



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO CUATROCIÉNEGAS (0528), ESTADO DE
COAHUILA**

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.....	7
3.1 Provincia Fisiográfica	7
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	12
4. GEOLOGÍA.....	13
4.1 Estratigrafía.....	15
4.2 Geología Estructural.....	19
4.3 Geología del subsuelo	22
5. HIDROGEOLOGÍA.....	23
5.1 Tipo de acuífero	23
5.2 Parámetros hidráulicos.....	24
5.3 Comportamiento hidráulico.....	24
5.3.1 Profundidad al nivel estático.....	24
5.3.2 Elevación del nivel estático.....	24
5.3.3 Evolución del nivel estático	24
5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	26
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	27
8. DISPONIBILIDAD	28
8.1 Recarga total media anual (R).....	28
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	29
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	29
9. BIBLIOGRAFÍA	30

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 Cuatrociénegas, definido con la clave 0528 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central del estado de Coahuila, a unos 65 kilómetros al poniente de la ciudad de Monclova, está comprendido en el Municipio del mismo nombre y tiene una extensión superficial aproximada de 1,389 kilómetros cuadrados. Geográficamente, está limitado por los paralelos 26° 24' 16,0" y 27° 06' 56,8" de latitud norte, y por los meridianos 101° 29' 20,9" y 102° 31' 39,5", de longitud oeste (figura 1). Las poblaciones más importantes dentro del área que ocupa el acuífero son Cuatrociénegas, Lamadrid y Sacramento.

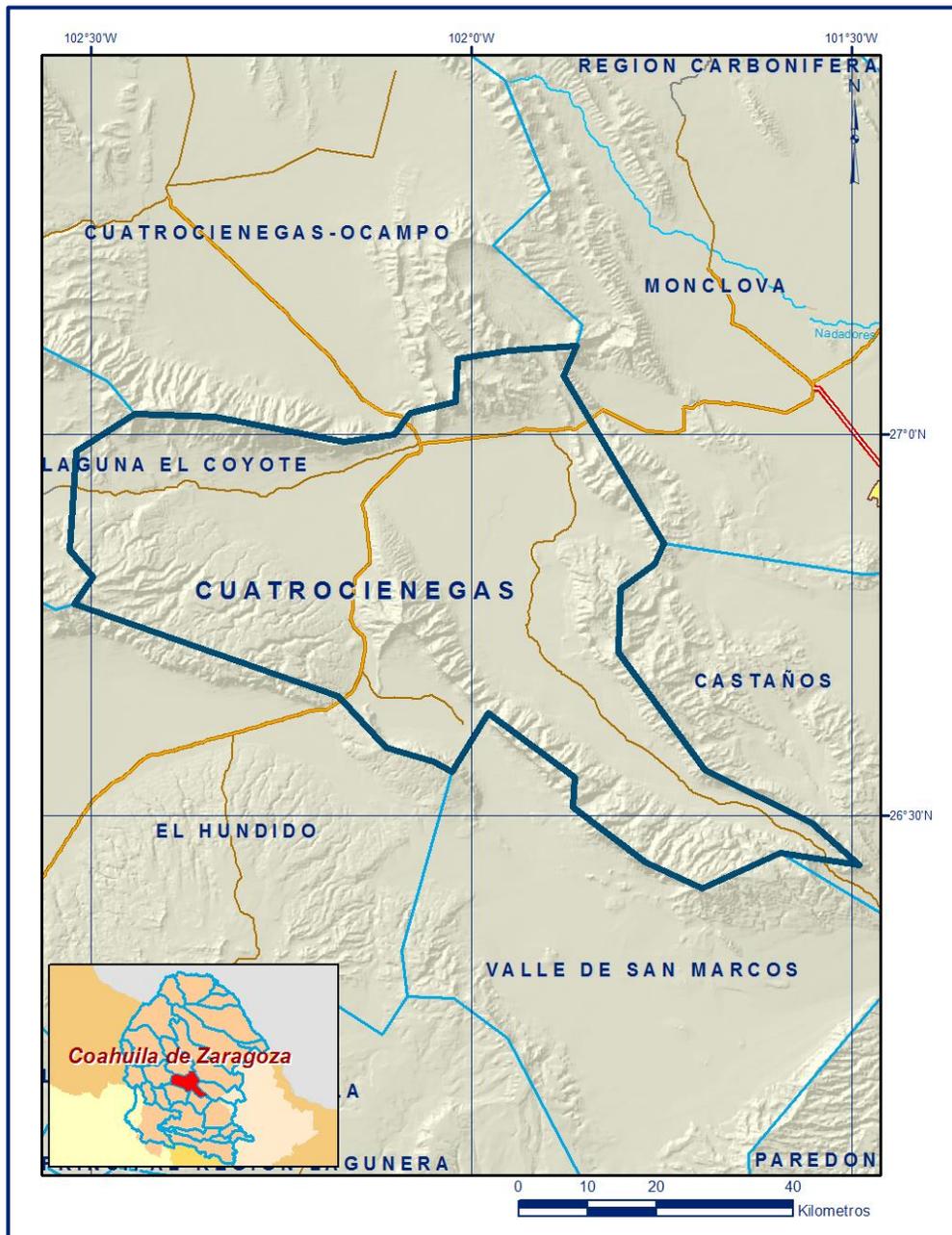


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, se encuentra dentro del Municipio de Cuatrociénegas y abarca parte de los Municipios de La Madrid y Sacramento.

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

ACUIFERO 0528 CUATROCIENEGAS						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	101	58	38.6	26	38	3.5
2	102	1	29.3	26	33	23.4
3	102	3	0.0	26	34	14.9
4	102	6	43.6	26	35	17.4
5	102	10	26.0	26	39	21.3
6	102	31	18.0	26	46	35.3
7	102	29	49.9	26	48	45.0
8	102	31	39.5	26	50	50.8
9	102	31	9.7	26	58	40.6
10	102	26	33.9	27	1	35.2
11	102	20	13.6	27	1	24.8
12	102	9	59.2	26	59	22.2
13	102	6	3.2	27	0	0.9
14	102	4	46.8	27	1	38.8
15	102	1	11.8	27	2	33.3
16	102	1	4.4	27	5	57.7
17	101	56	56.8	27	6	34.5
18	101	51	40.4	27	6	56.8
19	101	52	40.5	27	4	38.1
20	101	44	45.4	26	51	25.1
21	101	45	30.9	26	49	45.9
22	101	48	13.4	26	47	47.5
23	101	48	19.9	26	42	46.4
24	101	41	30.6	26	33	34.3
25	101	33	5.8	26	29	21.5
26	101	29	20.9	26	26	3.0
27	101	35	34.0	26	27	0.8
28	101	41	43.6	26	24	16.0
29	101	46	15.2	26	26	16.6
30	101	51	59.4	26	30	38.1
31	101	51	49.2	26	32	56.0
1	101	58	38.6	26	38	3.5

1.2 Situación Administrativa del acuífero

El acuífero Cuatrociénegas pertenece al Organismo de Cuenca VI “Río Bravo”. Su territorio se encuentra totalmente sujeto a las disposiciones del “DECRETO por el que se establece como zona reglamentada aquella que ocupa el acuífero denominado Cuatrociénegas, ubicado en el Estado de Coahuila”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de octubre de 2013. Dentro del ámbito territorial del acuífero, está comprendida una superficie de 84,347-47-00 hectáreas, objeto del Decreto emitido en 1994 que la declara como Área Natural Protegida, con el carácter de Área de Protección de Flora y Fauna. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

La agricultura es la principal actividad económica. Está sustentada, principalmente, por el agua que brota de “pozas” o manantiales diseminados en los flancos de la sierra de San Marcos y Pinos y que circula a través de una red de canales artificiales. Aunque el caudal brotante es de unos 3,000 litros por segundo, en promedio, el desarrollo agrícola local es muy modesto porque la mayor parte del agua es conducida por los canales hacia las zonas de Lamadrid, Sacramento, San Buenaventura y Nadadores, situadas aguas abajo y al oriente de la zona de Cuatrociénegas.

El volumen de agua subterránea destinado al riego local es apenas de unos 14.018 millones de metros cúbicos por año. En cambio, con agua de las mismas “pozas”, en el año 2005, en las zonas de Lamadrid, Sacramento y San Buenaventura, se regaron unas 3,400 hectáreas (ha) de cultivos, principalmente alfalfa, con un valor de la producción de 36'289,619 pesos, y se emplearon a 115 personas que representan el 7.47% de la población económicamente activa.

Actualmente, a pesar de que los ecosistemas asociados a las “pozas” tienen notable belleza natural, interés científico y atractivo turístico, la industria del turismo en Cuatrociénegas es reducida por falta de infraestructura; no obstante, presenta un gran potencial de desarrollo y, a la vez, un riesgo creciente de que los ecosistemas sean dañados por las actividades humanas, si no fueran debidamente reguladas.

La distribución del agua por sectores es como sigue: al sector primario (agricultura y minería) se destinan cerca del 93% del volumen de agua utilizado; en el sector secundario, a la industria corresponde cerca del 1%, y en el cenozoico, el comercio y servicios reciben un 6% del agua utilizada. Los sectores secundario y cenozoico, que casi en su totalidad utilizan agua subterránea, generan a nivel estatal un 56% del Valor Agregado Censal Bruto (VACB) y dan ocupación a un 81% de la población económicamente activa (PEA). En contraste, el sector primario genera el 44% del VACB y ocupa el 18.9% de la PEA.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

La empresa ININSA (1980) realizó un estudio el cual cubrió el Valle de Ocampo y la parte norte del Valle de Cuatrociénegas. En este estudio se definió un acuífero granular que rellena los valles y un acuífero calizo.

Como parte del estudio fueron censados 210 aprovechamientos: 121 pozos, 56 norias, 31 manantiales y 2 sondeos exploratorios.

En conjunto, las captaciones extraían del acuífero granular alrededor de 35 hm³/año, volumen destinado en su mayor parte a la agricultura. Por medio de un balance de aguas subterránea para el periodo noviembre de 1979-noviembre de 1980, se estimó que la magnitud de la recarga del acuífero granular en el Valle de Ocampo variaba entre 15 a 25 hm³/año. La descarga del acuífero calizo por medio de manantiales se evaluó en un orden de 4.8 hm³/año. La recarga del acuífero calizo se infirió del mismo orden o superior a la descarga de los manantiales (5 hm³/año).

La Comisión Nacional del Agua (1998) llevó a cabo un estudio de reactivación de la red de monitoreo del acuífero, logrando establecer para la parte norte del valle una red de monitoreo para la obtención de información hidrogeológica-piezométrica del acuífero.

El Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y Protección de la Fauna Mexicana, A. C. (1999), realizaron un estudio en el Valle de Cuatrociénegas con el objetivo de localizar el origen de las aguas superficiales y hacer un diagnóstico participativo de los niveles de aprovechamiento del agua. De este estudio se reconocieron varios manantiales cuyas aguas son conducidas a través de canales para ser usadas en el riego agrícola dentro y fuera del valle. Por medio de aforos efectuados varias veces en el año de 1998 en distintos puntos de los canales, se llegó a establecer que la descarga de los manantiales es del orden de 3089 lps.

Otro tipo de estudios realizados que fueron recopilados en la zona es la cartografía geológica escala 1:250,000 realizada por el INEGI (1990), que cubre las cartas geológicas Ocampo (G13-3), Tlahualilo de Zaragoza (G13-6), Nueva Rosita (G14-1) y Monclova (G14-4). También se cuenta con los planos geológicos de PEMEX (1971) escala 1:50,000 de las áreas Estación Socorro (Hoja Atlas 45-13) y La Vega-El Represito (Hojas Atlas 47-13 y 45-10).

Dentro de los trabajos importantes de geología regional es el realizado por McKee y otros (1990), en el cual se concluye que cerca de 3,000 m de detritos del Jurásico Superior y Cretácico Inferior fueron derivados por actividad de la Falla San Marcos. Las areniscas marinas y eolinitas más recientes del Jurásico (Capas Tanque Cuatro Palmas y Colorado) registran subsecuente (Tothoniano) inactividad de la falla. Rejuvenecimiento Neocominiao de la falla produjo depósitos aluviales de la Formación San Marcos; los sedimentos de grano fino y estratos marinos de la Formación La Mula, manifiestan el mismo fallamiento.

Interrupción del desplazamiento Neocomiano es indicada por una lengua de carbonatos de las formaciones Padilla y Barril Viejo. Las fuentes principales de estos detritos fueron el flysch del Paleozoico Tardío, el arco proximal cuenca Las Delicias y las rocas plutónicas del Triásico que lo cortan. La Falla San Marcos pudo formar parte del sistema de fallas transformantes que conectaban las crestas de expansión del piso oceánico del Atlántico con aquellas del Pacífico.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

La zona en donde se encuentra el acuífero Cuatrociénegas se localiza en la Provincia Fisiográfica de Sierras y Cuencas, entre las Subprovincia Golfo de Sabinas y Plataforma de Coahuila definidas por Raíz (1964). La Provincia Fisiográfica de Sierras y Cuencas, limita al norte con la Subprovincia de Sierras del Norte perteneciente a la Provincia de la Sierra Madre Oriental y al sur con la Subprovincia de Sierras Atravesadas también perteneciente a la Sierra Madre Oriental.

La Subprovincia del Golfo de Sabinas se caracteriza por la presencia de sierras sensiblemente paralelas entre sí, estrechas y alargadas, con fuertes pendientes topográficas y grandes acantilados, las cuales separan a valles amplios de suave pendiente. Entre estas sierras se tienen las siguientes con su máxima elevación y orientación SE-NW: Sierra San Marcos y Pinos con 2,620 msnm, Sierra La Purísima con 2,280 msnm, Sierra Agua Chiquita con 1,500 msnm, Sierra Menchaca con 2,100 msnm y Sierra Madera con 3,020 msnm.

La Plataforma de Coahuila se caracteriza por sierras de configuración cómica con flancos de suave pendiente topográfica, como lo es la Sierra La Fragua que alcanza una elevación máxima de 2,260 msnm. El Valle de Cuatrociénegas que se ubica en el límite de las Subprovincias del Golfo de Sabinas y Plataforma de Coahuila, guarda una orientación E-W con elevaciones del terreno que varían entre 900 y 700 msnm, disminuyendo del poniente al oriente.

3.2 Clima

Las características del clima fueron analizadas con base en los registros de las estaciones climatológicas “Cuatrociénegas”, ubicada en la propia zona, y “Ocampo”, localizada en la zona del mismo nombre, que se extiende al norte de la primera. El análisis climatológico comprendió los lapsos 1943-2006 en la estación “Cuatrociénegas” y 1960-98 en la de “Ocampo”.

El clima de la región se clasifica como semiárido por su grado de humedad, cálido por su temperatura y con lluvias en verano. La lluvia media anual de la zona de Cuatrociénegas es de 221 milímetros (mm) con fuertes fluctuaciones de un año a otro: ciclos secos se alternan con ciclos lluviosos; entre aquéllos destacan los comprendidos entre los años 1942-56, 1964-67, 1993-96 y 1998-2005. El año 2006 también fue seco, pero en los últimos meses del año ocurrieron lluvias y nevadas que elevaron la precipitación anual por arriba de la media.

La lluvia media anual varía en el área entre 180 milímetros en sus porciones sur y occidental, y 340 milímetros en su borde oriental. En general, la lluvia sobre las sierras es más cuantiosa que sobre los valles; en éstos, la mayor parte del agua de lluvia es retenida por el suelo seco y después evaporada. La temperatura media anual en la estación climatológica Cuatrociénegas es de 21.4 grados centígrados (oC). Debido a las elevadas temperaturas y a la escasa humedad ambiente, la evaporación potencial anual es mayor que 2,000 milímetros.

3.3 Hidrografía

La red de drenaje de la cuenca de Cuatrociénegas está conformada, por una parte, por arroyos de régimen transitorio que bajan de las sierras circundantes, cuyos escurrimientos torrenciales de corta duración se infiltran en su mayor parte en las porciones altas de los valles, y por otra, por arroyos de régimen perenne que conducen las aguas descargadas por cientos de “pozas”.

Las “pozas” son manantiales que brotan de la roca caliza a través de oquedades naturales de diferentes dimensiones; la gran mayoría de ellas diseminadas en el flanco oriental de la sierra de San Marcos y Pinos, y unas cuantas en su flanco occidental.

En las “pozas” de mayor tamaño y en los humedales adyacentes, se han formado ecosistemas que alojan gran variedad de especies –peces, invertebrados, tortugas, reptiles, virus, algas y bacterias-, algunas de ellas únicas en el mundo, de gran importancia ecológica y científica; además, por su belleza natural tienen gran atractivo turístico y algunas de ellas, por su profundidad y la claridad de sus aguas, son especialmente propicias para la práctica del buceo. En el flanco occidental de la sierra de San Marcos y Pinos destaca la “poza” de La Becerra, una de las de mayor tamaño, suministra agua para riego de unas 400-500 hectáreas dentro de la zona de Cuatrociénegas.

También en la porción occidental del valle, es notable la llamada Laguna de Churince, que no es una “poza” sino una depresión topográfica natural con dimensiones aproximadas de 1 kilómetro de largo, medio kilómetro de ancho y profundidad menor que 1 m. Es alimentada por la descarga de la “poza” del mismo nombre, por el esporádico escurrimiento superficial del área adyacente y por el acuífero de la porción occidental de Cuatrociénegas, que tiene su descarga natural en esta depresión topográfica; el caudal de estas alimentaciones varía estacional y anualmente en respuesta a las variaciones de la lluvia.

La laguna se encoge en los intervalos (meses o años) en que la cantidad de agua evaporada en ella es mayor que la alimentación que recibe, y se expande en caso contrario. Así, en los años 2003 y 2004 la laguna se extendió porque la lluvia fue relativamente abundante; en cambio, en el año 2005 su extensión se redujo porque fue excepcionalmente seco (la lluvia anual fue apenas de unos 130 mm en la estación climatológica Cuatrociénegas, mientras que la media respectiva es de unos 219 mm/año).

Variaciones análogas han sido documentadas en otras épocas: en fotografía incorporada a un informe de la Universidad de Texas se observa que en diciembre de 1964 la laguna (denominada Laguna Grande en el reporte correspondiente) tenía extensión significativa, lo cual se atribuye a que recibió cuantiosa alimentación durante el ciclo lluvioso 1960-63; en cambio, otra fotografía aérea contenida en el mismo la muestra casi seca, lo que se debe a que el ciclo 1964-68 fue muy seco.

Cuando la cuenca estaba en su estado natural, “pozas” y arroyos descargaban a lagos localizados en la parte baja del valle, donde el agua se evaporaba; el mayor de ellos ocupaba la porción oriental del valle y vertía sus excedentes a la cuenca vecina Río Salado-Nadadores (zonas de Lamadrid y Sacramento) a través de un estrechamiento. Los extensos salitrales formados ahí por evaporación, son los vestigios de ese lago. Se supone que la mayor parte del agua retenida en éste se evaporaba, por lo que su descarga hacia la cuenca vecina era intermitente y de reducida magnitud.

A fines del siglo XIX se inició el drenado artificial de la cuenca de Cuatrociénegas, mediante la construcción de canales para conducir el agua de las “pozas” a las zonas agrícolas de Lamadrid y Sacramento.

Ya en el siglo XX, en la década de los años “60”, se construyeron canales de mayor capacidad, con lo cual se modificó drásticamente el ciclo hidrológico de la cuenca, se acentuó su drenado artificial y, con ello, se provocó la desecación de los principales lagos y humedales que existían en la condición natural. En esta condición, casi la totalidad del agua se evaporaba dentro de la propia cuenca; en la actualidad, una fracción importante se utiliza en la agricultura.

Los canales son alimentados por las “pozas” de mayor tamaño. Mediante compuertas se controla el nivel del agua en la “poza”, el caudal descargado al canal y la cantidad de agua vertida al humedal adyacente. Un porcentaje significativo del caudal conducido se pierde por filtraciones en los canales no revestidos y en los revestidos mal conservados (tabla 2).

Tabla 2. Canales en Cuatrociénegas

CANAL	Año de construcción	Longitud del canal en kilómetros	CAUDAL capacidad máxima de conducción en litros por segundo (IMTA-04)	Superficie de riego en hectáreas	OBSERVACIONES
Santa Tecla	1966	54.6	220-320	600	Caudal conducido a zonas agrícolas de aguas abajo.
Saca Salada	1902	65	800-1300	1500	
La Becerra	1966	57.2	580-645	400-500	Caudal utilizado en el riego en Cuatrociénegas
El Venado	1969	9.9	66-98	100	Caudal utilizado en el riego en Cuatrociénegas
Antiguos Mineros del Norte	Sin Información	Sin Información	30-80	100	
Julio Arredondo	Sin Información	Sin Información	40-60	Sin Información	

La descarga de los canales presenta variaciones estacionales y anuales, en respuesta a las fluctuaciones de la descarga de las “pozas” y de la precipitación pluvial; se estima que el control mediante compuertas que se realiza en las más importantes, influye poco en esas variaciones. Varias fuentes reportan datos de aforos correspondientes a diferentes años, como se indica en el cuadro siguiente, según las cuales en su conjunto los canales descargan un caudal que varía entre 1,736 y 3,155 litros por segundo (54.7 a 99.5 millones de metros cúbicos por año). Sin embargo, los datos hidrométricos son inconsistentes, porque no se especifica el mes y el sitio donde se obtuvieron.

Tabla 3 Datos de aforos en canales en Cuatrociénegas

CANAL	PROFAUNA (1998), IMTA (2004) ¹	CNA, /LESSER, 2001	CONANP (2003-2006) ²	CNA/COAH (1973-2006)
Santa Tecla	220-320	328	280	328-400
Saca Salada	800-1300	1736	1600	1247-1736
La Becerra	580-645	600	SALIDA-760 AGRICOLA-600	600-768
El Venado	66-98	62	s/d	s/d
Pozas Azules	30-80	80	s/d	s/d
El Agua Grande	s/d	s/d	s/d	s/d
Julio Arredondo	40-60	250	220	s/d

Notas: (1), a la salida del valle de Cuatrociénegas (mín-máx); (2) Presentado en el Foro Nacional en Jiutepec, Mor., en 2006; cifras en litros por segundo; s/d: Sin determinar

Según los datos obtenidos en el estudio realizado por la Comisión Nacional del Agua en el 2001, considerados como más confiables porque se prestó especial atención a la hidrometría, los canales conducen un caudal total medio superior a los 3,000 litros por segundo, dando un volumen del orden de 99.5 millones de metros cúbicos anuales, de los cuales unos 17.8 se utilizan para riego dentro del valle de Cuatrociénegas y los restantes 81.7 son conducidos a las zonas de Lamadrid, Sacramento, San Buenaventura y Nadadores, a través de los canales Saca Salada y Santa Tecla.

La diferencia entre el caudal brotante y el entregado por los canales a las parcelas, corresponde al agua vertida a los humedales adyacentes a las “pozas” y a las pérdidas por conducción en la red de canales.

Dentro de la cuenca de Cuatrociénegas, las filtraciones en los canales sostienen a la vegetación natural adyacente y alimentan al relleno acuífero del valle. A través de un estrechamiento, la cuenca de Cuatrociénegas está conectada también con el valle de Calaveras, porción sur de la zona de Ocampo, ubicada al norte y aguas arriba de aquélla.

Antes de que se iniciara la extracción de agua subterránea en la cuenca de Ocampo, el agua brotaba en el estrechamiento formando manantiales y un arroyo permanente, los cuales, a su vez, sostenían una densa cobertura vegetal y niveles freáticos someros en el área del poblado de Cuatrociénegas.

Al incrementarse el bombeo de pozos en la cuenca de Ocampo, fue disminuyendo gradualmente su descarga a la de Cuatrociénegas, con la consiguiente reducción del caudal brotante, del escurrimiento y de la vegetación nativa en el estrechamiento, así como la consiguiente afectación a las norias, a las huertas y nogales existentes en el poblado referido y sus inmediaciones.

3.4 Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos de la zona son el resultado de la deformación tectónica de la Orogenia Laramide durante el Cretácico Superior-Cenozoico Temprano, que dio forma original al relieve, el cual posteriormente ha sido modificado por procesos exógenos de intemperismo y erosión. La zona se encuentra en etapa geomorfológica de madurez franca, reflejada en la notable erosión de las estructuras geológicas, definiéndose cuatro unidades principales siguientes:

Unidad Montañosa en el Golfo de Sabinas. Está conformada principalmente por las rocas calizas del Cretácico Inferior, que forman estructuras plegadas, falladas, fracturadas y modeladas por los agentes de intemperismo. Presenta laderas generalmente de fuerte pendiente topográfica y profundos cañones de paredes escarpadas. En algunas sierras de anticlinal la intensidad de la erosión ha sido tal, que se formaron porteros estructurales como el de “Menchaca”, “Agua Chiquita” y “San Marcos y Pinos”. La red hidrográfica dominante es de tipo dendrítico, aunque localmente existe del tipo rectangular controlada por los sistemas de fracturamiento.

Unidad Montañosa en la Plataforma de Coahuila. También está edificada por las rocas calizas del Cretácico inferior, caracterizada por amplios anticlinales (periclinales) con echados de suave inclinación que impone un relieve de suave pendiente topográfica. Tal es el caso de la Sierra La Fragua que limita al valle en su parte poniente.

Unidad de Pie de Monte. Se ha desarrollado principalmente en las estribaciones de las Sierras La Madera, San Marcos y Pinos, La Purísima y Agua Chiquita. En donde está conformada por depósitos aluviales dispuestos en conos aluviales de deyección de arroyos que descienden de las sierras.

Unidad del Valle de Cuatrociénegas. Se caracteriza por la parte plana de la zona con suave pendiente topográfica que ha sido rellenado por depósitos aluviales, eólicos y lacustres.

El Valle de Cuatrociénegas, de acuerdo con la información geológica recopilada, está labrado en la parte poniente sobre las rocas arcillosas de formaciones del Cretácico Superior, sobre la zona de contacto a través de la falla de cabalgadura La Madera que pone las secuencias del Golfo de Sabinas encima de las secuencias de la Plataforma de Coahuila. En la parte oriente está formado sobre el Sinclinal La Campana entre los Anticlinales San Marcos y Pinos y La Purísima, y que hacia el sureste integra el Valle de la Campana. El patrón de drenaje en el valle es poco denso y mal definido, debido a que los depósitos expuestos aluviales y eólicos tienen buena capacidad de infiltración, y a que la precipitación pluvial de la región es baja.

4. GEOLOGÍA

En las sierras afloran rocas calcáreas de edad Cretácica, formadas en el fondo de mares antiguos en épocas geológicas en que la mayor parte del actual territorio mexicano estaba cubierto por el mar. Estas rocas forman pliegues anticlinales y sinclinales, correspondiendo los primeros a las sierras y los sinclinales más profundos a los valles. Las calizas arrecifales, principalmente expuestas en la sierra de San Marcos y Pinos, por ser más porosas, fracturadas y solubles, propician la infiltración de gran parte del agua de lluvia y recargan a los acuíferos. En contraste, otras rocas, que subyacen a las anteriores y que afloran en las sierras y en el Potrero de San Marcos –entre los valles de El Hundido y Cuatrociénegas-, son prácticamente impermeables, por lo que constituyen barreras que impiden el almacenamiento y el flujo del agua subterránea. En los valles, que ocupan las partes bajas de la zona de que se trata, las rocas calcáreas están cubiertas por unidades calcáreo arcillosas del Cretácico Superior y materiales aluviales que datan del Cenozoico al Cuaternario –arenas, limos y arcillas-, producto del intemperismo y la erosión de las montañas circundantes, los cuales forman un delgado relleno acuífero granular cuyo espesor tiene un valor medio de 50 metros (figura 2).

Conforme a la historia geológica de nuestro país, sustentada en los principios básicos de la Geología, así como en numerosos levantamientos geológicos, estudios geofísicos de gran penetración en el subsuelo y pozos exploratorios petroleros de varios miles de metros de profundidad, durante millones de años las masas rocosas fueron emergiendo de los mares, dando origen al continente actual.

Las aguas marinas, que originalmente saturaban las rocas sumergidas, fueron drenadas por gravedad y desplazadas por el agua dulce infiltrada (producto de las lluvias) hacia el mar.

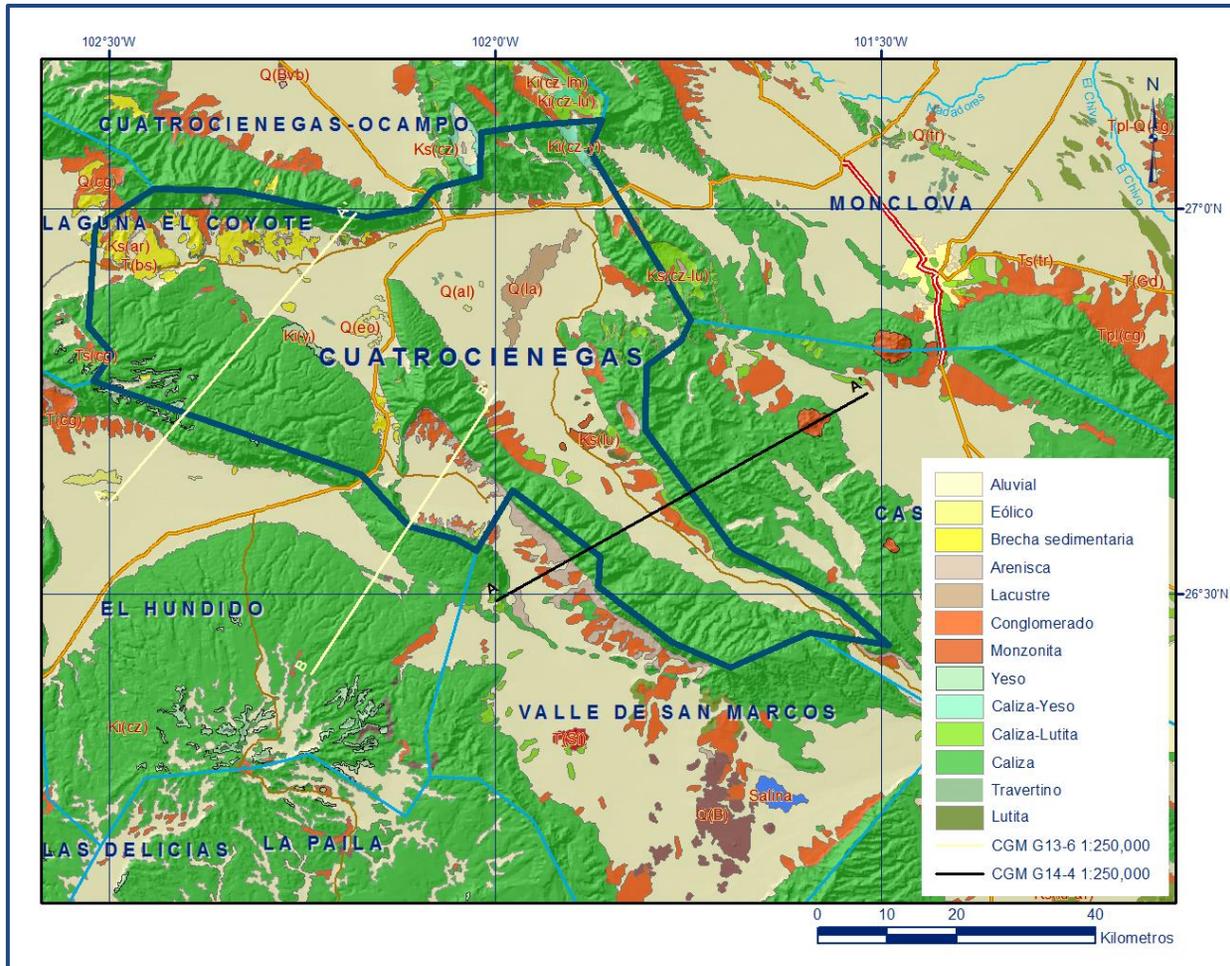


Figura 2. Geología general del acuífero

Actualmente, no hay posibilidad alguna de que exista un mar antiguo en el subsuelo de la zona de Cuatrociénegas o de las zonas adyacentes.

Las calizas (Grupo Washita Indiferenciado y Formación Aurora) y el relleno granular del valle conforman una sola unidad acuífera, aun existiendo intercalada la Formación Eagle Ford. Las calizas kársticas que afloran en la sierra de San Marcos y Pinos son la componente más favorable del acuífero por su gran porosidad y permeabilidad secundarias, asociadas con oquedades de disolución, fracturas y planos de estratificación. El desarrollo kárstico dio lugar a la formación de varios cientos de sumideros o dolinas, localmente denominados “pozos”, en los flancos de esa sierra. En contraste, la capacidad transmisora del relleno granular es de media a baja, debido a su reducido espesor y al predominio de clásticos de grano medio a fino; esta característica se refleja en el reducido rendimiento de los pozos que lo captan.

4.1 Estratigrafía

CRETÁCICO INFERIOR

Formación San Marcos

En el pozo San Marcos No. 2, localizado en el flanco oeste de la sierra del mismo nombre, fue perforada la Arcosa San Marcos con un espesor de 744 m, pudiendo ser dividida en tres miembros. El primer miembro de 80 m de espesor está compuesto de conglomerados arcósicos y subarcósicos de color rojo. El miembro medio que tiene 510 m de espesor está constituido de arcosas y subarcosas con clastos angulosos, pobremente clasificados y de estratificación gruesa, contiene algunas intercalaciones de guijarros. El miembro superior consiste de 150 m de espesor de arcosa conglomerática con estratificación media. Aflora en los Potreros San Marcos, Agua Chiquita y La Purísima, sus espesores en otras localidades son muy variables, en Potrero de Menchaca tiene 159 m, en Potrero de Padilla 57 m y en Potrero Barril Viejo solo afloran 13 m. Humphrey y Díaz (op.cit) indican un espesor de más de 1,000 m para la Arcosa San Marcos en el pozo Ohio-San Marcos No. 2.

Formación Patula (Kip)

Esta unidad geológica se ha cartografiado como una de las más antiguas de las rocas sedimentarias que afloran en la zona. Consiste de una secuencia de areniscas cuarcíferas con vetillas de calcita, que forman estratos de 10 a 40 cm de espesor, localmente fracturada y con nódulos de hematita. El color de intemperismo es verdoso, amarillento y en ocasiones rojizo; en muestra sana, tiene colores gris crema y gris oscuro. Sus afloramientos, poco extensos, forman pequeños lomeríos abombados en el núcleo del anticlinal de la Sierra Menchaca. Los componentes de estas rocas son de origen continental y fueron depositados en un medio marino de oxidación, en los márgenes de la Paleopenínsula de Coahuila y bajo una rápida subsidencia.

Formación Padilla (Kipa)

Está constituida por calizas dolomíticas, dispuestas en estratos de 20 a 40 cm de espesor, con intercalaciones de lutita y caliza arcillosa.

La coloración al intemperismo es gris amarillento y pardusco, en muestra fresca las dolomitas son gris oscuro, las lutitas gris café y las calizas arcillosas gris claro y pardusco. Aflora en el Potrero de Agua Chiquita, desconociendo su espesor total. Su contacto superior es concordante, aunque no se puede observar por estar cubierto por la Formación La Virgen. La Formación Padilla se depositó en un ambiente nerítico somero, que recibió gran aporte de clásticos y carbonatos de calcio.

Formación La Virgen (Kiv)

Está compuesta por yesos blancos terrosos, alternados con horizontes delgados de calizas oolíticas y calizas arcillosas. También es común encontrar delgados lentes de limolitas gris a café y lutitas amarillentas.

El espesor total del conjunto es de 500 m aproximadamente. Aflora en el núcleo del Anticlinal La Purísima. La abundancia de rocas evaporíticas revela que esta Formación se originó en un ambiente lagunar con circulación restringida hacia el mar y con aporte de detritos finos continentales.

Formación Cupido

Fue propuesta por Imlay (1937) para referirse a una secuencia calcárea que se encuentra en la localidad tipo en el Cañón El Mimbres, en la Sierra de Parras, Coahuila. Está constituida principalmente de calizas color gris claro oscuro, en estratos de 60 a 110 cm de potencia, con nódulos de pedernal y vetillas de calcita entre los estratos.

Sus capas expuestas frecuentemente presentan líneas estilolíticas y superficies de rugosidad por la disolución de carbonatos. Aflora en las Sierras Menchaca, San Marcos y Pinos, La Purísima y Agua Chiquita. Su espesor estimado en la zona es de 200 m. De acuerdo con su litología y con la paleogeografía, esta formación se depositó en un ambiente de plataforma de aguas neríticas de alta energía.

Formación La Peña

Fue definida por Imlay (1936) y se menciona como localidad tipo al flanco Norte de la Sierra Taraises. Es fácil identificarla en el campo, debido a que es poco resistente a la erosión formando puertos topográficos de erosión.

Es una Formación índice, que ha servido de apoyo para descifrar la estratigrafía de la región, aflora en todas las sierras de la zona. Consta de una secuencia alternante de lutitas y calizas arcillosas con estratos de limolitas. Su color al intemperismo es gris pardusco o rosáceo, y gris amarillento en muestra sana. Su espesor varía entre 5 y 50 m.

Es concordante con la Formación Aurora y se le considera del Aptiano-Albiano Inferior. Su litología indica un acarreo de detritos de las zonas positivas, durante movimientos verticales en el Aptiano, su ambiente de depósito es infranerítico.

Formación Aurora (Kia)

Fue definida por Burrows (1910), como una secuencia de calizas en la localidad tipo en la Mina La Aurora en la Sierra de Cuchillo Parado al Oeste de Ojinaga, Chihuahua. Aflora ampliamente en todas las sierras de la zona incluyendo la Sierra La Fragua que se encuentra dentro de la Plataforma de Coahuila. Está formada por calizas de color gris a gris crema, de textura fina, con estilólitas interestratificadas. La potencia de sus estratos es de 40 a 150 cm, siendo comunes los nódulos de pedernal y los horizontes delgados de lutitas. Su espesor estimado en la Sierra de Menchaca es de 300 m. Representa una transgresión marina que ocasionó inicialmente el depósito de calizas en ambiente de plataforma, al progresar la transgresión se acumularon las calizas con nódulos de pedernal propiamente en un ambiente de cuenca.

Formación Kiamichi (Kik)

Consiste de una alternancia de lutitas y calizas arcillosas, color al intemperismo café amarillento, al fresco el color varía entre café oscuro y gris claro. Su estratificación es de laminar hasta estratos de 40 a 60 cm de espesor. Se le estima un espesor promedio de 120 m. Aflora en la mayoría de las sierras y es fácilmente identificable por su puerto de erosión entre la Formación Aurora y el Grupo Washita. Fue depositada en mares someros con importante aporte de clásticos finos provenientes de zonas positivas.

CRETÁCICO SUPERIOR

Grupo Washita Indiferenciado (Ksw)

El Grupo Washita está integrado por las formaciones Georgetown, Del Río y Buda. El conjunto consiste de una secuencia alternante de calizas, lutitas y calizas arcillosas con nódulos de pedernal y hematita. El color al intemperismo es gris amarillento y los estratos son gruesos en la base, delgados a laminares en la parte media y delgados en la cima.

Este conjunto litológico aflora ampliamente en la zona, observándose en los flancos de las Sierras La Madera, Menchaca, Agua Chiquita, La Purísima, San Marcos y Pinos y La Fragua. El espesor total estimado del Grupo es de 250 m.

Formación Eagle Ford (Ksef)

Está compuesta por una secuencia de calizas muy arcillosas de estratificación laminar, alternadas con lutitas y margas de color gris oscuro. Presenta fragmentos de pelícipodos y ostrácodos.

Su espesor no es apreciable debido a que sus afloramientos están incompletos. Esta unidad aflora en las estribaciones de las Sierra La Madera y La Fragua. Su depósito tuvo lugar en un ambiente nerítico de aguas someras, con aporte de terrígenos y ligeras subsidencias.

Formación Austin

Consiste de una serie de calizas arcillosas color gris claro, ligeramente café que intemperiza a gris claro. Presenta estratificación delgada a gruesa y laminamiento en los estratos más arcillosos. Aflora formando pequeños montículos en el flanco de las Sierra La Madera y La Purísima.

CENOZOICO

Conglomerado Reynosa

Se compone básicamente de un conglomerado semiconsolidado a consolidado, de clastos calcáreos semiredondeados, mal clasificados, de tamaño variable desde gravas hasta guijarros, empacados en un cementante calcáreo. Como parte del Conglomerado Reynosa se agrupan los conos aluviales de deyección que se distribuyen preferentemente a lo largo del flanco sur de la Sierra La Madera, los cuales consisten de conglomerados y brechas sedimentarias que forman un heterogéneo pie de monte.

Rocas Graníticas

En la parte sureste del valle rumbo al Valle Las Campanas aflora un cuerpo intrusivo de roca ígnea indiferenciada por PEMEX (1971). Cuerpos intrusivos cercanos de rocas ígneas similares afloran en el núcleo de la Sierra Sacramento al suroeste de Monclova y en el Cerro Real Viejo al suroeste de Castaños.

En el Potrero de La Mula, al noroeste de Villa Ocampo se reportan afloramientos de un granito color gris verdoso, café amarillento al intemperismo, en contacto discordante con Formaciones del Cretácico Inferior.

Las rocas intrusivas de la región, de acuerdo con Mckee y otros (1990) se pueden interpretar como las rocas plutónicas del Triásico que cortan el arco proximal de la cuenca Las Delicias, constituyendo de esta forman parte del basamento geológico del complejo sedimentario marino.

En la zona en la que se ubica el acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas cuyo registro estratigráfico varía del Triásico Superior al Reciente (figura 2). Debido a la existencia de los elementos tectonoestratigráficos definidos anteriormente, la estratigrafía del área presenta diferencias notables en conformación. Por esta razón la descripción de las unidades se realiza de manera separada por elemento.

CUATERNARIO

Depósitos Aluviales, Eólicos y Lacustres del Cuaternario

Estos depósitos del Cuaternario al igual que los depósitos del Cuaternario junto con el Conglomerado Reynosa, rellenan el Valle de Cuatrociénegas. Son detritos derivados de la erosión de las rocas expuestas en las sierras que circundan el valle. Consisten de clásticos no consolidados de granulometría variada; gravas, arenas, limos y arcillas.

Los detritos más gruesos predominan hacia las márgenes del valle y los más finos hacia el centro del mismo. En el centro del valle existen depósitos de evaporitas denominadas por PEMEX como Evaporitas Becerra. Estos depósitos evaporíticos indican facies lagunares muy probablemente relacionadas con condiciones de descarga de agua subterránea.

INEGI (1988) cartografía pequeños afloramientos de travertino al oriente de las Lagunas Churince y Puente Zumbadora. Estos depósitos de travertino son originados por las descargas de manantiales que drenan a los acuíferos calizos de la región.

4.2 Geología Estructural

Los rasgos geológico-estructurales existentes en la zona son consecuencia de la deformación tectónica de la Orogenía Laramide durante el Cretácico Superior y Cenozoico sobre los sedimentos marinos de las provincias geológicas Cuenca de Sabinas y Paleopenínsula de Coahuila.

Los pliegues anticlinales y sinclinales en la Cuenca de Sabinas están conformados por rocas sedimentarias marinas de formaciones del Cretácico Inferior y Superior. Son pliegues estrechos, alargados, paralelos entre si, con flancos generalmente de fuerte buzamientos.

Los pliegues más importantes en esta provincia geológica son los siguientes:

Anticlinal La Madera: es un anticlinal simétrico edificado en gran parte en su núcleo por la Formación Aurora. Tiene una longitud de aproximadamente 60 km con orientación preferencial SE-NW, en su extremo sureste cambia de rumbo casi E-W.

Anticlinal Menchaca: es un anticlinal simétrico erosionado en su núcleo hasta niveles de la Formación Patula, formando el Potrero Menchaca. Mantiene una dirección preferencial SE-NW y tiene una longitud aproximada de 36 km.

Anticlinal San Marcos y Pinos: se trata de un anticlinal simétrico erosionado en su centro formando el Potrero del mismo nombre. En su núcleo aflora la Formación San Marcos. Está orientado SE-NW y tiene una longitud aproximada de 75 km. INEGI (1981) lo cartografía como recostado hacia el suroeste y buzante hacia el Valle de Cuatrociénegas en su extremo noroeste.

Anticlinal Los Capulines: es un anticlinal simétrico, también erosionado en su núcleo. Está orientado SE-NW y tiene una longitud de aproximadamente 100 km desde la altura de la población La Madrid extendiéndose hacia el noroeste en la Zona Geohidrológica de Ocampo.

Anticlinal de la Purísima: según PEMEX (1971) es un anticlinal simétrico, pero INEGI (1981) lo cartografía como recostado hacia el suroeste y buzante hacia el valle. Está erosionado en un núcleo hasta niveles de la Formación San Marcos y guarda una orientación SE-NW con una longitud del orden de 60 km.

Anticlinal de las Lajas: es un anticlinal simétrico con extensos afloramientos de la Formación Aurora con una orientación SE-NW y longitud aproximada de 32 km.

Anticlinal Agua Chiquita: es un anticlinal simétrico orientación SE-NW y longitud de 55 km. Se encuentra erosionado en su núcleo formando dos potreros en sus dos extremos.

Anticlinal Sacramento: es simétrico con una orientación SE-NW y longitud aproximada de 35 km.

Al oriente de la población de Sacramento se bifurca hacia el Valle de Monclova y hacia el Valle de Castaños.

Los pliegues dentro de la Paleopenínsula de Coahuila se caracterizan por su gran extensión conformados por capas de rocas sedimentarias del Cretácico dispuestas con echados de suave inclinación.

El pliegue más importante característico de la Paleopenínsula de Coahuila es el Anticlinal La Fragua, el cual está formado en rocas calizas de la Formación Aurora y Grupo Washita y se extiende alrededor de 80 km a lo largo de las sierras Puerto Colorado, La Fragua y el Granizo. Es un anticlinal asimétrico con orientación E-W en las sierras La Fragua y Puerto Colorado, cambia de dirección NW-SE en la Sierra El Granizo. Las capas en su flanco norte mantienen echados de suave inclinación en ese sentido hacia el Valle de Cuatrociénegas y en el flanco sur están casi verticales. Este anticlinal en la Sierra Puerto Colorado está erosionado en su núcleo, lo cual permite el afloramiento de la Formación San Marcos.

En esta sierra presenta una bifurcación hacia el norte. En el límite norte de la Sierra La Fragua muestra dos pequeños sinclinales uno orientado NW-SE y el otro NE-SW, los cuales se interpretan como pliegues de arrastre.

Otras estructura relevantes de la región originadas por la Orogenia Laramide son las fallas de cabalgadura que ponen en contacto a las secuencias de la Cuenca de Sabinas encima de la Paleopenínsula de Coahuila, la cual funcionó como un contrafuerte a los esfuerzos compresivos. Dentro de estas fallas inversas se describen las siguientes:

Falla La Madera que aflora en el borde sur y suroeste de la Sierra La Madera, poniendo en cabalgadura hacia el sur a la Formación Aurora encima de la Formación Eagle Ford. Esta Falla La Madera, más hacia el oriente antes de la población de Cuatrociénegas se continúa en el subsuelo del Valle de Cuatrociénegas y más hacia el noroeste, también se continua en el subsuelo del Llano el Macho y Laguna El Guaje. La Falla la Madera se puede apreciar en superficie por una longitud aproximada de 110 km.

Falla Barril Viejo que se manifiesta en el flanco suroeste de la Sierra La Purísima poniendo a la Formación Aurora encima de las Formaciones Kiamichi y George Town. Se puede apreciar en superficie por una longitud aproximada de 38 km con un rumbo SE-NW.

La Falla de Carranza que se expresa en el flanco suroeste del Anticlinal San Marcos y Pinos, a lo largo de una longitud de aproximadamente 30 km.

Más hacia el NW se continua por el borde sur de las sierras Puerto Colorado y La Fragua, por alrededor de 100 km más, lugar en donde se le conoce como Falla La Fragua y en donde pone en contacto a las formaciones Aurora y Acatita por encima de las formaciones Eagle Ford y Austin.

La traza de la Falla de Carranza y Falla La Fragua coincide con la traza de la Falla San Marcos postulada por McKee y otros (1990), como falla transformante que pudo formar parte del sistema de fallas transformantes que conectaban las crestas de expansión del piso oceánico del Atlántico con aquellas del Pacífico. La Falla San Marcos, de acuerdo con McKee y otros (op.cit), ha tenido varias etapas de actividad alternando con periodos de inactividad reconocidas desde el Neocomiano y que se continuaron hasta el Cretácico Superior-Cenozoico Temprano con actividad compresiva de la Orogenia Laramide.

Las estructuras relacionadas con la etapa distensiva posterior a los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide, son una serie de fallas normales y fracturas con orientaciones preferencial SE-NW y SW-NE. Entre estas fallas se puede citar las que INEGI (1999) reporta con más abundancia en las Sierras San Marcos y Pinos, La Purísima, La Madera y La Fragua.

4.3 Geología del subsuelo

Los únicos cortes litológicos con que se tiene son de los pozos del Ejido San Vicente localizado en el borde oriente del valle. En esta parte, los Depósitos Aluviales del Cuaternario tienen espesores de 20 m en el pozo San Vicente No. 1 y de 44 m en el pozo San Vicente 2.

El Conglomerado Reynosa se reporta compuesto en la base de areniscas calcáreas con intercalaciones de conglomerados calcáreos y en la cima de conglomerados calcáreos deleznales. El espesor del Conglomerado Reynosa es de 66 m en el pozo San Vicente No. 1 y de 118 m en el pozo San Vicente No. 2.

Rocas calizas posiblemente relacionadas con la Formación George Town fueron perforadas debajo del Conglomerado Reynosa en el pozo San Vicente No. 1 y lutitas probablemente asociadas con la Formación Kiamichi subyaciendo a este conglomerado en el pozo San Vicente No. 2.

Es de esperarse que el espesor de los depósitos de relleno del valle aumente desde las márgenes del valle hacia el centro del mismo, tal como se reporta en el Valle de Ocampo al norte con espesores de 6 a 12 m en los bordes del mismo y hasta 66 m en su parte centro-sur.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero está conformado por rocas calcáreas y clásticos no consolidados. Las primeras pertenecen al Grupo Washita Indiferenciado y a la Formación Aurora; afloran en las sierras circundantes, y se caracterizan por su gran porosidad y permeabilidad secundaria, asociadas con fracturas, planos de estratificación y conductos de disolución, y subyacen a calizas arcillosas de la Formación Eagle Ford que a través de sus fracturas permite el ascenso del agua subterránea. Los clásticos no consolidados – arenas, limos y arcillas- depositados en los valles, conforman un relleno acuífero de varias decenas de metros de espesor limitado inferiormente por las rocas calcáreo arcillosas e hidráulicamente conectado con ellas.

De acuerdo con las características litológicas de estas formaciones, se considera que el acuífero es predominantemente **de tipo libre**, aunque posiblemente en la parte centro del valle sea un tanto semiconfinado por la posible presencia de arcillas lacustres. La recarga natural del acuífero tiene lugar por infiltración de la lluvia en los afloramientos de calizas acuíferas y de los escurrimientos superficiales a lo largo de los arroyos. La principal zona receptora de recarga es la sierra de San Marcos y Pinos, estructura anticlinal muy alargada y de gran extensión superficial, donde afloran las calizas arrecifales, que son las rocas de mayor capacidad de infiltración. Esta sierra, ubicada en la porción central de la cuenca, divide al valle parcialmente en dos sectores, oriental y occidental, comunicados en la porción norte de la misma. El ataque químico del agua infiltrada sobre los minerales solubles de las rocas ha originado una faja de gran desarrollo kárstico, de unos tres kilómetros de ancho, en los flancos de la sierra de San Marcos y Pinos; principalmente en el oriental.

El relleno granular del valle, mucho menos permeable que la caliza, constituye un obstáculo al flujo subterráneo procedente de la sierra; consecuentemente, el agua talla un camino de menor resistencia ascendiendo a través de los conductos de la caliza, los cuales por abrasión y disolución son ampliados y conectados con las fracturas de las calizas fracturadas de la Formación Eagle Ford, que transmiten el agua hasta la superficie del terreno.

Cientos de dolinas o “pozas” son la manifestación superficial de este desarrollo kárstico. Así, la mayor parte del agua infiltrada en la sierra es descargada por el acuífero en los flancos de la misma; aunque una fracción menor pasa de las calizas al relleno granular del valle, en el cual transita hacia zonas de descarga situadas aguas abajo.

5.2 Parámetros hidráulicos

No se cuenta con suficientes pruebas de bombeo para determinar con claridad los parámetros de las propiedades hidráulicas del acuífero. La única información con que se cuenta al respecto proviene de la prueba de bombeo realizada por ININSA (1980) en el pozo DGZA-172 localizado en el sector sur de la población de Cuatrociénegas.

De esta prueba de bombeo se reporta una transmisividad de $0.00477 \text{ m}^2/\text{s}$. De acuerdo con los valores de los parámetros hidráulicos de los medios porosos (Freeze y Cherry, 1979) y considerando la composición litológica de los depósitos que rellenan el Valle de Cuatrociénegas, la conductividad hidráulica del acuífero puede variar en orden de magnitud entre 10^{-6} y 10^{-2} m/s y el coeficiente de almacenamiento entre 0.01 y 0.2.

5.3 Comportamiento hidráulico

5.3.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel freático es menor que 5 metros en las partes bajas del valle y aumenta con la elevación topográfica hacia los flancos de las sierras de La Fragua y de La Purísima.

5.3.2 Elevación del nivel estático

La configuración de niveles estáticos revela que el agua subterránea circula en el relleno acuífero, de los flancos de las sierras hacia las partes bajas de los valles, de una elevación de 780 metros sobre el nivel del mar (msnm), en el borde occidental del valle, a una de 700 msnm, en el sector oriental del mismo.

5.3.3 Evolución del nivel estático

En el estado natural de la cuenca el relleno descargaba por evapotranspiración en los humedales y lagos, donde afloran los niveles freáticos. En el curso del siglo XX, la cuenca fue drenada artificialmente con la construcción de los canales que conducen fuera de ella la mayor parte del agua descargada por las “pozas”.

Con ello, se modificó el régimen de recarga y descarga natural de la porción granular del acuífero: por un lado, se desecaron los lagos, desaparecieron algunos humedales y se abatieron los niveles freáticos; por otro, los canales no revestidos y los mal conservados se convirtieron en fuentes de recarga, que dieron lugar al brote de vegetación a lo largo de su curso.

5.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los estudios realizados en los años 2001 y 2004, se colectaron muestras de agua en pozos, “pozas” y canales, para determinar 84 parámetros físico-químicos y seis isotópicos. Los resultados de los análisis de las muestras “in situ” y de laboratorio, indicaron que en la zona de Cuatrociénegas la salinidad total del agua subterránea varía en el área entre menos de 500 y más de 5,000 miligramos por litro de sólidos totales disueltos.

En los pozos, que en el valle captan la parte granular del acuífero, la salinidad varía entre menos de 500 y algo más de 1,800 miligramos por litro, con tendencia creciente de los bordes del valle a las partes bajas del mismo, distribución espacial que confirma la dirección del flujo subterráneo de las áreas de recarga a las zonas de descarga.

Por otra parte, en las “pozas” la salinidad del agua varía entre 730 y más de 5,300 miligramos por litro, con similar distribución relativa, esto es, se trata de agua dulce o salobre. Dado que la salinidad media del agua marina es del orden de 35,000 miligramos por litro, este resultado desecha toda posibilidad de que el agua que brota en las “pozas” proceda de un mar antiguo. A las porciones central y oriental del valle corresponden las salinidades mayores, lo cual se atribuye a la concentración de sales producto de la evaporación en las áreas lacustres que existían antes de que la zona se drenara artificialmente; aunque en menor medida, esta condición aún persiste ya que los niveles freáticos se encuentran muy someros en el valle.

Respecto a la calidad del agua, en los sectores central y oriental de los valles su salinidad total, su dureza y su concentración de algunos elementos químicos –sulfato y sodio- exceden las máximas permisibles para consumo humano, establecidas Norma Oficial Mexicana 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.

El acuífero es muy vulnerable a la contaminación, especialmente en el área donde afloran las calizas acuíferas que alimentan a las “pozas”. Esto se debe a que esas rocas no tienen capacidad para atenuar contaminantes, por el tamaño de sus oquedades y fracturas. La parte granular del acuífero es menos vulnerable, porque tiene capacidad para absorber, eliminar y retener contaminantes; sin embargo, también ésta es limitada porque los niveles freáticos están muy someros en los valles. De lo anterior se infiere que, para la protección de los ecosistemas y de la calidad del agua del acuífero, deberá tenerse especial cuidado en el uso de suelo/agua y en las actividades humanas, que se autoricen en esas áreas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En el año 2001, se censaron en la zona de Cuatrociénegas 71 captaciones de agua subterránea: 62 pozos, 6 norias y 3 manantiales. Del total, 44 estaban activas y 27 abandonadas. En cuanto al uso del agua, las captaciones activas tenían la distribución siguiente: 28 agrícolas, 11 doméstico-pecuario y 5 público urbano. La mayoría de las captaciones están concentradas en el área del poblado de Cuatrociénegas y en sus inmediaciones. La extracción total de agua subterránea se estimó en **15.1 millones de metros cúbicos por año**, volumen destinado a usos agrícola, doméstico, pecuario y público urbano.

Posteriormente, en el 2004, en un estudio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se censaron también 71 captaciones (pozos y norias), de las cuales sólo 34 se encontraron activas; los 37 restantes se señalan como abandonadas. Su extracción total estimada fue también de 15.1 hm³/año. Asimismo, el estudio reporta la existencia de unas 300 “pozas” o manantiales, con una descarga media estimada en 3,000 litros por segundo; aunque según datos históricos de diferentes fuentes, se han aforado o estimado descargas superiores a los 4,000 litros por segundo.

Conviene aclarar que ésta no es propiamente una extracción, sino una salida natural del acuífero calizo. Del volumen de agua brotante, sólo 17.8 hm³/año son utilizados con fines agrícolas dentro de la zona de Cuatrociénegas; el volumen restante, de 81.7 hm³/año, es conducido fuera de ella por el canal Saca Salada para riego en las zonas de Lamadrid y Sacramento, y por el canal Santa Tecla para riego en las zonas de San Buenaventura y Nadadores. En total, en la zona de Cuatrociénegas se utilizan 31.8 hm³/año en la agricultura: 14.0 hm³/año de agua subterránea y 17.8 hm³/año de agua superficial.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La recarga del acuífero se estimó aplicando el método conocido como “Balance de Aguas Subterráneas” al intervalo de tiempo 1998-2000. La expresión más sencilla del balance es:

$$\text{RECARGA} = \text{DESCARGA} + \text{CAMBIO DE ALMACENAMIENTO}$$

La descarga total del acuífero es medida o estimada; el cambio de almacenamiento es cuantificado a partir de la evolución de los niveles del agua registrado en los pozos de monitoreo, y la recarga es determinada por diferencia en la ecuación de balance. En este caso particular, conforme al modelo conceptual descrito en el apartado 6 de este documento, la descarga del acuífero está compuesta por la descarga de las “pozas”, la evapotranspiración en áreas con niveles freáticos someros, la extracción de captaciones y el flujo subterráneo hacia fuera de la zona, a través del estrechamiento que la conecta con la zona adyacente de Lamadrid.

Con base en los datos obtenidos en los estudios, la descarga total del acuífero resultó de 145.2 hm³/año, volumen compuesto como sigue: 99.5 hm³/año de descarga de las “pozas”, 30.6 hm³/año de evapotranspiración y 15.1 hm³/año de extracción artificial; la salida subterránea a través del estrechamiento es de magnitud despreciable con respecto a las demás componentes.

El cambio de almacenamiento negativo del acuífero, de 2.2 hm³/año, se determinó multiplicando su coeficiente de almacenamiento por el volumen drenado o saturado durante el intervalo de balance; en general, los niveles del acuífero no tuvieron cambios significativos a escala regional, sólo en el área del poblado de Cuatrociénegas se registraron pequeños abatimientos locales. Aplicando estos valores en la expresión anterior, la recarga total del acuífero resulta:

$$\text{RECARGA} = 145.2 - 2.2 = 143.0 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Este volumen corresponde a la recarga media total que recibe el acuífero e incluye: I) la infiltración del agua de lluvia en las sierras, como componente principal; II) la infiltración de escurrimientos en los flancos montañosos y en el valle; III) la infiltración en la red de canales, IV) los retornos de agua en la zona urbana y en los terrenos agrícolas del propio valle, y V) la aportación procedente de la zona de Ocampo (Calaveras) a través del estrechamiento que las interconecta.

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:

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

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 **143.0 hm³/año**.

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 corresponde a la suma de 99.5 hm³/año de descarga de las “pozas” y 30.6 hm³/año de evapotranspiración.

Por lo que, **DNC = 130.2 hm³/año**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **18,157,597 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 143.0 - 130.2 - 18.157597 \\ \text{DMA} &= -5.357597 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **5,357,597 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

C.N.A., 1994. Manual para Evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos.

C.N.A., 1996. Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.

C.N.A., 1997. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. 3ª Edición.

C.N.A. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, "Que establece las disposiciones para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales".

ININSA, S. A., 1980. Estudio Geohidrológico Preliminar de la Zona Cuatrociénegas-Ocampo, Coahuila. Realizado para DGZA de SARH.

Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 2001. Estudio de Evaluación Hidrogeológica e Isotópica en el Valle del Hundido. Coah.