de la zona metropolitana de Monterrey, Villa de Juárez, Cadereyta Jiménez, Allende, Linares y Montemorelos.

Es justamente esta unidad hidrogeológica, la que se encuentra actualmente en explotación y la que propiamente tendría el nombre de acuífero El Carmen – Salinas-Victoria, aunque los acuíferos Área Metropolitana de Monterrey y Citrícola Norte son una continuidad del anterior.

Todos los pozos ubicados dentro del área se encuentran cortando y explotando a esta formación, al igual que los pozos que se localizan en los acuíferos Área Metropolitana de Monterrey y Citrícola Norte.

Formación Difunta. Conformada por areniscas arcillosas calcáreas con intercalaciones de lutitas calcáreas. Aflora en la porción oeste y fuera de la zona. Esta formación marca un cambio de facies con la Formación Méndez.

El ambiente de depósito de esta formación es de plataforma y juega un papel muy importante ya que funciona como zona de recarga al acuífero localizado en la Formación Méndez.

Plioceno

Conglomerado Reynosa. Como su nombre lo indica está conformado por un conglomerado polimíctico con clastos de diferentes diámetros y matriz arcillosa. Aflora entre la sierra Picachos y la sierra Papagayos, así como entre las sierras Minas Viejas e Higuera; también se presenta en la porción sur y sureste de la zona. Sobreyace discordantemente a la Formación Méndez.

Cuaternario

Conglomerado del Cuaternario. Conglomerado polimíctico que se encuentra distribuido entre las sierras de San Miguel y Minas Viejas, sobreyaciendo discordantemente a la Formación Méndez. Suelos aluviales del Holoceno. Se encuentran esparcidos por toda la zona, algunas veces como aglomerados de fragmentos calcáreos y en otros casos como suelos arcillosos. Del análisis del plano geológico se observa que en la zona afloran las formaciones siguientes (tabla 2):

Tabla 2. Estratigrafía de la Zona El Carmen-Salinas Victoria

Nombre de la Formación	Litología	Clave en el plano	Piso	Época
S/N	aluvión	Q(s)		Holoceno
S/N	conglomerado polimíctico	Q(cg)		Holoceno
Conglomerado Reynosa	conglomerado polimíctico	Tpl(cg)		Plioceno
Difunta	arenisca-lutita	Ks(lu-ar)	Campaniano - Maestrichtiano	Cretácico superior
Méndez	lutita-marga	Ks(lu)	Campaniano - Maestrichtiano	Cretácico superior
Parras	lutita - arenisca	Ks(lu-ar)	Coniaciano - Santoniano	Cretácico superior
Austín	caliza-lutita	Ks(cz-lu)	Coniaciano - Santoniano	Cretácico superior
San Felipe	lutita-caliza	Ks(cz-lu)	Coniaciano - Santoniano	Cretácico superior
Eagle Ford	lutita-caliza	Ks(cz-lu)	Cenomaniano - Turoniano	Cretácico superior
Agua Nueva	caliza-lutita	Ks(cz-lu)	Cenomaniano - Turoniano	Cretácico superior
Indidura	lutita-caliza	Ks(cz-lu)	Cenomaniano - Santoniano	Cretácico superior
Gpo. Washita	caliza-lutita	Ki(cz)	Albiano - Cenomaniano	Cretácico medio
Cuesta del Cura	caliza	Ki(cz)	Albiano - Cenomaniano	Cretácico medio
Aurora	caliza	Ki(cz)	Albiano	Cretácico medio
Kiamichi	Lutita	Ki(cz)	Albiano	Cretácico medio
La Peña	caliza-lutita	Ki(cz)	Aptiano	Cretácico inferior
Cupido	caliza	Ki(cz)	Hauteriviano - Aptiano	Cretácico inferior
Taraises	caliza-lutita	Ki(cz)	Berriasiano - Hauteriviano	Cretácico inferior
Tamaulipas Inferior	caliza	Ki(cz)	Berriasiano - Barremiano	Cretácico inferior
La Casita	lutita-arenisca	Js(lu-ar)	Tithoniano	Jurásico superior
Pimienta	caliza-lutita	Js(lu)	Tithoniano	Jurásico superior
Zuloaga	caliza ó caliza-yeso	Js(cz-lu)	Oxfordiano - Kimmeridgiano	Jurásico superior
Minas Viejas	Yesos-lutitas	Js(Y)	Calloviano - Oxfordiano	Jurásico Sup.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

En la figura 3 se presenta el plano hidrogeológico del sistema acuífero El Carmen-Salinas-Victoria. En color azul se representa la extensión que tiene el acuífero semiconfinado que se encuentra en lutitas arenosas calcáreas de la Formación Méndez; los colores verdes muestran la extensión y ubicación de las zonas de recarga tanto del acuífero semiconfinado, como de los acuíferos profundos confinados.

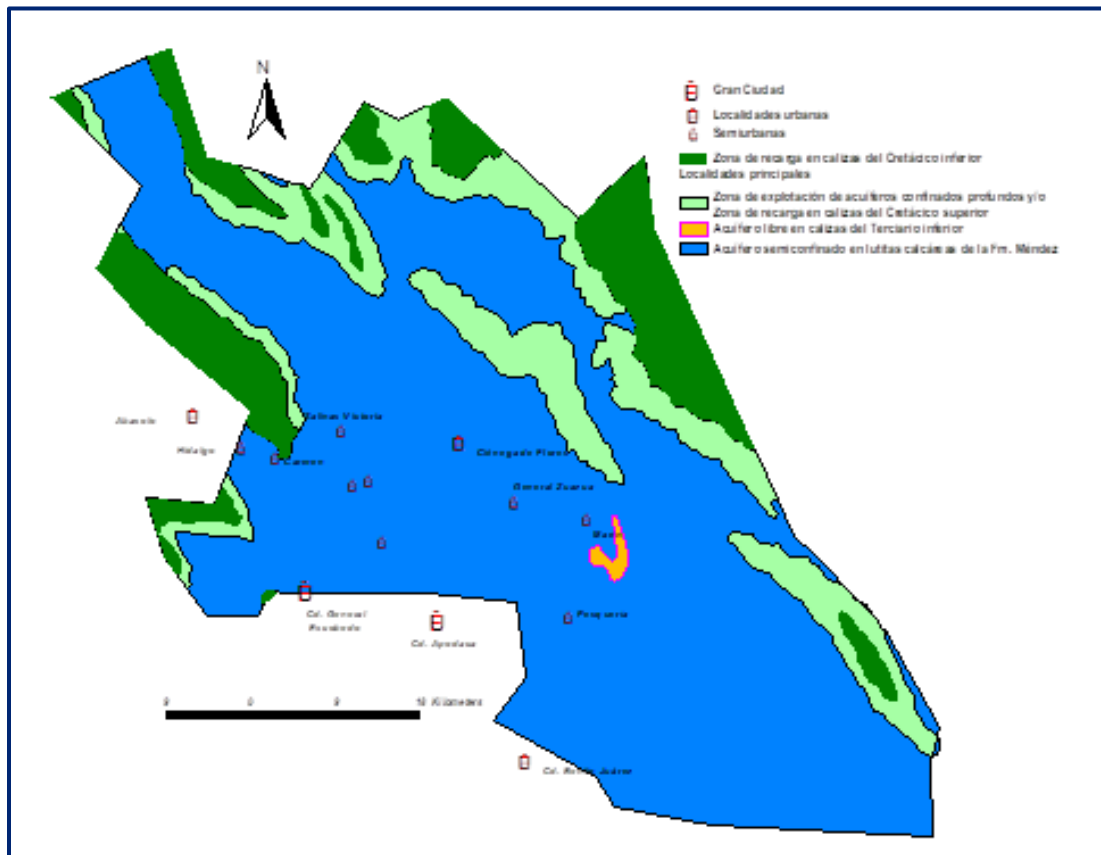


Figura 3. Plano hidrogeológico del sistema acuífero.

Hay que indicar que el acuífero semiconfinado se extiende hacia el sur y sureste en los acuíferos conocidos como Área Metropolitana de Monterrey y Citrícola Norte, en los que se localizan un gran número de pozos que están explotando la misma unidad hidroestratigráfica (Formación Méndez), a similar profundidad y con rendimientos similares.

Las partes altas que forman las sierras dentro de la zona (áreas de recarga) así como las localizadas al sur de Monterrey, que a su vez forman parte de la Sierra Madre Oriental, no son más que estructuras anticlinales, en los que su porción central han sido erosionadas las rocas más jóvenes, quedando expuestas las rocas más antiguas.

En el valle se encuentran a profundidad estas mismas rocas formando sinclinales, los cuales fueron rellenados por sedimentos arcillo calcáreos o areno-arcillosos, que dieron origen más tarde a lutitas arenosas calcáreas de la Formación Méndez o a areniscas arcillosas de la Formación Difunta, durante el final del Cretácico (Campaniano – Maestrichtiano).

Hacia el noroeste y oeste se encuentra la Formación Difunta que como ya se mencionó tiene la misma edad que la Formación Méndez, solo que, en lugar de estar formada por lutitas calcáreas, está constituida por areniscas arcillosas, debido a un cambio de facies (cambio de ambiente sedimentario), esta formación es muy importante ya que aporta agua subterránea de manera horizontal al acuífero localizado en las lutitas calcáreas.

5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo a los resultados de conductividad hidráulica obtenidos de las pruebas de bombeo realizadas, se observa que existe una congruencia con el tipo de material que forma parte de este sistema acuífero, en donde sabemos por cortes litológicos que está constituido por lutitas calcáreas y margas en donde el porcentaje de arcilla varía ampliamente y como consecuencia de esto existe una porosidad secundaria muy marcada. Las conductividades hidráulicas varían de 0.02 a 1.83 m/día, siendo el promedio de 0.54 m/día. Valores más altos, entre 17.71 y 43.37, se asocian a rocas carbonatadas con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución.

Por lo que respecta a la transmisividad hay que señalar que, al comparar los datos obtenidos en abatimiento contra los obtenidos en recuperación, se aprecia que es mayor la transmisividad en recuperación que en abatimiento, por lo cual se deduce que existen pérdidas de carga en los pozos.

Solo en una prueba de bombeo con pozo de observación (pozo 6 Rancho El Lucero), se registró un valor de la transmisividad en recuperación menor que el obtenido en la etapa de abatimiento, lo cual sugiere que el acuífero en esta zona se está agotando o que existe un cono de abatimiento en esta zona. En general, los valores obtenidos varían de 3×10^{-4} a $9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Para los demás pozos en donde no existió pozo de observación (solo pozo de bombeo), la comparación entre los valores de la transmisividad obtenida en las etapas de abatimiento y recuperación se deben tomar solo como aproximación, ya que las condiciones hidráulicas locales dentro y cerca del pozo de bombeo influyen fuertemente en el valor de los abatimientos. De manera general podemos indicar que las transmisividades en abatimiento son menores que en recuperación, lo que indica que hay pérdidas de carga en los pozos.

5.3 Piezometría

No existen datos históricos de piezometría para el acuífero El Carmen-Salinas-Victoria, únicamente existe un estudio que se realizó en 2003; este estudio tuvo como objetivo diseñar la red de pozos piloto para medir el nivel estático de manera periódica en este acuífero, incluye mediciones de profundidad al nivel estático para ese año.

5.4 Comportamiento hidráulico

Dado que únicamente existen datos históricos del 2003 no fue posible realizar hidrógrafos de niveles estáticos, aunque sí se pudieron realizar hidrógrafos con niveles dinámicos en 37 pozos de agua potable con datos de 1998 al 2004 con la información proporcionados por el organismo operador Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM).

En 526 aprovechamientos se pudieron hacer mediciones de la profundidad al nivel estático en el último trimestre de 2004 que fueron muy útiles para construir las curvas de igual elevación del nivel estático, encontrándose que el nivel del agua se encuentra muy somera en esta zona, entre 1 y 51 metros.

Existen también datos de piezometría registrada en 1999, que, aunque son escasos sirvieron para esbozar la evolución del nivel estático para el periodo 1999-2003.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Las curvas de igual profundidad al nivel estático que se presentan en la figura fueron generadas a partir de las mediciones que se realizaron en campo en 526 aprovechamientos de agua subterránea en el año 2004. Posteriormente los datos fueron incorporados a un sistema de información geográfica, en donde se generaron las curvas de igual profundidad al nivel estático, utilizando el módulo Kriging Interpolador de Arc View (figura 4).

Con las curvas de igual profundidad se generó a su vez un modelo digital de profundidades en donde se presentan con distintos colores los diferentes rangos de profundidad al nivel estático. Teniendo de esta forma, en color verde el rango de profundidades de 15 a 20 m, que es el rango más ampliamente distribuido dentro de la zona.

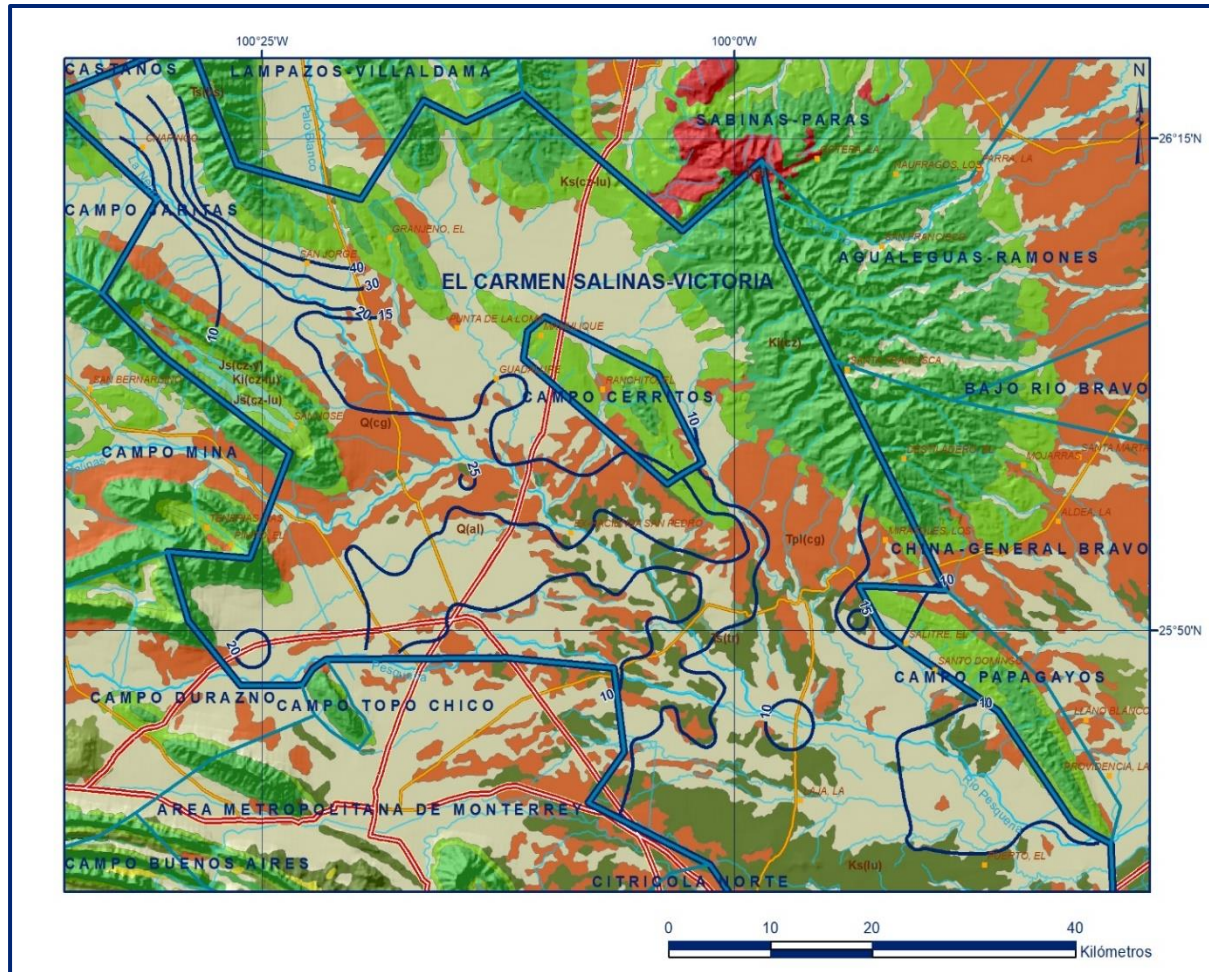


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2004)

Los planos de curvas de igual profundidad al nivel estático se utilizan básicamente en la prospección hidrogeológica para determinar zonas factibles para perforación de pozos a bajo costo y dentro del balance para calcular las áreas con profundidades menores a 10 m susceptibles de evapotranspirar por acción de las plantas nativas.

También se utilizan para detectar zonas con problemas de abatimiento del nivel estático, que para el caso de este acuífero y con datos de profundidades al nivel estático de 2004, únicamente se presenta una zona de abatimiento, entre las localidades de Salinas Victoria y Ciénega de Flores.

Dicho cono tiene una forma alargada en dirección este – oeste y una longitud de 9.5 km; este abatimiento ha formado una depresión del nivel estático de más de 10 m con respecto a las zonas aledañas los que el nivel estático se encuentra entre los 25 y 30 m de profundidad.

Siendo los pozos que registran un consumo anual mayor los del Parque Industrial Las Américas (4 pozos) y los 4 pozos de la empresa pecuaria Corrales de Engorda S.A., los cuales en conjunto tienen una extracción anual de 244.22 miles de m^3 , que representa el 74% del volumen total extraído de los 34 pozos activos que se localizan dentro de esta zona de abatimiento. Por lo que respecta al resto de la planicie, ésta presenta una profundidad al nivel estático más o menos constante entre 10 y 15 m, mientras que hacia las proximidades de las sierras la profundidad al nivel estático aumenta, hasta alcanzar los 40 m, incluso en algunas zonas del noroeste (Sierra de Gomas), el nivel estático se localiza a 100 m de profundidad.

5.4.2 Elevación al nivel estático

Para poder obtener las curvas de igual elevación del nivel estático fue necesario primeramente determinar la elevación de los brocales en los 526 aprovechamientos en donde se midió la profundidad al nivel estático en el año 2004, así como para los datos medidos en el año 2003; para esto, se utilizó la topografía digital de INEGI escala 1:50 000 (figura 5).

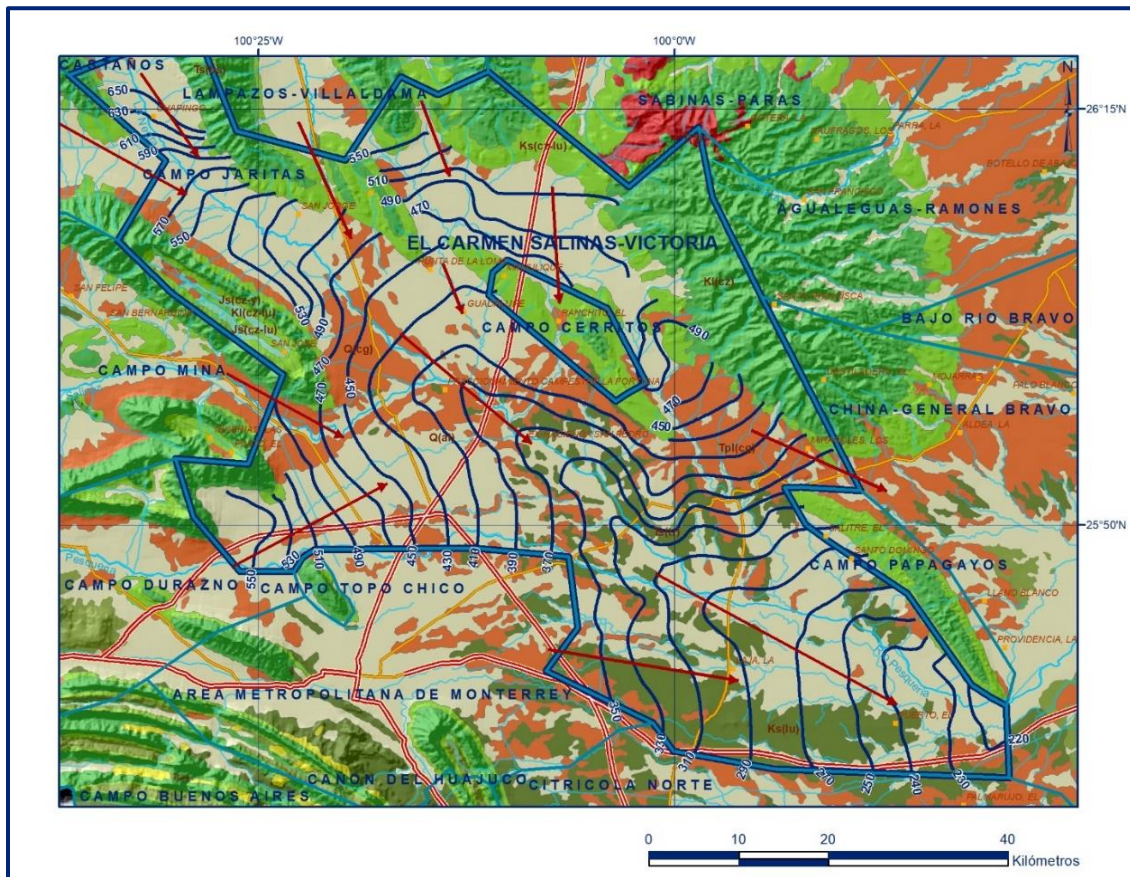


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2004)

La determinación de la elevación de los brocales se obtuvo creando primeramente un modelo digital de elevación (MDE) de la zona, lo cual se logró con el software Autodesk Land Desktop 2004. Una vez que fueron obtenidos los valores de elevación del nivel estático de los pozos, se procesaron en Arc View con el software Kriging Interpolador para obtener las curvas de igual elevación del nivel estático para los años 2004 y 2003.

Para el año 2004 se tiene un buen panorama de las direcciones de flujo del agua subterránea ya que se realizaron una buena cantidad de mediciones piezométricas y además se abarcó toda la zona; por lo que se puede inferir que existe una continuidad piezométrica en todo el sistema acuífero El Carmen-Salinas Victoria, en donde la dirección del flujo principal del agua subterránea es de noroeste a sureste.

Se observa un flujo regional que afecta y conecta a los diferentes sistemas acuíferos colindantes del norte, noroeste y suroeste, el cual está supeditado al basculamiento que tiene la Sierra Madre Oriental, ya que está más levantada hacia el noroeste que en el sureste; de tal forma que hay una continuidad hidráulica e hidrogeológica entre los sistemas acuíferos que limitan a El Carmen-Salinas-Victoria tanto por el norte como por el oeste, así como hacia el sur y sureste del sistema.

Del análisis de la figura, también se pueden definir las zonas de recarga de este sistema acuífero, las cuales se localizan en las serranías que lo delimitan hacia el norte, así como las sierras interiores localizadas en el municipio de Higuera que ha sido denominado Acuífero Campo Cerritos, al igual que las sierras que forman parte del que ha sido denominado Acuífero Campo Papagayos; sistemas acuíferos que en realidad forman parte del sistema acuífero El Carmen – Salinas - Victoria. Básicamente no se observan diferencias sustanciales entre el plano de isopiezas de 2003 y el de 2004, esto es debido a que el periodo de tiempo es muy reducido para visualizar cambios drásticos en la piezometría del acuífero y en las direcciones de flujo del agua subterránea.

5.4.3 Evolución de los niveles estáticos

Debido a que la información piezométrica de 1998 es escasa y poco consistente, se generó el plano de evolución del nivel estático para el periodo 2003-2004. Para generar las curvas de igual evolución se utilizó el software ArcView y su módulo Kriging Interpolador.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En el estudio más reciente realizado (DESISA 2004), se seleccionaron 135 aprovechamientos para la toma de muestra de agua, de acuerdo con su localización geográfica dentro del acuífero, tratando de abarcar toda su superficie. Se realizaron las determinaciones en campo de Temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT). Posteriormente se realizó una interpretación de los resultados, determinando los rasgos indicadores del flujo.

Para el sistema acuífero El Carmen-Salinas-Victoria, se observa claramente la coincidencia entre la zona de bajo pH localizada en la porción centro este del área, con la zona de más alta precipitación, mientras que la zona con pH más alcalino corresponde a la zona con menor precipitación que se localiza en la porción oeste y noroeste del valle. Esta disposición del pH dentro del valle también sugiere la existencia de una entrada de flujo subterráneo por el noroeste y oeste del valle, que al ingresar a la zona ya lleva un largo tiempo de permanencia dentro del subsuelo, de allí que el pH sea muy elevado en esta parte del valle, aunado como ya se dijo, a la baja precipitación que se registra en esta porción del acuífero.

Como la dirección del flujo subterráneo es de NW-SE dentro de este acuífero, se esperaría que el pH aumentara conforme el flujo se dirige al SE; sin embargo esto no sucede debido a que existe una fuerte recarga en las sierras Picachos, Papagayos e Higueras, localizados al norte y noreste del valle que muestran una alineación NW-SE, mientras que la recarga en estas sierras tiene una dirección NE-SW, es decir con dirección hacia el centro del valle. Respecto a la temperatura, se observan algunos sitios en donde la temperatura rebasa los 30° C, asociadas al gradiente geotérmico, ya que los pozos se encuentran a profundidades de más de 200 m; sin embargo, para la mayor parte del sistema acuífero el agua subterránea es de origen pluvial.

Se observa un incremento en la conductividad eléctrica conforme el flujo del agua se aproxima hacia el centro del Valle, llegando a conductividades eléctricas que rebasan el límite de detección de los aparatos de campo que es de 4000 microsiemens/cm lo cual indica una alta concentración de sales en el agua; a partir de esta zona y en dirección del flujo subterráneo (NW-SE), la conductividad comienza a disminuir debido a que existe una dilución del agua subterránea con agua meteórica de reciente infiltración que es aportada por las sierras que limitan al valle por el norte y noreste y seguramente también por las del sur del Valle.

Finalmente, respecto a los Sólidos Totales Disueltos (STD), las concentraciones indican un aumento gradual y concéntrico conforme se aproxima el flujo subterráneo hacia el centro del valle, que al igual como acontece con la conductividad eléctrica, aumentan hasta rebasar el límite de detección de los aparatos de campo, lo cual delimita una zona con muy mala calidad del agua en donde la concentración de STD varía de 2000 a 4000 mg/l.

A partir de esta zona el agua subterránea manifiesta una disminución en la concentración debido al aporte de agua meteórica de reciente infiltración, originada en las sierras: Picacho, Higueras y Papagayos, así como por la infiltración producida directamente sobre la Formación Méndez, que en esta zona se encuentra aflorando.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En el estudio de 2004 realizado por DESISA se llevó a cabo un censo de aprovechamientos que reveló la existencia de 1023 aprovechamientos del agua subterránea. En valor de la extracción estimada asciende a los 31.65 hm³ anuales, de los cuales 11.8 (37.3%) se destinan para la agricultura, 11.0 (34.7%) más para uso público-urbano, 7.75 (24.5%) para uso doméstico abrevadero y los 1.1 hm³ restantes (3.5%) para el sector industrial (figura 7).

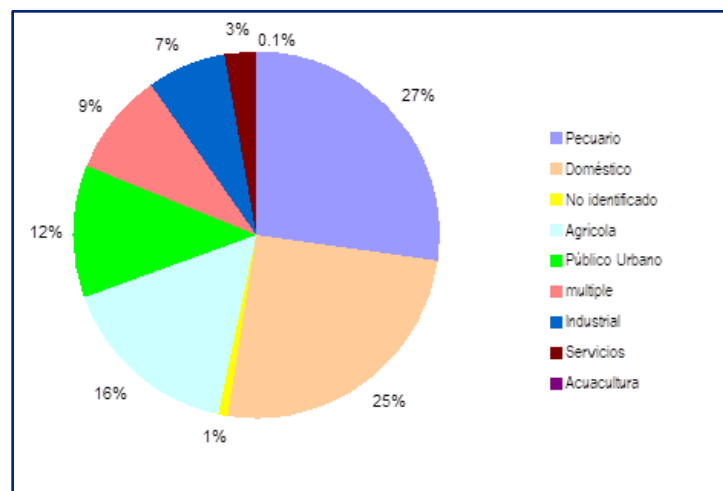


Figura 7. Distribución por uso de los aprovechamientos

De los 1023 aprovechamientos 866 son pozos, 152 norias, 1 tajo, 1 galería filtrante y 3 manantiales. De este total, 853 aprovechamientos se encuentran activos y los 170 restantes inactivos

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 la siguiente:

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

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 del acuífero:

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

El balance de agua subterránea, se realizó para el periodo de 2003 a 2004, tomando como base los datos reportados por los estudios: Reactivación de Redes de Monitoreo Piezométrico de los Acuíferos de los valles de: Sabinas-Paras, El Carmen-Salinas Victoria y Citrícola Sur, en el estado de Nuevo León (2003) y Actualización Hidrogeológica del acuífero El Carmen-Salinas Victoria, N. L. (2004). El área de balance definida tiene una superficie de 1458 km² que corresponde a la zona donde se tiene la mayor concentración de aprovechamientos de agua subterránea.

7.1 Entradas

La recarga total está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida debida a la aplicación de agua, tanto de origen superficial como subterránea, derivada de las actividades humanas.

7.1.1 Recarga natural

La recarga natural de un acuífero está conformada tanto por la infiltración procedente de la precipitación como por las entradas horizontales de agua subterránea que provienen de acuíferos colindantes.

Recarga vertical (Rv)

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

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

De esta manera:

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

7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (Eh)

De acuerdo con la geología y la elevación del nivel estático se identificaron nueve celdas de entradas por flujo subterráneo horizontal provenientes de los acuíferos aledaños, que colinda al norte, sur y oeste de la zona (figura 5).

Con base en esta configuración y los canales de flujo, se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de para el periodo analizado, lo que significa un valor de **2.3 hm³/año**.

$$Q = B * i * T$$

Donde

B: Ancho (m) del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T: Transmisividad (m²/s) en el canal de flujo

Tabla 3. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal en el periodo 2003- 2004 por tipo de uso.

No. Celda	Prof. Media al N.E. (m)	Prof. Media Total de pozos (m)	Espesor medio de acuífero (m)	Conductividad Hidráulica (m/s)	T (m ² /s)	B (m)	i	Q m ³ /s	Eh (Hm ³ /año)	Eh del periodo 2003-2005 (Hm ³)
1	13.80	64.00	50.20	1.71E-05	8.58E-04	4,940	0.0061	0.026	0.820	1.641
2	11.60	50.19	38.59	9.44E-06	3.64E-04	15,100	0.0053	0.029	0.914	1.828
3	8.80	62.50	53.70	9.44E-06	5.07E-04	7,550	0.0041	0.016	0.495	0.991
4	19.60	63.87	44.27	2.77E-07	1.23E-05	5,030	0.0041	0.000	0.008	0.016
5	11.05	59.00	47.95	2.77E-07	1.33E-05	5,940	0.0066	0.001	0.017	0.033
6	17.92	50.00	32.08	2.77E-07	8.89E-06	8,420	0.0089	0.001	0.021	0.042
7	23.80	50.00	26.20	2.77E-07	7.26E-06	1,790	0.0133	0.000	0.005	0.011
8	23.80	50.00	26.20	2.77E-07	7.26E-06	2,220	0.0094	0.000	0.005	0.010
9	23.80	50.00	26.20	2.77E-07	7.26E-06	1,130	0.0100	0.000	0.003	0.005
Volumen total de entrada horizontal en el periodo										4.6

7.1.3 Recarga inducida (R_i)

El volumen de agua que anualmente retorna al acuífero como consecuencia del riego que se realiza en el área se calculó multiplicando el volumen de agua superficial y subterránea destinada al riego (117 hm^3) por un coeficiente de infiltración del 10%, resultando un volumen de recarga inducida de 11.7 hm^3 para el periodo; por lo que la recarga inducida media anual es de $5.9 \text{ hm}^3/\text{año}$.

El 10% se explica de la siguiente forma: de acuerdo al tipo de clima que se presenta en la zona, el porcentaje de agua excedente utilizada (50% del volumen bruto utilizado) en el riego que se pierde por infiltración es del orden del 10%, mientras que las pérdidas totales por evaporación y por colmatación de suelos suman el 90% restante del agua excedente de riego.

De igual manera, el uso público-urbano origina una recarga al acuífero por pérdidas en redes de distribución, el cual resultó de 1.0 hm^3 para el periodo, siendo el promedio anual de $0.5 \text{ hm}^3/\text{año}$.

De esta manera, la recarga inducida total es de 12.7 hm^3 para el periodo 2003-2004 y **$6.4 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh) y la evapotranspiración real (ETR).

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Dentro del área de balance se presentan niveles estáticos a menos de 10 m de profundidad en una superficie de 1456 km^2 .

Los datos para el cálculo de la evapotranspiración se presentan en la tabla 4.

El cálculo de la media ponderada de profundidad al nivel estático y su área bajo la curva (plano de isobatas), dio como resultado una profundidad media al nivel estático de 8.085 m que de acuerdo a la ecuación de la gráfica de la figura 12 (que representa una relación lineal inversa entre la profundidad al NE y el % de ETR, considerando una profundidad de extinción de 10 m para la ETR)

Tabla 4. Datos utilizados para el cálculo de descarga por evapotranspiración.

Profundidad al N. E.	% Evapotranspirado	Área (m)
10	0.0%	43885053.7
9	10.0%	781083.9
8	20.0%	46182047.8
7	30.0%	4082093.3
6	40.0%	41853312.4
5	50.0%	466592.9
4	60.0%	6115166.5
3	70.0%	367022.9
2	80.0%	1918257.5
1	90.0%	0.0
Área total		145,650,630.9

Se obtiene un porcentaje de evapotranspiración correspondiente al 1.915% de la lámina media de evapotranspiración anual la cual fue de 0.638 m para el periodo. Finalmente, al multiplicar la lámina media de evapotranspiración anual por el porcentaje evapotranspirado y por la superficie total susceptible de evapotranspirar agua del subsuelo, se obtiene un volumen de **17.8 h m³/año**, por lo que el acumulado para el periodo 2003 a 2004 es de 35.6 hm³.

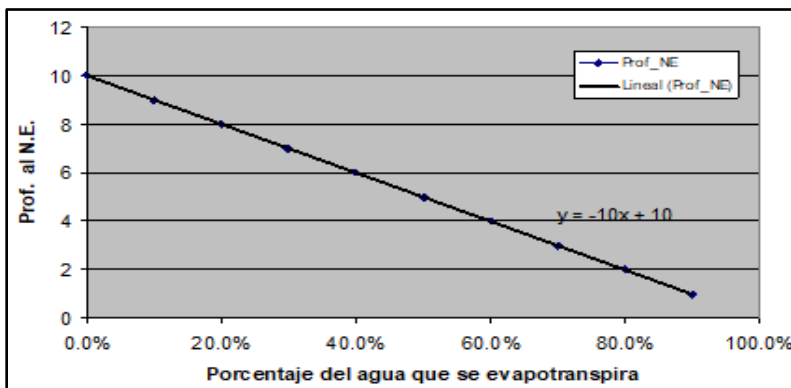


Figura No. 12 Evapotranspiración de acuerdo a la profundidad al nivel estático.

7.2.2 Bombeo (B)

El volumen total extraído acumulado del acuífero a través del bombeo (B), para todos los usos resultó del orden de los 63.3 hm³ durante el periodo (tabla 5), por lo que el valor anual es de 31.65 hm³.

Los datos de extracción para uso agrícola fueron obtenidos con superficies y padrón de cultivos para cada año, láminas netas de riego, eficiencia global promedio del riego y láminas brutas para los cultivos.

Tabla 5. Resumen de extracciones anuales en el periodo 2003-2004 por tipo de uso.

Año	Uso Público-Urbano	Uso pecuario	Uso agrícola	Agrícola y pecuario	Industrial	Otros	Total
2003	11.0	1.75	11.8	5.0	1.1	1.0	31.65
2004	11.0	1.75	11.8	5.0	1.1	1.0	31.65
Totales	22.0	3.4	23.6	10.0	2.2	2.0	63.30

Para el uso público-urbano, la extracción se cuantificó con consumos medios diarios y con los datos de población por año para todas las localidades que se ubican dentro de la poligonal del acuífero.

La extracción para abrevadero y uso pecuario se cuantificó con poblaciones animales por año, por tipo de animal y con consumos medios diarios.

7.2.3 Manantiales (Dm)

El gasto anual que sale por manantiales dentro de la zona es de $0.4 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que el volumen acumulado para el periodo 2003 a 2004 es de 0.8 hm^3 .

7.2.4 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas que ocurren como descarga por flujo subterráneo horizontal hacia el este y sureste del área fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del NE presentado en la figura No. 10.

El Valor estimado es de 0.8 hm^3 anuales, tal como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Cálculo de las salidas por flujo subterráneo horizontal en el periodo 2003 - 2004 por tipo de uso.

No. Celda	Prof. media al n e (m)	Prof. media Total, de pozos (m)	Espesor medio de acuífero (m)	Conductividad Hidráulica (m/s)	T (m ² /s)	B (m)	i	Q m ³ /s	Eh (Mm ³ /año)	Eh del periodo (Hm ³)
A	8.19	50.00	41.81	2.03E-06	8.49E-05	5,210	0.007	0.003	0.1	0.19
B	7.50	42.50	35.00	2.47E-05	8.65E-04	8,690	0.003	0.021	0.7	1.31
Volumen total de salida horizontal en el periodo										1.50

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

Para el cálculo de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero en el intervalo 2003 a 2004, con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático; determinando una variación de los niveles de +1.7 m en un periodo de 2 años, lo cual representa una recuperación piezométrica de 0.85 m/año, valor que aplicado al área del valle donde existen los aprovechamientos de agua subterránea (1458 km²).

Resulta un volumen adicionado (V_d) de +2474.8 hm³ en el periodo, y aplicando un coeficiente de almacenamiento de 0.00255, resulta un cambio de almacenamiento de +6.3 hm³ en el periodo 2003-2004; por lo que el cambio de almacenamiento medio anual sería de +3.2 hm³/año.

Coeficiente de almacenamiento (S)

El valor del coeficiente de almacenamiento del acuífero en la zona, no ha podido ser definido mediante las pruebas de bombeo que se realizaron durante los estudios por tener un medio muy heterogéneo en cuanto a los materiales que lo conforman, por lo que es difícil decidir el coeficiente que se debe aplicar en la ecuación de balance; sin embargo se pudo calcular este coeficiente de almacenamiento despejando este dato de la ecuación de balance obteniendo el dato de 0.00255, el cual es congruente y característico de un acuífero semiconfinado, de una lutita calcárea o margosa.

Solución de la ecuación de balance

Una vez estimados los valores de los parámetros que intervienen en la ecuación de balance, se procede a despejar la recarga vertical

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + ETR + Dm - \Delta V(s) - E_h - R_i \\ R_v &= 0.8 + 31.7 + 17.8 + 0.4 + 3.2 - 2.3 - 6.4 \\ R_v &= 45.2 \end{aligned}$$

La recarga natural producto de la infiltración del agua de lluvia resultó de 45.2 hm³..

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 45.2 + 2.3 + 6.4 \\ R &= 53.9 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso, su valor es de **53.9 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 el caso de la zona en donde existen manantiales, salidas de agua subterránea hacia otros acuíferos y descarga por evapotranspiración de plantas nativas, la descarga natural comprometida obtenida es de **DNC = 6.2 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **86,874,265 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 53.9 - 6.2 - 86.874265 \\ \text{DMA} &= -39.174265 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **39,174,265 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

CNA. 1994. Pruebas Bombeo. Comisión Nacional del Agua. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Libro V. 112 p.

D. O. F. 2003. Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización. Diario Oficial de la Federación. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Viernes 31 de enero de 2003. Segunda sección, 119 p.

D. O. F. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 Conservación del Recurso Agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 17 de abril de 2002. Segunda sección, 119 p.