



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO GENERAL CEPEDA-SAUCEDA (0505),
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.....	8
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural.....	19
4.3 Geología del subsuelo.....	20
5. HIDROGEOLOGÍA.....	21
5.1 Tipo de acuífero.....	21
5.2 Parámetros hidráulicos.....	22
5.3 Piezometría.....	22
5.4 Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	22
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	24
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	26
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	28
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	29
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	29
7.1 Entradas.....	30
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	30
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	31
7.2 Salidas.....	33
7.2.1 Bombeo (B).....	33
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	33
7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm).....	34
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	34
8. DISPONIBILIDAD	34
8.1 Recarga total media anual (R).....	35
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	35
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	35
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	36
9. BIBLIOGRAFÍA	37

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 General Cepeda–Sauceda, definido con la clave 0505 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en la porción sur del Estado de Coahuila, entre los paralelos 25° 10' 26" y 25° 34' 33" de latitud norte, y los meridianos 101° 03' 21" y 102° 39' 25" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 3,300 km².

Limita al norte con el acuífero La Paila; al noreste con Paredón; al este con Saltillo–Ramos Arizpe y Cañón del Derramadero, al sur y oeste con el acuífero Saltillo Sur, todos ellos pertenecientes al Estado de Coahuila (figura 1). Geopolíticamente, el acuífero cubre parcialmente los municipios General Cepeda, Ramos Arizpe, Parras y Saltillo.

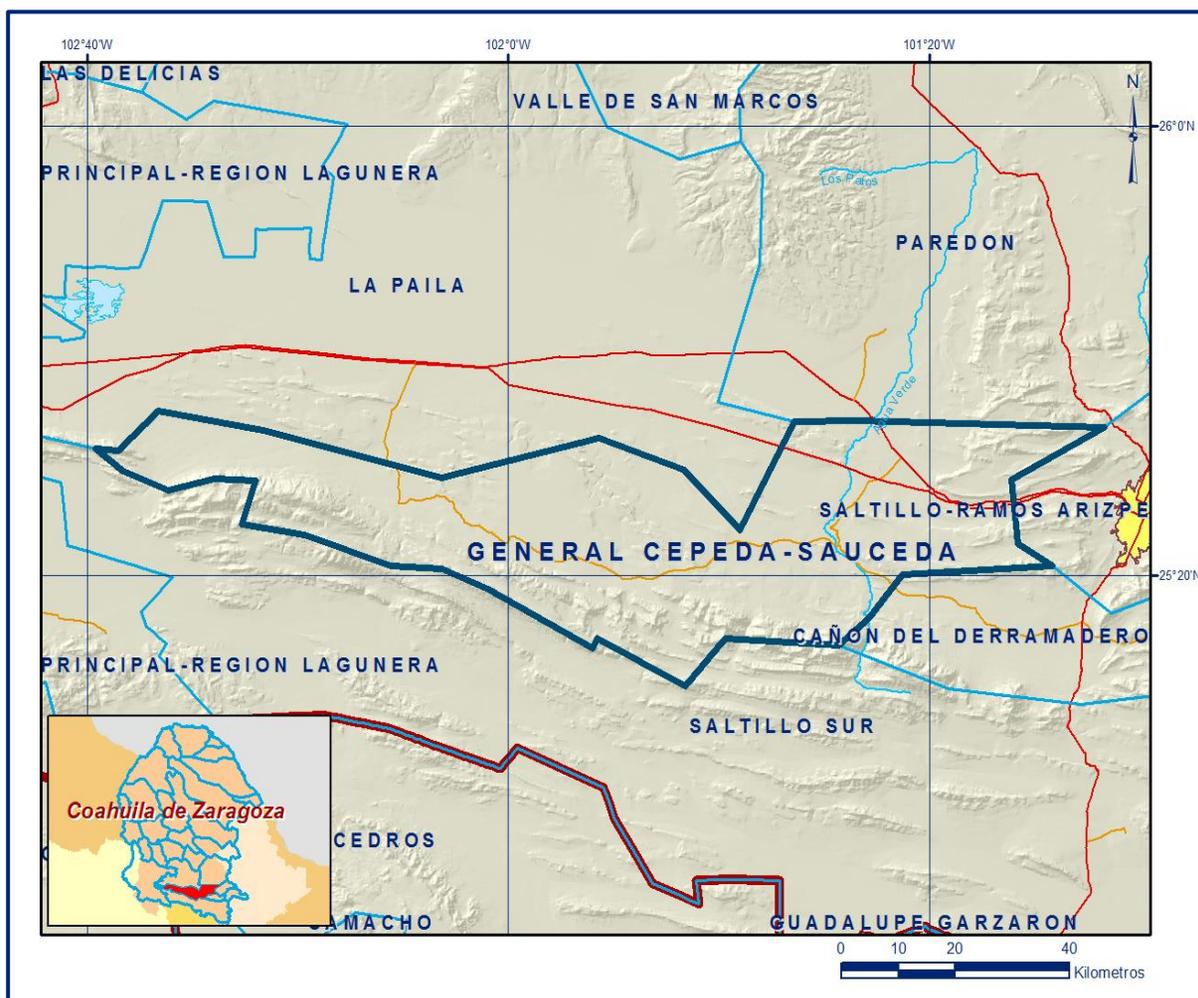


Figura 1. Localización del acuífero.

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

ACUIFERO 0505 GENERAL CEPEDA-SAUCEDA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	102	39	12.8	25	31	12.8
2	102	37	0.6	25	31	6.9
3	102	33	14.2	25	34	36.3
4	102	23	18.5	25	32	51.1
5	102	6	21.2	25	28	40.9
6	101	51	24.0	25	32	13.6
7	101	43	17.0	25	29	19.7
8	101	37	58.9	25	24	0.0
9	101	32	50.5	25	33	38.8
10	101	26	51.3	25	33	44.3
11	101	3	23.3	25	33	8.4
12	101	12	11.4	25	28	29.9
13	101	11	32.6	25	22	48.6
14	101	8	20.2	25	20	47.9
15	101	22	33.7	25	20	4.2
16	101	25	42.2	25	16	10.7
17	101	28	36.8	25	13	41.6
18	101	39	22.4	25	14	19.6
19	101	43	8.9	25	10	7.3
20	101	51	33.4	25	14	18.2
21	101	52	0.5	25	13	26.7
22	102	1	54.5	25	18	45.4
23	102	6	16.3	25	20	32.5
24	102	11	7.9	25	20	49.9
25	102	19	20.7	25	23	35.1
26	102	25	17.2	25	24	32.8
27	102	24	1.2	25	28	23.4
28	102	27	54.5	25	28	36.5
29	102	32	16.6	25	27	31.0
30	102	36	38.3	25	29	15.1
1	102	39	12.8	25	31	12.8

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero General Cepeda-Sauceda pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Coahuila. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; sólo una pequeña área de su extremo oriental está sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas subterráneas, de la zona no vedada por el diverso publicado el 7 de febrero de 1952, en el área que ocupa el municipio de Saltillo, Coah., y se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en dicha zona”, publicado en el DOF el 25 de abril de 1979, esta veda se clasifica como tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

La porción no vedada del acuífero General Cepeda-Sauceda, clave 0505, que abarca la mayor parte de su territorio, se encuentra sujeta a las disposiciones del “*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. Su territorio pertenece a dos Consejos de Cuenca, la porción central y occidental al Consejo de Cuenca Nazas-Aguanaval, y el extremo oriental al Consejo de Cuenca Río Bravo, instalados el 1 de diciembre de 1998 y el 21 de enero de 1999, respectivamente. El usuario principal del agua subterránea es el público-urbano. Dentro del acuífero no existen distritos o unidades de riego y los usuarios se encuentran organizados y constituidos en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) Acuífero General Cepeda-Sauceda, instalado el 30 de mayo de 2002.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación, los más relevantes se describen a continuación:

POSIBILIDADES GEOHIDROLÓGICAS DEL ÁREA DE “OJO DE AGUA”, LOS PANCHOS, MUNICIPIO DE PARRAS DE LA FUENTE, COAHUILA”. Elaborado por el Consejo de Recursos Minerales en 1983. El objetivo de este trabajo fue realizar un reconocimiento geohidrológico para identificar nuevos sitios para la perforación de pozos exploratorios en el área Ojo de Agua, presentar las características generales de la zona y de 15 pozos existentes con caudales entre 100 y 200 lps.

Señala que las condiciones litológicas y estructurales indican la posibilidad de que el acuífero de Ojo de Agua sea alimentado tanto por el agua freática de la Formación Mayrán, como por agua más profunda de las formaciones subyacentes, relacionada con alguna falla, fractura o caverna.

DICTÁMEN GEOHIDROLÓGICO-ISOTÓPICO PARA DEFINIR EL FUNCIONAMIENTO Y ZONAS DE RECARGA DEL CAMPO DE POZOS DEL ÁREA DENOMINADA OJO DE AGUA DE PATAGALANA, MUNICIPIO DE PARRAS, COAH. Elaborado por Lesser y Asociados S.A de C.V. para el Gobierno del Estado de Coahuila en 1986. El objetivo del dictamen fue conocer el potencial del acuífero y en especial determinar si el almacenamiento subterráneo corresponde con una recarga constante que pueda permitir una extracción continua, o bien, si se trata de un almacenamiento prácticamente sin recarga y por lo tanto de vida útil corta. El agua de los pozos de Ojo de Agua de Patagalana, proviene de las calizas de la sierra ubicada al sur.

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA ZONA COMPRENDIDA ENTRE PARRAS Y SALTILLO, COAH. Elaborado por Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua en 1999. Su objetivo fue determinar las condiciones geológico-estructurales y estratigráficas que gobiernan la ocurrencia de agua subterránea.

MONOGRAFÍA GEOLÓGICA-MINERA DEL ESTADO DE COAHUILA. Elaborada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), antes Consejo de Recursos Minerales en 1993. Describe la geología general del Estado de Coahuila y presenta un plano geológico regional, además de planos geológicos locales de diferentes distritos mineros.

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO GENERAL CEPEDA-SAUCEDA, ESTADO DE COAHUILA. Elaborado por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua en 2002. Presenta las características geohidrológicas generales del acuífero y plantea un balance de agua subterránea mediante el cual obtiene una recarga total de $57.4 \text{ hm}^3/\text{año}$, integrada por infiltración por lluvia, entradas subterráneas y recarga inducida por riego y canales de riego. La descarga total estimada es de $57.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, que corresponde en su mayor parte a extracción por bombeo y una pequeña salida subterránea. El volumen concesionado inscrito en el REPDA al 30 de abril de 2002 era de $48.5 \text{ hm}^3/\text{año}$. Obtiene una disponibilidad de agua subterránea en el acuífero de $8.8 \text{ hm}^3/\text{año}$.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO GENERAL CEPEDA-SAUCEDA, COAHUILA, Realizado en 2010 por el Instituto del Agua del Estado de Nuevo León para la Comisión Nacional del Agua.

El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), la superficie cubierta por el acuífero se encuentra casi en su totalidad en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, sólo una pequeña porción de su extremo nororiental pertenece a la Provincia Sierras y Llanuras del Norte. La Sierra Madre Oriental es una franja alargada orientada en sentido noroeste-sureste, desde Chihuahua-Coahuila hasta el Istmo de Tehuantepec, que presenta una flexión con orientación este-oeste entre Torreón y Monterrey; está integrada principalmente por sedimentos calcáreos del Cretácico y Jurásico que se encuentran plegados, formando valles estructurales en los sinclinales, y serranías en los anticlinales cuando las formaciones son resistentes a la erosión, pero cuando estos últimos dejan al descubierto un núcleo constituido por rocas menos resistentes, entonces se forman valles a sus centros. Debido a la intensidad de los plegamientos, la topografía es sumamente accidentada, ofreciendo perfiles típicamente aserrados.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la mayor parte del acuífero se localiza en la Subprovincia Pliegues Saltillo Parras, la porción sur pertenece a la Subprovincia Sierras Transversales y solo una pequeña porción de su extremo nororiental se ubica en la Subprovincia Laguna de Mayrán.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964 para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor parte del área que comprende el acuífero domina un clima clasificado como BS₀hw, que corresponde a un clima árido, semicálido, con temperatura media anual entre 18°C y 22°C. Al sur de la planicie, en las elevaciones topográficas de la Sierra Madre Oriental, el clima es del tipo BS₁kw, semiárido, templado, temperatura media anual mayor de 18°C. Ambos tipos de clima registran una temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, con lluvias en verano del 5% al 10.2% anual.

La temperatura media anual en la zona del acuífero varía entre 18 y 20°C en la planicie y flancos de las sierras y disminuye hasta 10°C en las partes altas de las sierras. La precipitación media anual varía desde 155 mm en el valle del extremo poniente, rumbo a Viesca, hasta 500 mm en las regiones altas de las sierras. El periodo de lluvias se presenta entre mayo y octubre, mientras que el estiaje entre noviembre y abril. Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 4 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: General Cepeda, Parras, Viesca y Carneros.

De acuerdo con estos datos se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **378.6 mm y 20.4 °C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor promedio de **1.920 mm** anuales.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se encuentra ubicada en dos regiones hidrológicas; la porción oriental pertenece a la Región Hidrológica 24 "Bravo Conchos", Cuenca del Río Bravo-San Juan (24B), y la porción occidental en la Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval", Cuenca de Las lagunas de Mayrán y Viesca.

La Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos se localiza al norte del país en la parte central de América del Norte, su cauce principal y la frontera entre los Estados Unidos de América y los Estados Unidos Mexicanos es el Río Bravo, que comprende desde las ciudades de El Paso, Texas y Ciudad Juárez, Chihuahua, hasta su desembocadura en el Golfo de México; tiene una superficie de escurrimiento de 226,275 km².

El Río San Juan, es la corriente principal de esta cuenca, es el segundo en importancia por la margen derecha del Río Bravo. Por su ubicación geográfica la cuenca del Río San Juan está expuesta a las perturbaciones ciclónicas del Golfo, que periódicamente causan avenidas extraordinarias.

La Región Hidrológica 36 “Nazas-Aguanaval” está ubicada al norte del país, en la altiplanicie septentrional; ocupa porciones de los estados de Coahuila, Durango y Zacatecas, y abarca las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval. Sus ríos más importantes son el Nazas, que nace en el Estado de Durango, y el Aguanaval que tiene su origen en el Estado de Zacatecas.

La Cuenca Lagunas de Mayrán y Viesca, es una región de cuencas cerradas integrada por las lagunas de Viesca y de Mayrán; debido a la muy escasa precipitación y la topografía predominantemente llana, los escurrimientos superficiales en esta región pueden considerarse nulos.

3.4 Geomorfología

En la superficie cubierta por el acuífero se puede distinguir 3 unidades geomorfológicas principales: Sierras calcáreas, valles y lomeríos. En la porción sur del acuífero, se presenta una serie de sierras anticlinales formadas por rocas calcáreas del Cretácico que forman parte de la Sierra Madre Oriental. Tienen forma alargada en dirección este-oeste y se elevan a entre 2400 y 2700 msnm. Destacan entre ellas la Sierra Parras al poniente, la Sierra Patagalana en la zona central y las sierras El Rancho, Matamba, La Panocha y Huachichila, ubicadas al oriente.

La Sierra Parras supera la elevación de 2700 msnm, mientras que el valle (a la altura de la población de Parras), tiene una elevación promedio de 1500 msnm. En el área de Patagalana, la sierra se eleva a 2500 msnm y a 850 metros sobre el valle, que se extiende hacia el norte.

En el área de General Cepeda, las sierras se elevan a 2400 msnm, mientras que el valle se ubica a 1400 msnm. Los flancos de las sierras tienen pendientes que varían de moderadas a fuertes y se encuentran disectadas por arroyos, orientados preferentemente en dirección perpendicular a las sierras, que han labrado profundos cañones.

Entre las poblaciones General Cepeda y Parras, existen valles a una elevación que varía de 1,300 a 1,600 msnm, separados por sierras aisladas que corresponden a las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. Estos valles presentan formas generalmente planas con ligera pendiente, en los que circulan algunos arroyos que descienden de la sierra que en la mayoría de los casos desaparecen por infiltración al llegar a ellos.

Entre los valles que se extienden entre Parras y General Cepeda, se encuentran lomeríos de suave pendiente con formas variadas pero principalmente en forma de cordones alargados, que corresponden a remanentes de erosión de lutitas calcáreas del Cretácico Superior, que forman la parte superior de los anticlinales de la Sierra Madre Oriental y que por su menor competencia (resistencia a la erosión) respecto a las calizas del Cretácico Medio e Inferior, han sido erosionadas o se encuentran cubiertas y solo quedan restos o remanentes de ellas. Los lomeríos presentan alturas desde 50 hasta 200 m sobre el valle.

4. GEOLOGÍA

La geología regional de la zona está representada por rocas sedimentarias marinas y continentales, cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Jurásico (Mesozoico) al Reciente.

El Jurásico está representado por las formaciones Zuloaga, La Gloria y La Casita. El Cretácico Medio e Inferior por las formaciones Taraises, Cupido, La Peña, Aurora-Treviño (Tamaulipas Superior) y Cuesta del Cura.

La secuencia geológica culmina con las formaciones del Cretácico Superior Indidura, Parras y Grupo Difunta. En los valles se encuentran materiales aluviales del Cenozoico y Cuaternario.

La distribución de las diferentes unidades litológicas se presenta en la figura 2.

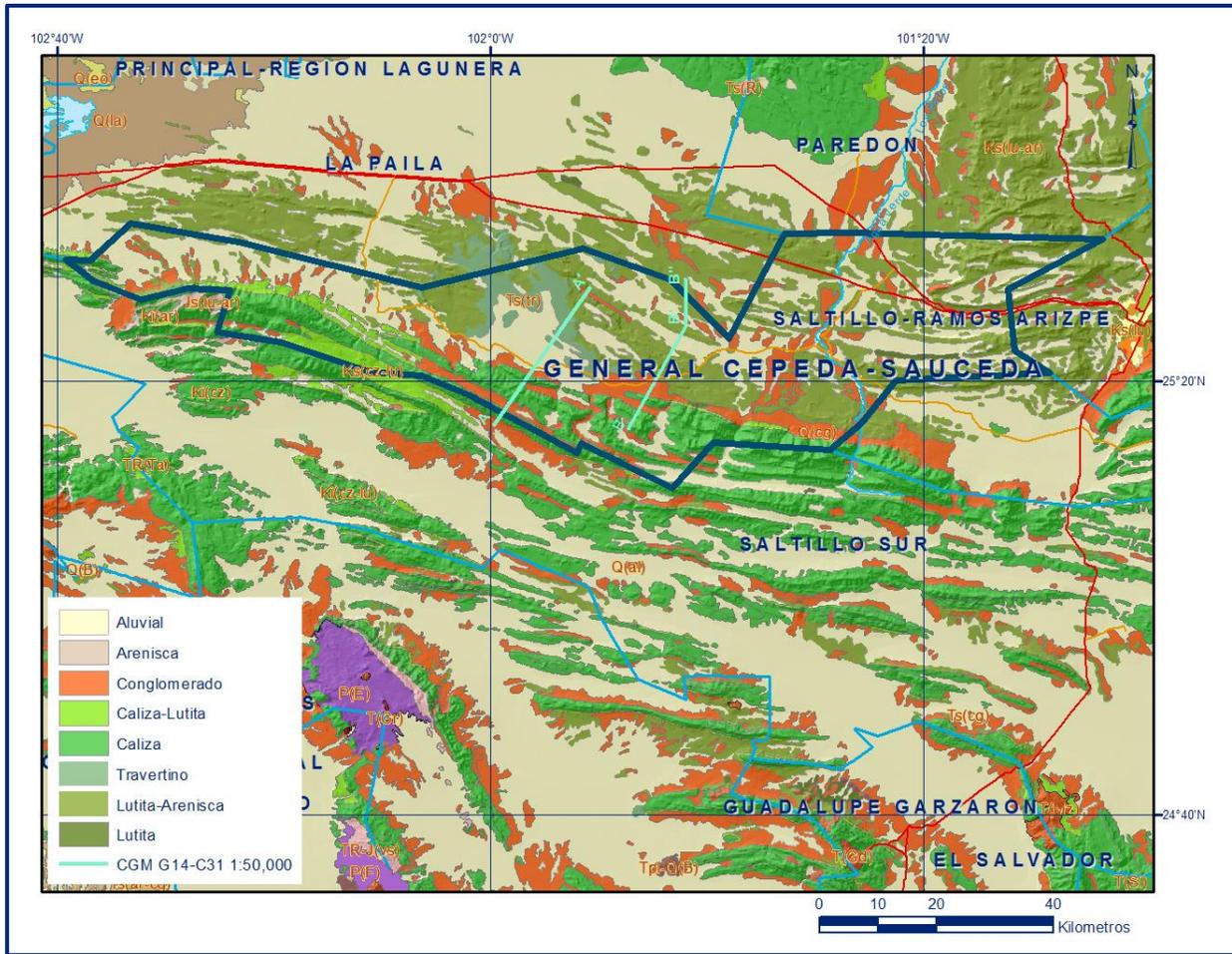


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La geología regional de la zona está representada básicamente por rocas sedimentarias marinas y continentales, cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Jurásico al Reciente. Su descripción se presenta a continuación, de la más antigua a la más reciente.

JURÁSICO

Formación Zuloaga

Esta formación fue descrita originalmente por Burckhardt (1906) y Bose (1923) en la región norte-central de México, llamándola “calizas con nerineas”. Imlay (1938) asignó el nombre de Formación Zuloaga a una secuencia de calizas dispuestas en estratos gruesos, con nódulos de pedernal negro y contenido fósil de bivalvos y gasterópodos, señalando como localidad tipo la Sierra Sombrerillo, ubicada al norte del Poblado Melchor Ocampo, Zac. Está constituida por una secuencia de rocas carbonatadas (mudstone a packstone), estratificadas y con nódulos de pedernal.

Es la unidad más antigua que aflora en la región, por lo que no se aprecia su contacto inferior con las rocas que le subyacen, subyace concordantemente a los sedimentos clásticos de la Formación La Casita por lo que se le asigna una edad correspondiente Jurásico Superior (Oxfordiano-Tithoniano). Sus principales afloramientos se encuentran distribuidos en la parte axial de los anticlinales La Prieta (en donde cambia de facies a la Formación La Gloria), Juan Pérez y El Marrano.

Formación La Gloria

Fue definida formalmente por Imlay (1936) en su localidad tipo que son los afloramientos expuestos en el Cañón del Mimbres, ubicado en la Sierra La Gloria, en dirección este-sureste de Parras. En este sitio existe una secuencia de calizas intercaladas con areniscas, las cuales gradúan a facies conglomeráticas. Aflora hacia el extremo occidental de los anticlinales de Taraises y La Prieta, en donde conforma la parte axial de los pliegues.

Se encuentra constituida hacia la cima por intercalaciones de areniscas (ortocuarzitas), capas gruesas de calizas recristalizadas y packstone de peloides; en la base de la unidad únicamente se manifiesta la fracción arenosa. Las rocas presentan una estructura compacta y comúnmente se observan diseminaciones de óxidos, así como un fracturamiento intenso tanto en la zona axial como en el flanco frontal del pliegue, lo cual le atribuye a la roca una permeabilidad adicional.

La cima de la unidad se relaciona concordantemente con los sedimentos clásticos de la Formación La Casita.

Por su contenido faunístico y posición estratigráfica, Kellum (1932) le asignó una edad correspondiente al Jurásico Superior, comprendiendo en su totalidad al Oxfordiano.

Formación La Casita

Definida formalmente también por Imlay en 1936, quién designó como localidad y sección tipo a la secuencia sedimentaria encontrada en el Cañón La Casita, ubicado al suroeste de Saltillo, Coahuila.

Está constituida por una serie de intercalaciones de areniscas, lutitas, limolitas calcáreas y calizas arcillosas. Los sedimentos arenosos y arcillo-calcáreos de la unidad se manifiestan hacia los flancos del extremo occidental de los anticlinales Taraises y La Prieta.

Las areniscas se encuentran dispuestas en estratos delgados, presentan una estructura compacta y un fracturamiento moderado a intenso en función de su ubicación dentro del pliegue, ya que, en el flanco frontal del anticlinal el fracturamiento es más intenso que en el trasero o anterior.

La fracción arcillosa-limosa está estratificada en capas, presenta una fractura astillosa y un intemperismo nodular. La secuencia de calizas arcillosas presenta pequeños y escasos nódulos y diseminaciones de óxido de hierro, vetas y fracturas de calcita.

Las areniscas son las rocas que predominan en la secuencia y se manifiestan a lo largo de todo el espesor de la formación, en tanto que las limolitas y lutitas se manifiestan en forma subordinada y las calizas ocurren todavía en menor proporción que la fracción arcillo-limosa.

Su espesor estimado es de 300 a 400 m. Ambos contactos, tanto el inferior como el superior, son concordantes con las formaciones La Gloria y Taraises respectivamente. Es correlacionable con la Formación La Caja, su equivalente en facies de cuenca de la región de Concepción del Oro.

CRETÁCICO INFERIOR Y MEDIO

Formación Taraises

Imlay (1936) describió y definió esta unidad como una alternancia de calizas arcillosas y lutitas, que afloran en el sector occidental de la Sierra de Parras, en los flancos del anticlinal Taraises, en el borde frontal del anticlinal La Prieta, en la parte axial del anticlinal El Puerco, así como en el flanco frontal y parcialmente el núcleo del anticlinal Juan Pérez. Sobreyace concordantemente a la Formación La Casita y su contacto superior con la Formación Cupido es nítido y concordante y de igual forma con la Formación Tamaulipas Inferior, cuyo cambio es transicional.

En el primer caso la zona de contacto está representada por un cambio litológico, en donde los sedimentos carbonatados con textura soportada por lodo calcáreo (mudstone y wackstone) de la Formación Taraises cambian a capas gruesas de packstone de miliólidos de la Formación Cupido. En el segundo caso el cambio se da en el incremento del espesor de los estratos y en la desaparición de las mudstone arcillosos. De acuerdo a su posición estratigráfica, la edad asignada es Berriasiano-Hauteriviano Inferior.

Formación Tamaulipas Inferior

Nombre utilizado por Muir (1936) para designar a la porción basal de la secuencia calcárea que Belt (1925) previamente había definido como "Tamaulipas Limestone". Su localidad tipo se ubica en el Cañón La Borrega, ubicado al oriente de la Estación Zaragoza, Tamaulipas. Sus afloramientos se encuentran distribuidos en los flancos del anticlinal Juan Pérez y en la parte axial del anticlinal El Marrano.

Está conformada por una secuencia de mudstone en ocasiones recristalizado, con intercalaciones de estratos delgados de lutitas. La presencia de estilolitas paralelas a la estratificación lapiaz, así como vetillas y fracturas de calcita son estructuras comúnmente observables a lo largo de toda la columna, en tanto que el pedernal en forma de lentes, las oquedades por disolución y la presencia de óxidos diseminados son más selectivas. La recristalización se presenta en los estratos más fracturados, principalmente en el flanco frontal del anticlinal.

Su espesor varía de 550 a 600 m. Sobreyace por medio de un contacto transicional y concordante a la Formación Taraises y su contacto superior con la Formación La Peña es nítido y concordante. Lateralmente constituye la facies de cuenca dentro del complejo arrecifal de la Formación Cupido.

Formación Cupido

Con este nombre Imlay en 1937 definió originalmente a una secuencia de calizas de estratificación delgada y media principalmente, cuya localidad tipo es la base de la pared norte del Cañón del Mimbres, ubicado en la porción media de la Sierra Parras, Coahuila.

Se encuentra expuesta en los flancos de los anticlinales Taraises y La Prieta, y conforma parcialmente el núcleo de los plegamientos Cerro Prieto y La Casita de La Cuesta.

Sobreyace concordantemente a la formación anterior y está constituida principalmente por tres facies diferentes: 1) Facies arrecifales con abundantes monopléuridos, caprínidos, ostras y fragmentos de corales y coriáceas, que afloran preferentemente en la porción norte de la Curvatura de Monterrey; 2) Facies de pre-arrecife, constituidas por brechas derivadas de los arrecifes, que bordean las facies arrecifales en la parte norte y noroccidental de la citada megaestructura, y 3) Facies de cuenca, representadas por calizas de grano fino de estratificación media a gruesa, con abundantes nódulos de pedernal, que aflora en la región sur de la megaestructura.

El espesor de las facies pre-arrecifales es mayor en las facies arrecifales y menor en las facies de cuenca. Por la datación que proporcionan sus microfósiles (miliólidos) y por su posición estratigráfica que ocupa entre las formaciones Taraises y La Peña, se le asigna una edad correspondiente al Hauteriviano Superior-Aptiano Inferior que permite correlacionarla cronológicamente con la Formación Tamaulipas Inferior, su equivalente de facies de cuenca.

Formación La Peña

Definida por Imlay (1936) y Humhrey (1946) en el flanco norte de la Sierra de Taraises, cuyos afloramientos se localizan en los flancos de los anticlinales. Está compuesta por una secuencia homogénea de calizas arcillosas y lutitas calcáreas de color gris oscuro, dispuestas en estratos delgados a medianos, cuyo espesor estimado varía de 40 a 50 m. Su contacto inferior con la Formación Tamaulipas Inferior o con la Formación Cupido es nítido y concordante; del mismo modo subyace a la Formación Tamaulipas Superior, en donde la zona de contacto está definida por el cambio de una sedimentación calcáreo-arcillosa a una secuencia netamente carbonatada. Los microfósiles que contiene indican que tiene una edad Aptiano Superior.

Formación Tamaulipas Superior (Formación Aurora)

Fue descrita originalmente por Stephenson (1921) y definida formalmente por Muir en 1936, en la localidad tipo que es la secuencia de carbonatos expuestos en el Cañón La Borrega; la dividió en tres miembros, de los cuales el superior corresponde a la Formación Tamaulipas Superior. Está representada por capas gruesas a masivas de calizas densas, de color gris a gris pardo al intemperismo y gris claro a oscuro en muestra fresca; su espesor estimado es de 450 m. Presenta nódulos y bandas de pedernal de color gris claro, que generalmente se asocian con capas de estratificación ondulada (boudinage), y líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación.

Sobreyace concordantemente a la Formación La Peña mediante un cambio nítido y abrupto en la sedimentación; su contacto superior con la Formación Cuesta del Cura es concordante y de forma transicional, por lo que generalmente es muy difícil definirlo. Aflora en todos los flancos de las estructuras anticlinales y sinclinales, con excepción de la porción central de los plegamientos Cerro Prieto y la Prieta, así como el extremo oriental del anticlinal Las Pelonas, en los cuales conforma su parte axial. Por estudios micropaleontológicos y posición estratigráfica, se le asigna edad Albiano Inferior-Superior y es equivalente a la Formación Aurora.

Formación Cuesta del Cura

Imlay (1936), fue quien originalmente la definió al oeste de Parras, Coahuila, en donde midió 65 m de estratos delgados y ondulados (boudinage) de calizas de grano fino, con abundantes capas y nódulos de pedernal negro, en algunas ocasiones intercaladas con estratos de lutitas. Tiende a formar pliegues tipo chevron y estructuras laminares con intemperismo lajoso; su espesor estimado es de 400 m. Sobreyace a la Formación Tamaulipas Superior, en contacto transicional y concordante, y subyace a la Formación Indidura mediante contacto concordante y abrupto. De acuerdo a la posición estratigráfica que guarda con las formaciones Tamaulipas Superior e Indidura y por su contenido de microfauna, se le asigna una edad correspondiente al Albiano Superior a Cenomaniano Inferior.

Formación Treviño

Fue definida por Romeo Garza (1973) en la localidad tipo del Cañón de Treviño, ubicado en la porción norcentral de la Sierra La Paila, Coahuila. Consta de una secuencia de calizas de plataforma de color gris, dispuestas en estratos gruesos, medianos y delgados, con restos fósiles de miliólidos y escasos rudistas. Presenta fracturamiento medio a intenso, recristalización, cavidades de disolución, lapiaz y planos estilolíticos, fracturas rellenas de calcita y en ocasiones dolomitización.

Sobreyace de manera transicional y concordante a la Formación Acatita; en tanto que su contacto superior con la Formación Indidura es abrupto pero concordante. Se le asigna una edad que ocupa un intervalo correspondiente al Albiano Medio y Superior. Su espesor varía de 250 a 300 m.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Indidura

Definida por Kelly en 1936 en su localidad tipo que son los afloramientos que se encuentran en el cerro del mismo nombre, ubicado en la Sierra Santa Ana.

Consta de una secuencia de lutitas y calizas, dispuestas en capas delgadas, de color gris en muestra fresca y pardo-amarillento al intemperismo. Presenta impresiones y moldes de bivalvos (*inoceramus*), estructura laminar, fracturas y vetillas selladas por calcita, así como diseminaciones de óxidos. Aflora en gran parte del área de estudio constituyendo regularmente el núcleo de las estructuras sinclinales.

Sobreyace de forma concordante y abrupta a las Formaciones Tamaulipas Superior y/o Cuesta del Cura; en tanto que su contacto superior, es transicional y concordante con la Formación Parras. Se le asigna una edad correspondiente al periodo Cenomaniano Inferior-Santoniano y su espesor estimado varía de 350 a 800 m.

Formación Parras

Fue definida por Imlay en 1936 para referirse a una potente secuencia de lutitas carbonosas negras con escasas intercalaciones de areniscas, en la localidad tipo que se ubica al oriente de Parras, Coahuila.

Está constituida por una litología muy homogénea de lutitas calcáreas y calizas arcillosas, estas últimas intercaladas en forma esporádica dentro de la secuencia arcillo-calcárea. Las lutitas son calcáreas de color negro a gris oscuro, estratificadas en capas delgadas y medianas.

Al intemperismo presentan un aspecto masivo debido a que la fractura astillosa o esquistosidad destruye los planos de estratificación. Se considera que la potencia de la secuencia arcillo-calcárea varía de 400 a 800 m y cubre de manera concordante y transicional a la Formación Indidura, por lo que es difícil precisar la zona de contacto entre ambas unidades. Su contacto superior, dentro de los límites del acuífero, es con los sedimentos continentales del Reciente por medio de discordancia angular.

Dentro de la zona de estudio es una formación geológica importante, ya que constituye la mayor parte del subsuelo en la parte plana del valle. Aflora en el núcleo del extremo oriental del Sinclinal Taraises, en la porción central del Sinclinal La Tomatera y en los lomeríos ubicados de la vertiente septentrional de la Sierra de Parras. Junto con el Grupo Difunta, corresponden a los sedimentos terrígenos característicos de la Cuenca de Parras. Tiene una edad Santoniano-Coniaciano y se correlaciona con la Formación San Felipe de la Sierra Madre Oriental y de la Cuenca de Sabinas.

Grupo Difunta

De manera transicional y concordante sobre las lutitas de la Formación Parras, se localiza El Grupo Difunta, nombre con el que Imlay (1936) se refirió a una sección ubicada al norte del extremo poniente de la Sierra de Parras, constituida por una secuencia monótona de areniscas y lutitas, cuyo espesor conjunto alcanza hasta 3,000 m.

Intercalados con la arenisca siempre se encuentran lechos de lutita y limolita calcárea dispuestas en capas laminares y físis, con aspecto astilloso, de colores muy variados. Se subdivide en siete formaciones en la porción occidental y oriental de la Cuenca de Parras.

Formación Cerro del Pueblo

Está compuesta por una secuencia de lutitas, areniscas y limonitas cuya localidad tipo se encuentra al noroeste de Saltillo, sobre la carretera No. 57 a Torreón. Sobreyace a las lutitas de la Formación Parras y está cubierta por las capas rojas de la Formación Cerro Huerta. Su mayor espesor es de 500 m en las inmediaciones de Saltillo y se correlaciona con la Formación Méndez de la Cuenca de Burgos y con la Formación San Miguel y Olmos de la Cuenca de Sabinas. Se le asigna una edad correspondiente al Santoniano.

Formación Cerro Huerta

Secuencia de areniscas, lutitas y limonitas rojas y verdes que afloran en la porción central y oriental del acuífero. Sobreyace a la Formación Cerro del Pueblo y subyace a la Formación Cañón del Tule. En su localidad tipo, ubicada en las inmediaciones de Saltillo, presenta un espesor de 980 m.

Formación Cañón del Tule

Secuencia de sedimentos arcillosos que sobreyace concordantemente a la Formación Cerro Huerta y subyacen a la Formación Imágenes, su localidad tipo se encuentra en el Cañón del Tule y aflora principalmente en las porciones central y occidental de la cuenca.

Formación Las Imágenes

Constituida por rocas arcillo-calcáreas que afloran en la porción central de la Cuenca de Parras, sobreyace a la Formación Cañón del Tule, y subyace a la Formación Cerro Grande.

Formación Cerro Grande

Está integrada por grauvacas calcáreas y su localidad tipo se encuentra en el Cerro Grande, ubicado al oeste del poblado Las Imágenes, aproximadamente a 20 km de Saltillo.

Formación Las Encinas

Alternancia de capas delgadas, medias y gruesas de lutitas, areniscas y limonitas cuyo espesor conjunto es aproximadamente 20 m; su sección tipo se localiza a 28 km al norte de Saltillo. Aflora principalmente en la porción norte de la Cuenca de Parras. Sobreyace a la Formación Cerro Grande y subyace a la Formación Rancho Nuevo.

Formación Rancho Nuevo

Corresponde a una alternancia de estratos delgados a medios de lutitas, areniscas y limonitas que subyacen a la Formación Las Encinas, su localidad tipo se encuentra a 27 km de Saltillo. Aflora en la porción norte de la Cuenca de Parras.

Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios que se encuentran expuestos en la zona están constituidos por arenas, gravas y cantos rodados de calizas. Cerca de las sierras, predominan los cantos rodados, principalmente a lo largo de los arroyos. Su espesor varía de unos cuantos metros hasta 100 m y afloran en los valles y en los cauces de ríos y arroyos.

4.2 Geología estructural

La interpretación del modelo digital del terreno, la imagen de satélite y la cartografía geológica permitió identificar la existencia de dos bloques morfoestructurales que corresponden a la Sierra de Parras o Sierras Transversas y la Cuenca de Parras que ocupa la mayor parte del área.

Las estructuras del primer bloque presentan ejes orientados al NW, buzando en la misma dirección. El segundo bloque se encuentra constituido por una serie de sierras bajas y lomeríos que integran la Cuenca de Parras, compuesta por numerosos anticlinales y sinclinales de geometría generalmente asimétrica, con recostamiento hacia el noreste cuyos ejes guardan un paralelismo con las estructuras de la Sierra de Parras. Las estructuras fueron producidas por el acortamiento de la corteza terrestre debido a los efectos compresivos de la Orogenia Laramide, que se adaptan al estilo de deformación por propagación de falla.

El evento tectónico ocurre desde finales del Cretácico Superior hasta el Cenozoico Inferior. El arreglo final es una serie de pliegues asimétricos y alargados dispuestos en dirección WNW-ESE.

La región se ubica en el límite de los terrenos tectonoestratigráficos Coahuila y Sierra Madre (Campa y Coney, 1983), aunque solo aflora la cubierta sedimentaria que los cubre. Con la culminación de la Orogenia Apalachiana en el Paleozoico Tardío, se definen una serie de elementos positivos y negativos que dieron lugar al arreglo paleogeográfico que influye en la sedimentación durante el Mesozoico. Uno de ellos son el Mar Mexicano y el Golfo o Cuenca de Sabinas, en el que se depositaron secuencias carbonatadas desde el Jurásico Superior hasta el Cenomaniano-Turoniano, interrumpidas únicamente en el Aptiano Superior para después revertir a un aporte eminentemente terrígeno, que se relaciona con la colisión del Terreno Guerrero con el Terreno Sierra Madre.

Los empujes compresivos provenientes del suroeste de la Orogenia Laramide, dieron lugar al desarrollo de cuencas frontales de avance (foreland) sobre el borde del cinturón plegado, en las cuales ocurre el aporte terrígeno del Maastrichtiano. En el Cenozoico la dinámica es distensiva y los aportes fueron de tipo continental (gravas, arenas y limos), con desarrollo de terrazas de relleno que se ubican en el Pleistoceno. En el Cuaternario, los procesos geológicos se traducen exclusivamente en el aporte continental como resultado de la erosión e intemperismo de las rocas preexistentes (Cartas Geológicas-Mineras San José de Patagalana G14-C31, y General Cepeda G14-C32. SGM, 2005).

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero, por correlación con acuíferos vecinos, así como con la información obtenida a partir de cortes litológicos de algunos pozos y la evidencias de la geología superficial, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y de pie de monte de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas que rodean los valles, y los conglomerados polimícticos que los rellenan.

La porción inferior está alojada en un medio fracturado constituido por la secuencia arcillo-calcárea de la Formación Parras y del Grupo Difunta, que junto con la unidad superior forman un acuífero de baja permeabilidad y de reducida capacidad de almacenamiento, que actualmente se explota para satisfacer las necesidades básicas de la región (figura 3).

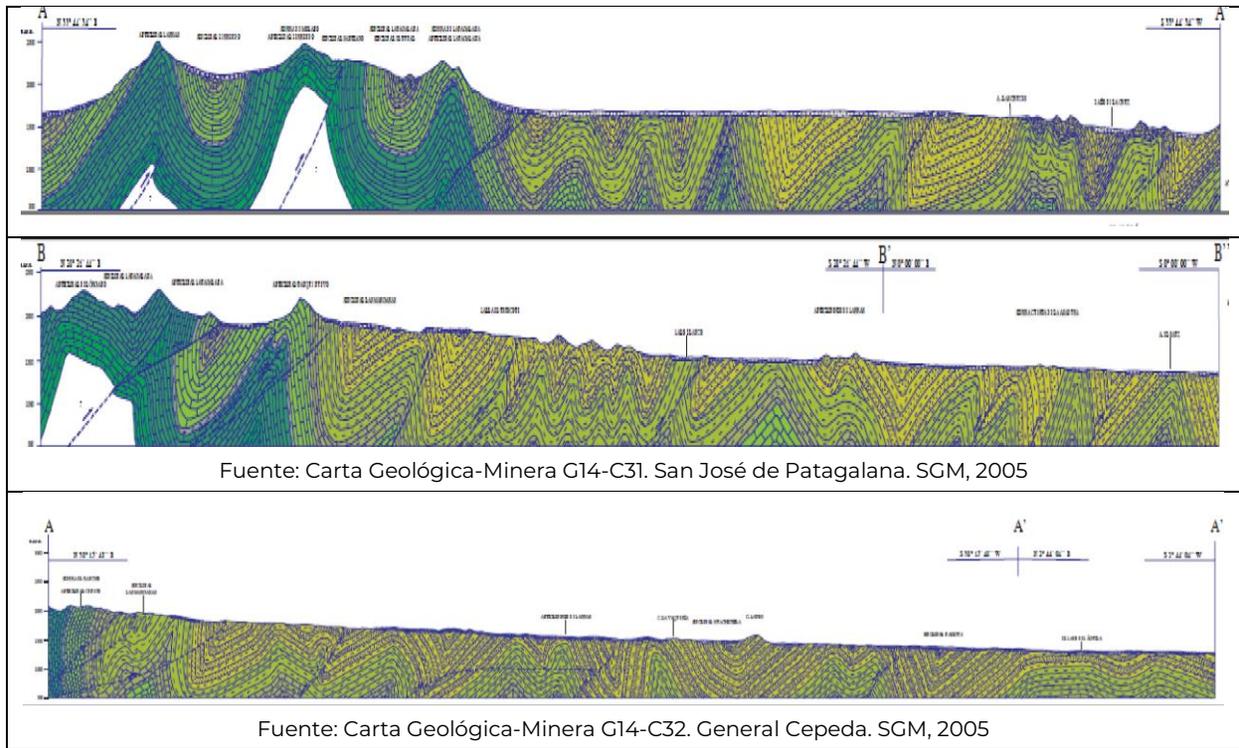


Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

A mayor profundidad las calizas de las formaciones Indidura, Cuesta del Cura y Aurora, entre otras, constituyen sistemas acuíferos profundos que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y condiciones de semiconfinamiento y confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento del acuífero, están constituidas por las mismas rocas arcillosas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento; a nivel regional el basamento hidrogeológico está representado por la secuencia arcillo-calcárea de la Formación La Casita.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un **acuífero libre**, heterogéneo y anisotrópico, constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, coluviales y conglomerados de granulometría diversa, originados a partir del intemperismo y erosión de las rocas que constituyen las sierras que delimitan los valles. La porción inferior está presentada por una secuencia de lutitas y de lutitas y areniscas, que presentan fracturamiento y alteración. El espesor conjunto es de 60 a 80 m.

Las secuencias calcáreas con constituyen las formaciones Indidura, Cuesta del Cura Tamaulipas Superior (o Aurora), conforman acuíferos que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución, con condiciones de semiconfinamiento o confinamiento, debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

Su potencial ya ha sido probado, proporcionando caudales que satisfacen las demandas de los usos público-urbano e industrial.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2010, se ejecutaron 13 pruebas de bombeo de corta duración (5 a 8 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, en los estudios previos llevados a cabo en este acuífero y otros vecinos se realizaron pruebas de bombeo de corta duración también en etapas de abatimiento y recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se determina que los valores de transmisividad varían de **0.09×10^{-3} a $22.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores de conductividad hidráulica varían de **9.0×10^{-7} a $2.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.08 a 19.0 m/d)**. Los valores más altos corresponden a los depósitos granulares de mayor granulometría que constituyen el cauce de ríos, arroyos y de relleno de los valles, y los menores están asociados a sedimentos y rocas y arcillosas.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, existe información piezométrica para diferentes los años 1991, 1999, 2007-2010.

Debido a que para los años 1999 y 2010 se tiene mayor información, se eligió este periodo para el balance de aguas subterráneas.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010, presenta valores que varían de 10 a 150 m en la zona de Parras, incrementándose gradualmente, por efecto de la topografía, de la porción central del valle hacia el sureste, en dirección del poblado San José de Patalagana, hacia los flancos de las sierras Las Pelonas y Patagalana (figura 4).

En la zona General Cepeda, el nivel del agua se encuentra a profundidades que varían de 10 a 50 m, profundizando hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles. Los valores más someros se registran en el límite con el acuífero Paredón (figura 5).

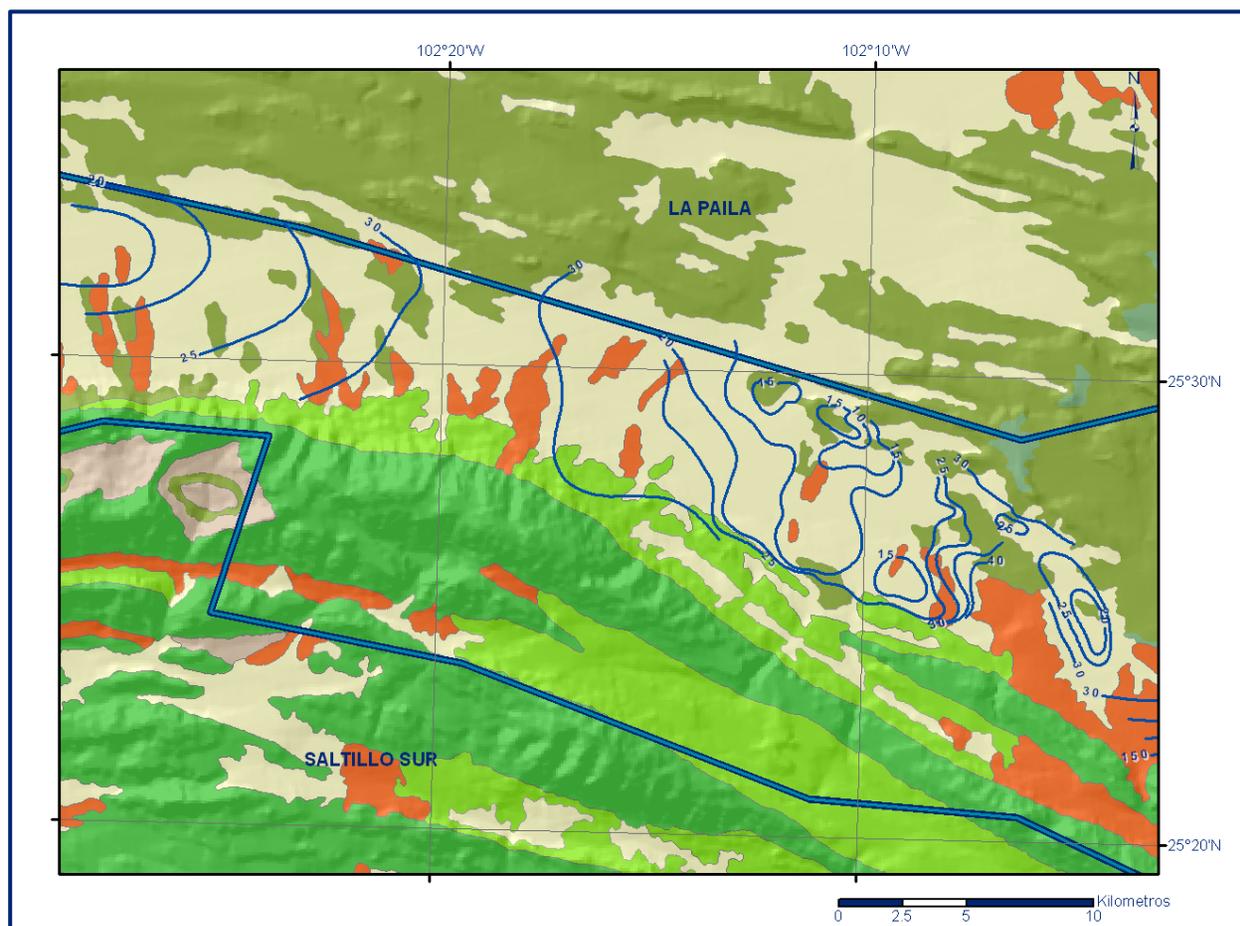


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010). Zona Parras

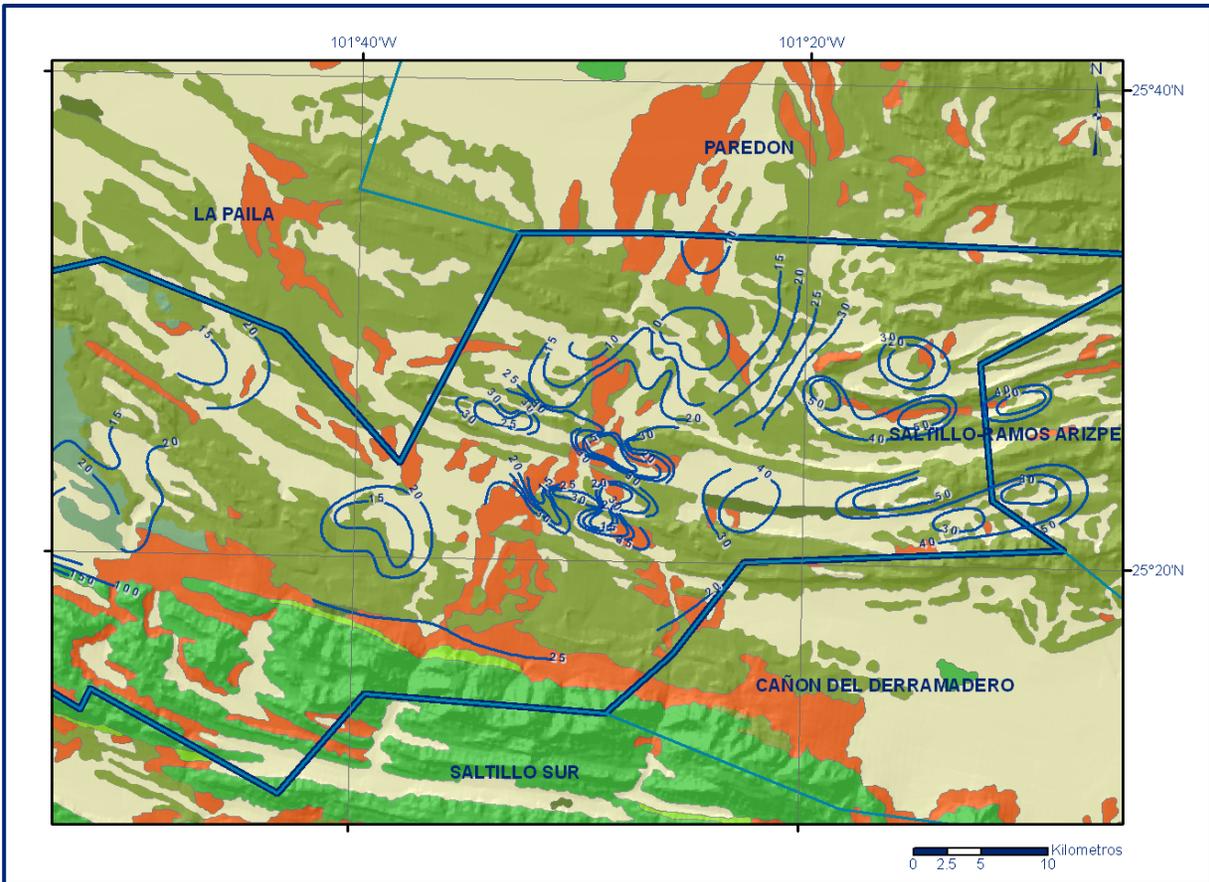


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2010). Zona General Cepeda

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en la zona de Parras se puede observar que los valores de la carga hidráulica varían desde el equipotencial 1,240 msnm hasta el 1,680 msnm, que se incrementan por la topografía, al igual que la profundidad, hacia el sur.

De esta manera, la dirección preferencial del flujo subterráneo es sur-norte, de las sierras hacia la planicie; y en dirección este-oeste en la porción occidental de la zona. Al oeste de Parras se encuentra un parteaguas tanto superficial como subterráneo, que divide el flujo, una parte se dirige hacia el oriente y la otra hacia el poniente (figura 6).

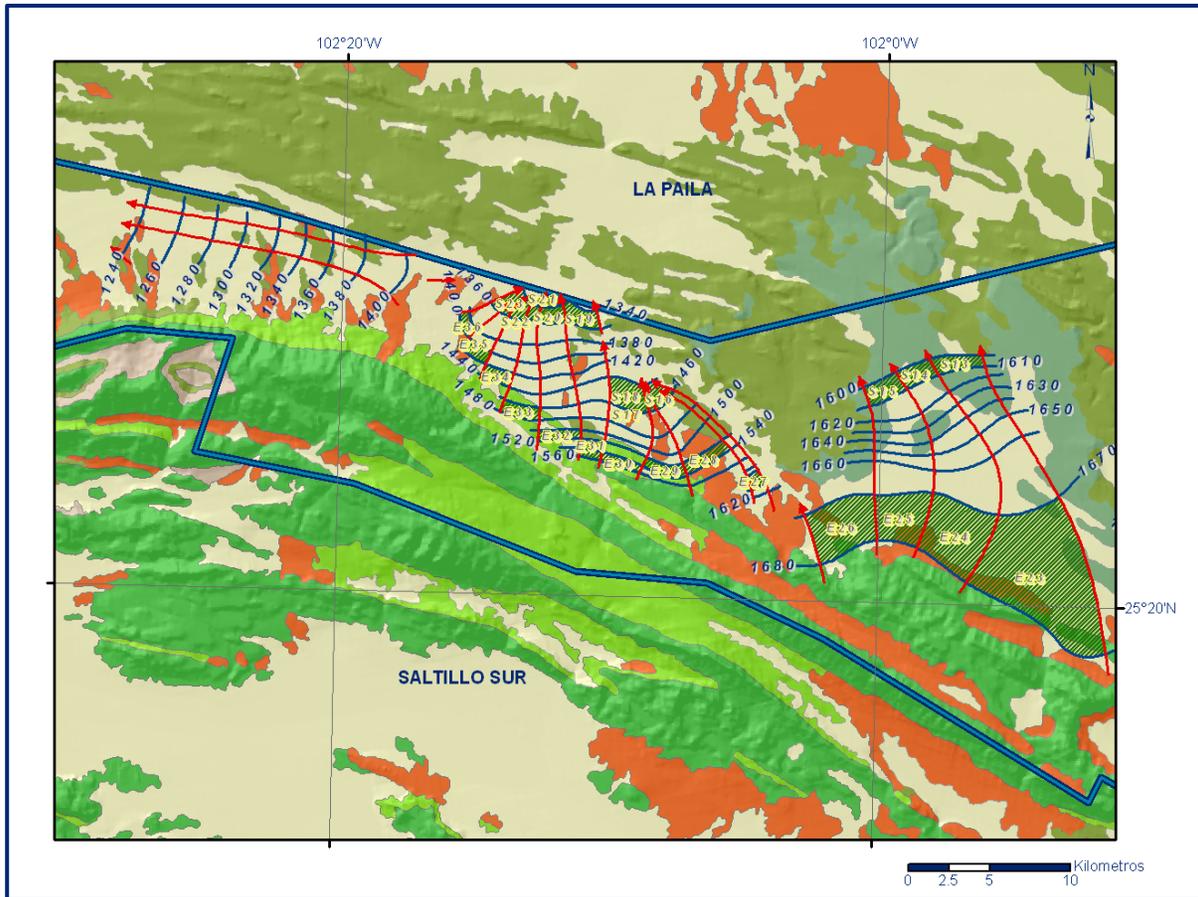


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2010). Zona Parras

En la zona General Cepeda los valores de la carga hidráulica varían de 1200 a 1820 msnm; en el extremo occidental la dirección preferencial del flujo subterráneo es sur-norte, de las sierras hacia los valles.

En el extremo oriental existen valles alargados en dirección este-oeste en los que el flujo subterráneo tiene esta misma dirección preferencial (este-oeste), que después cambia a sur-norte a partir del poblado General Cepeda (figura 7).

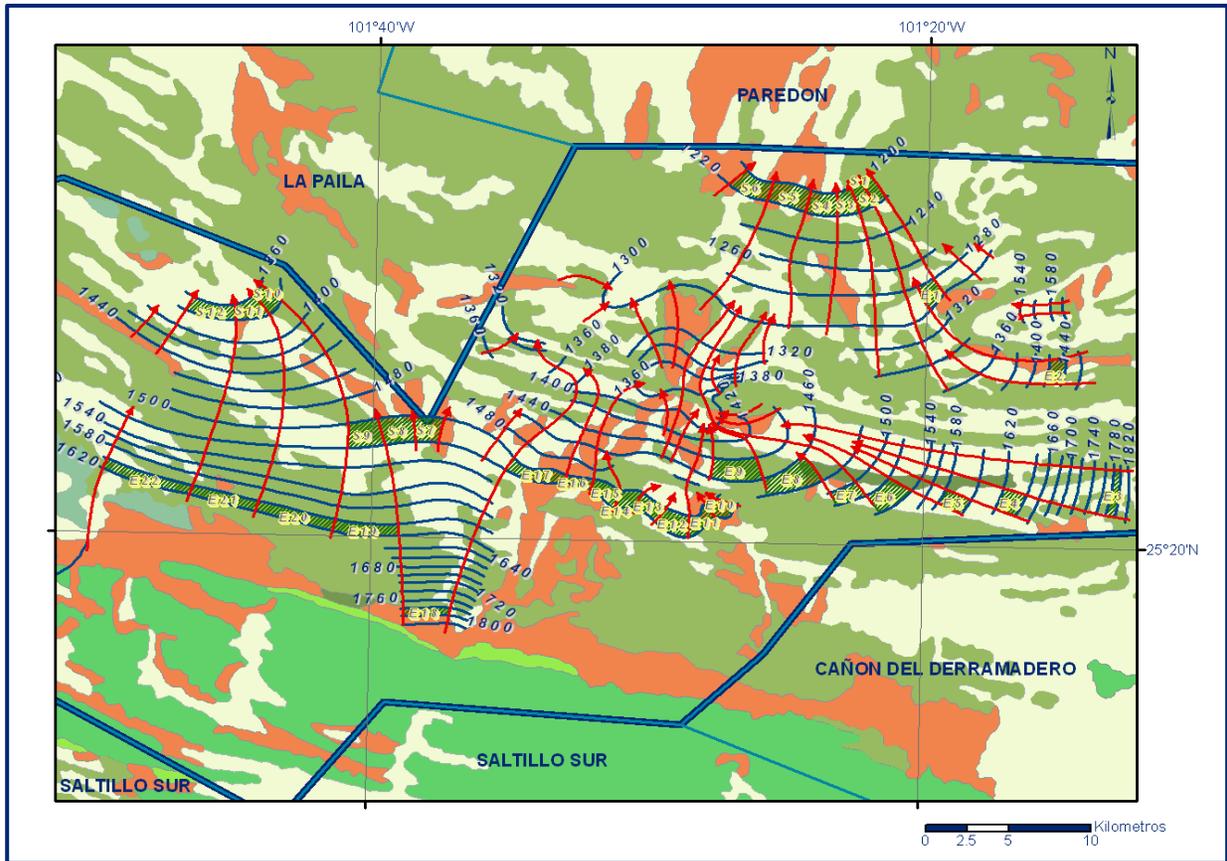


Figura 7. Elevación del nivel estático en msnm (2010). Zona General Cepeda

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático en el periodo 1999-2010, se puede observar que en la zona de Parras se aprecian tanto abatimientos como recuperaciones; en ambos casos de 1 a 4 m, que representan valores promedio anuales de 0.3 m.

Las recuperaciones se registran principalmente en la zona del poblado San José de Patagalana y al norte y noroeste de Parras, en tanto que los abatimientos se presentan en las inmediaciones de Parras (figura 8).

En la zona General Cepeda, predominan las recuperaciones del nivel del agua subterránea, de 1 a 4 m, que representa un promedio anual de 0.3 m. Sólo en área aisladas se registraron abatimientos de 1 a 2 m, que representan un promedio anual de 0.15 m (figura 9).

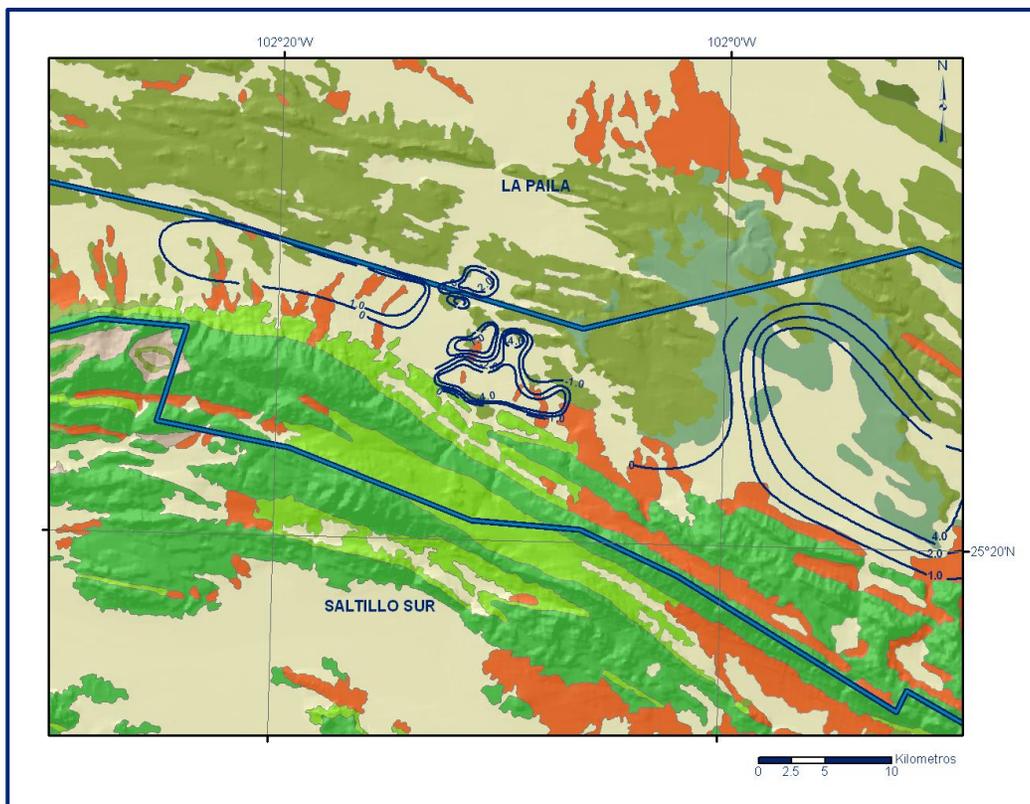


Figura 8. Evolución del nivel estático en metros (1999-2010). Zona Parras

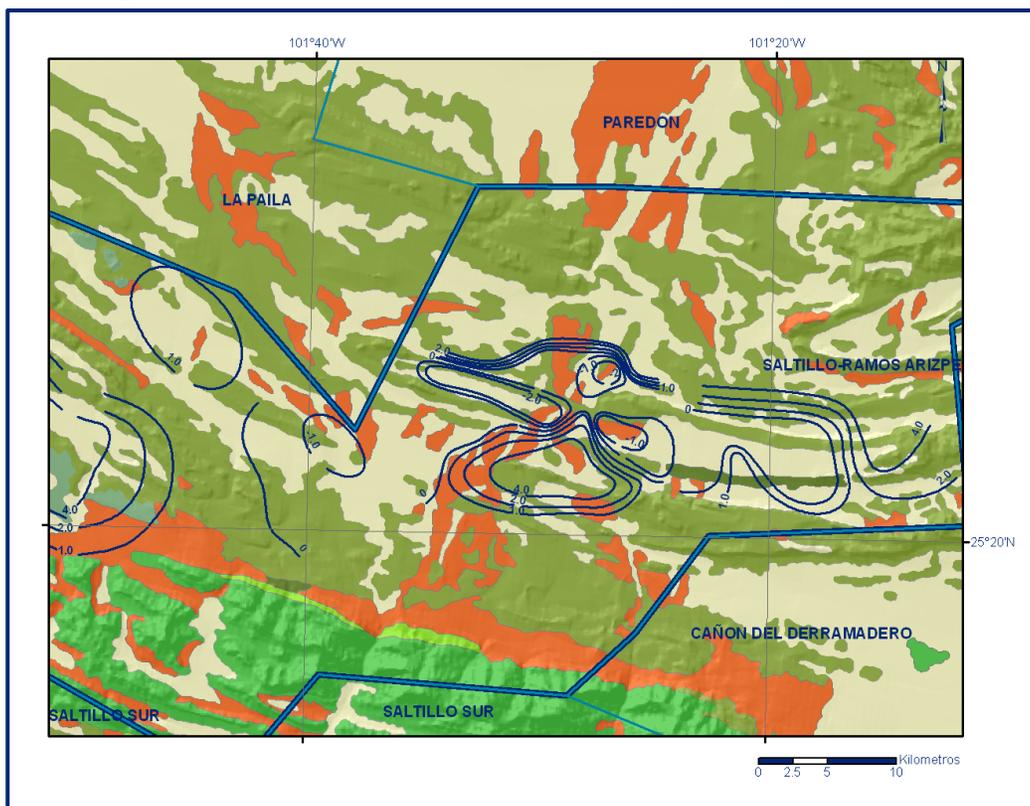


Figura 9. Evolución del nivel estático en metros (1999-2010). Zona General Cepeda.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se obtuvieron 21 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en las dos zonas de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, temperatura, conductividad eléctrica, iones principales, sólidos totales disueltos (STD), alcalinidad, potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), dureza total y dureza al calcio.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, algunos de los aprovechamientos sobrepasan el límite de sólidos totales disueltos que es de 1000 mg/l, establecido por la modificación a la 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. Los valores de concentración de STD varían de 392 a 2448 mg/l. En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 512 a 2705 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran al norte del acuífero; las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en la porción sur. Ambos valores se incrementan gradualmente desde las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero hacia el centro de los valles, en la dirección del escurrimiento superficial.

De los resultados obtenidos para aniones y cationes, con base en los elementos y determinaciones que considera la NOM-127-SSA1-2021, las concentraciones que superan los límites máximos permitidos (LMP) son las del calcio, magnesio, sulfato y STD. La temperatura varía de 21.1 a 29.3 °C y el pH de 6.4 a 8.3.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, predominan las familias cálcica-sulfatada y cálcica-bicarbonatada. La primera se debe a la existencia de yesos y anhidritas (sulfatos de calcio) que se caracterizan por su fácil disolución y su precipitación y acumulación entre los aluviones de las partes topográficamente bajas, típica de las zonas áridas.

En general, hacia el sur del acuífero el agua es cálcica-bicarbonatada, que representa agua de reciente infiltración asociada a las zonas de recarga, mientras que la familia cálcica-sulfatada se presenta en la parte norte, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo de sur a norte.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), de las 21 muestra recolectadas 12 se clasifican como C₂-S₁, que representa agua con salinidad media y bajo contenido de sodio intercambiable, apropiada para casi todos los cultivos en todo tipo de suelo, 8 como C₃-S₁, que representa salinidad alta y bajo contenido de sodio intercambiable, y 1 muestra se clasifica como C₄-S₁ (muy alta salinidad y contenido bajo de sodio intercambiable); estos dos últimos tipos de agua sólo se utilizan en cultivos tolerantes a las sales y en suelos con buen drenaje que requiere lavados.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado en 2010, se registraron un total de 618 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 580 pozos y 21 norias, 13 manantiales, 4 tajos y una galería filtrante; de ellos 467 se consideran activos y 151 inactivos. De las obras activas, 363 (77.7 %) se destinan a uso agrícola, 75 (16.1%) a uso público-urbano, 24 (5.1%) para uso doméstico-pecuario, 4 (0.9%) para uso Industrial y 1 (0.2%) sin uso. El volumen de extracción calculado es de **80.4 hm³ anuales**, de los cuales 67.0 hm³ (83.3%) se destinan a uso agrícola, 10.9 hm³ (13.6%) al uso público-urbano, 0.4 hm³ (0.5%) para uso doméstico-pecuario y 2.1 hm³ (2.6%) para uso industrial.

Adicionalmente, a través de los **13 manantiales** se descarga un caudal conjunto de 504 lps, que representan un volumen anual de **15.9 hm³**, de los cuales 13.2 hm³ se destinan al uso agrícola, 0.6 hm³ para dotación de agua potable y 1.9 hm³ no tienen uso alguno.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2009-2010, en una superficie de **1052 km²**, 265 km² de la Zona Parras y 787 km² de la Zona General Cepeda, que corresponde a las áreas en donde se cuenta con información piezométrica y en las que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos. La diferencia que existe entre la suma de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) está integrada por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en los sedimentos que conforman las planicies y a lo largo de los escurrimientos (R_v) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

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

Para este caso, debido a que la mayor parte de la superficie de los valles afloran rocas y sedimentos arcillosos, se considera para fines del balance de agua subterránea que no existe recarga inducida, y su valor está implícito en el valor de la recarga vertical. Por lo tanto, $R_i = 0$.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dm:** Descarga a través de manantiales
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

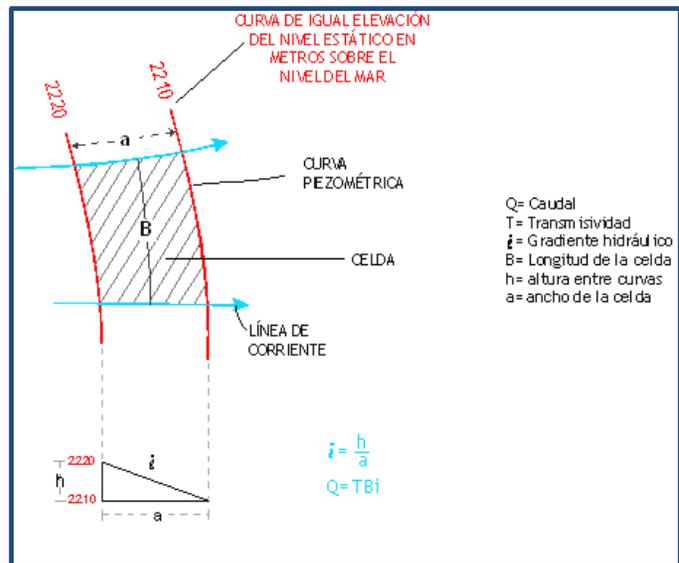
Las entradas al acuífero tienen su origen en las zonas de recarga localizadas en las sierras que rodean al valle. Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en las figuras 6 y 7.

Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

Donde:

- Q** = Caudal (m^3/s)
- B** = Longitud de la celda (m)
- i** = Gradiente Hidráulico (adimensional)
- T** = Transmisividad (m^2/s)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos.

En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **71.7 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal (2010)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1216	1463	20	0.0137	0.00070	0.0116	0.4
E2	1686	977	20	0.0205	0.00070	0.0242	0.8
E3	3055	535	20	0.0374	0.00040	0.0457	1.4
E4	1535	1664	20	0.0120	0.00070	0.0129	0.4
E5	1058	1699	20	0.0118	0.00070	0.0087	0.3
E6	2157	1479	20	0.0135	0.00070	0.0204	0.6
E7	1785	960	20	0.0208	0.00070	0.0260	0.8
E8	3186	1533	20	0.0130	0.00070	0.0291	0.9
E9	2896	1404	20	0.0142	0.00070	0.0289	0.9
E10	955	1344	20	0.0149	0.00070	0.0099	0.3
E11	1774	681	20	0.0294	0.00070	0.0365	1.2
E12	1848	1440	20	0.0139	0.00070	0.0180	0.6
E13	1685	936	20	0.0214	0.00060	0.0216	0.7
E14	1208	1220	20	0.0164	0.00060	0.0119	0.4
E15	1866	1008	20	0.0198	0.00050	0.0185	0.6
E16	1653	572	20	0.0350	0.00040	0.0231	0.7
E17	3665	775	20	0.0258	0.00040	0.0378	1.2
E18	2877	550	20	0.0364	0.00040	0.0418	1.3
E19	3969	773	20	0.0259	0.00040	0.0411	1.3
E20	4881	744	20	0.0269	0.00020	0.0262	0.8
E21	4176	694	20	0.0288	0.00020	0.0241	0.8
E22	5497	757	20	0.0264	0.00020	0.0290	0.9
E23	6473	7000	20	0.0029	0.00230	0.0425	1.3
E24	4026	3880	20	0.0052	0.00800	0.1660	5.2
E25	3103	3047	20	0.0066	0.00800	0.1629	5.1
E26	4135	3173	20	0.0063	0.00200	0.0521	1.6
E27	852	966	20	0.0207	0.00180	0.0318	1.0
E28	3024	773	20	0.0259	0.00180	0.1408	4.4
E29	2609	688	20	0.0291	0.00230	0.1744	5.5
E30	2611	583	20	0.0343	0.00270	0.2418	7.6
E31	1396	555	20	0.0360	0.00270	0.1358	4.3
E32	2641	548	20	0.0365	0.00220	0.2121	6.7
E33	2382	838	20	0.0239	0.00220	0.1251	3.9
E34	1877	824	20	0.0243	0.00200	0.0911	2.9
E35	1785	883	20	0.0227	0.00180	0.0728	2.3
E36	1435	639	20	0.0313	0.00180	0.0808	2.5
TOTAL							71.6

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio llevado a cabo en 2010 y en estudios previos, en este acuífero y en otros vecinos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), a través de manantiales (Dm) y salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh); no se presentan descargas por evapotranspiración (ETR) ni flujo base de ríos (Dfb).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **80.4 hm³/año**, de los cuales 49.4 hm³ se extraen en la Zona Parras y 31.0 hm³ en la Zona General Cepeda.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas por flujo subterráneo se calcularon de la misma manera que las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático 2010 (figuras 6 y 7).

El cálculo se muestra en la tabla 3. El volumen total estimado de salidas por flujo subterráneo asciende a **14.6 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2010)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	779	1776	20	0.0113	0.00050	0.0044	0.1
S2	960	1671	20	0.0120	0.00050	0.0057	0.2
S3	1123	1611	20	0.0124	0.00050	0.0070	0.2
S4	1791	1556	20	0.0129	0.00050	0.0115	0.4
S5	2379	1448	20	0.0138	0.00050	0.0164	0.5
S6	2296	1237	20	0.0162	0.00050	0.0186	0.6
S7	1617	1617	20	0.0124	0.00050	0.0100	0.3
S8	2026	1703	20	0.0117	0.00050	0.0119	0.4
S9	1961	1663	20	0.0120	0.00050	0.0118	0.4
S10	931	1648	20	0.0121	0.00050	0.0056	0.2
S11	1685	1200	20	0.0167	0.00050	0.0140	0.4
S12	2926	900	20	0.0222	0.00050	0.0325	1.0
S13	3043	959	20	0.0209	0.00100	0.0635	2.0
S14	2217	1242	20	0.0161	0.00100	0.0357	1.1
S15	2348	1352	20	0.0148	0.00100	0.0347	1.1
S16	1170	1710	20	0.0117	0.00200	0.0274	0.9
S17	317	1750	20	0.0114	0.00200	0.0072	0.2
S18	2280	1848	20	0.0108	0.00140	0.0345	1.1
S19	2110	1036	20	0.0193	0.00100	0.0407	1.3
S20	1628	1043	20	0.0192	0.00100	0.0312	1.0
S21	743	977	20	0.0205	0.00100	0.0152	0.5
S22	981	1342	20	0.0149	0.00100	0.0146	0.5
S23	940	2026	20	0.0099	0.00100	0.0093	0.3
TOTAL							14.7

7.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificó la presencia de 13 manantiales, que se ubican en la porción central del acuífero, que en conjunto descargan un caudal de 504 lps, que representan un volumen de **15.9 hm³ anuales**, de los cuales 13.7 hm³ corresponden a la Zona Parras y 2.2 hm³ a la Zona General Cepeda.

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

La evolución piezométrica registrada durante periodo 1999-2010, muestra valores de abatimiento puntuales y zonas mayores con recuperaciones 1 a 4 m, En general, predominan las recuperaciones en las dos zonas, con un valor promedio de 0.1 y 0.13 m anuales respectivamente para las zonas Parras y General Cepeda. Considerando su superficie de 265 y 787 km² y un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.02, obteniéndose un cambio de almacenamiento total de **$\Delta V(S) = 2.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$** .

Solución de la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + D_m \pm \Delta V(S) - E_h \\ R_v &= 80.4 + 14.6 + 15.9 + 2.5 - 71.7 \\ R_v &= 41.7 \end{aligned}$$

Y la recarga total (R) es igual a:

$$\begin{aligned} R &= E_h + R_v \\ R &= 71.7 + 41.7 \\ R &= 113.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **113.4 hm³ anuales**.

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 del acuífero, su valor corresponden a la descarga a través de manantiales y a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia los acuíferos Paredón y La Paila. Por lo que, **DNC= 30.5 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 (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 **146,895,188 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 113.4 - 30.5 - 146.895188 \\ \text{DMA} &= -63.995188 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **63,995,188 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Actualización del estudio geohidrológico del acuífero General Cepeda-Sauceda. Realizado en 2010 por el Instituto del Agua del Estado de Nuevo León.