CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO LAS DELICIAS (0525), 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 5
3.1 Provincia Fisiográfica 5
3.2 Clima 6
3.3 Hidrografía 6
3.4 Geomorfología 6
4. GEOLOGÍA 6
4.1 Estratigrafía 7
4.2 Geología estructural 9
4.3 Geología del subsuelo 11
5. HIDROGEOLOGÍA 12
5.1 Tipo de acuífero 12
5.2 Parámetros hidráulicos 12
5.3 Piezometría 13
5.4 Comportamiento hidráulico 13
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 13
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 14
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 14
7.1 Entradas 15
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 15
7.2 Salidas 21
7.2.1 Bombeo (B) 22
7.2.2 Descarga por manantiales (Dm) 22
8. DISPONIBILIDAD 22
8.1 Recarga total media anual (R) 22
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 23
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 23
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA) 23
9. BIBLIOGRAFÍA 25

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-2000 "Norma Oficial Mexicana que establece 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 concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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 Ocosingo, definido con la clave 0525 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroeste del estado de Coahuila, entre las coordenadas geográficas 26° 12' y 26° 51' de latitud norte, y 102° 57' y 103° 22' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 2,104 km^2. Limita al este con el acuífero El Hundido; al sureste con el acuífero La Paila; al sur con el acuífero Principal-Región Lagunera; al oeste con el acuífero Acatita; y al norte con el acuífero Laguna El Coyote, todos ellos pertenecientes al estado de Coahuila (figura 1). Geopolíticamente el acuífero queda comprendido en los municipios: Francisco I. Madero y San Pedro.

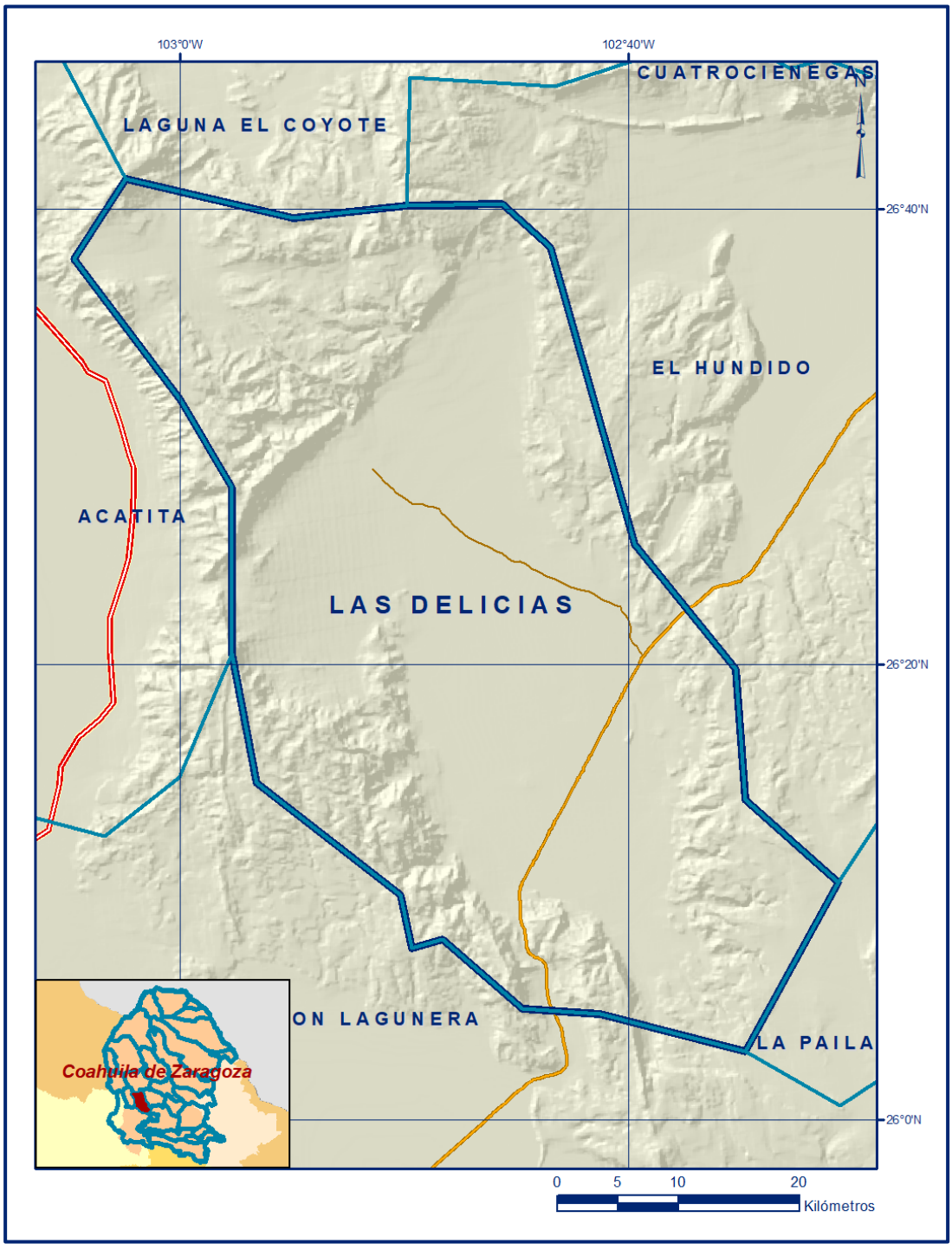


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0525 LAS DELICIAS						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	16	22.6	26	14	59.9
2	103	14	58.8	26	17	56.8
3	103	14	14.7	26	20	53.4
4	103	17	56.2	26	26	56.5
5	103	18	39.4	26	32	33.7
6	103	22	33.2	26	40	40.2
7	103	19	55.2	26	47	39.4
8	103	16	4.6	26	48	17.1
9	103	11	57.8	26	51	26.1
10	103	6	29.2	26	48	55.8
11	103	2	24.2	26	41	18.8
12	103	4	43.4	26	37	48.1
13	102	59	58.7	26	31	38.5
14	102	57	41.6	26	27	46.4
15	102	57	41.1	26	20	27.9
16	103	0	1.1	26	15	14
17	103	3	20.3	26	12	27.2
18	103	10	30.7	26	14	20.9
1	103	16	22.6	26	14	59.9

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Las Delicias pertenece al Organismo VII "Cuencas Centrales del Norte" y es jurisdicción territorial de la Dirección Local de Coahuila. Su territorio se encuentra parcialmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda.

El primer decreto que rige en las porciones norte, este y sur del acuífero es el *"Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Región Lagunera",* publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF), el 17 de abril de 1965. Esta veda es tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

El segundo decreto está vigente en la parte central del acuífero y es el *"Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en las zonas de Ceballos y de La Laguna, que comprenden parte de los Estados de Chihuahua, Durango y Coahuila",* publicado en el DOF, el 12 de junio de 1958. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal es el agrícola. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el territorio que comprende el acuífero sólo se ha realizado un estudio hidrogeológico de evaluación que abarca su superficie completa, además de otros estudios en acuíferos vecinos, denominado:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS SANTA FE DEL PINO, HÉRCULES, LAGUNA EL GUAJE, LAGUNA EL COYOTE, ACATITA, LAS DELICIAS, SERRANÍA DEL BURRO Y VALLE DE SAN MARCOS, EN EL ESTADO DE COAHUILA; elaborado mediante convenio con el Instituto del Agua del Estado de Nuevo León, para la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en 2010. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, conocer su funcionamiento hidrodinámico y recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Como parte de sus actividades de campo incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos. Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI, el acuífero Las Delicias se encuentra ubicado en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental y la subprovincia contenida en el área del acuífero es: Sierra de la Paila (INEGI, 2011).

Morfológicamente la provincia fisiográfica constituye una cadena montañosa que abarca todo el oeste mexicano y el extremo suroccidental de los Estados Unidos. Desde el punto de vista geológico, no es una sierra, sino una meseta, surcada por numerosos cañones que le dan la apariencia de sierra.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, los climas predominantes para el acuífero son de subtipos secos y muy cálidos. Con régimen de lluvia en mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de isoyetas e isotermas del Atlas del INEGI. De acuerdo con estos datos, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **280 mm y 19.0 °C**, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial su valor medio anual es de **2,500 mm anuales.**

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado casi en su totalidad en la Región Hidrológica 35 "Mapimí", que cubre una pequeña parte de la entidad; en ella se encuentran las cuencas: Valle El Hundido (que representa un 98%) y una mínima parte por la cuenca Laguna del Rey. Ubicada hacia el centro del municipio de San Pedro, se encontraba un antiguo lago llamado Laguna de Mayrán (actualmente desecado), región situada a 1,100 msnm. Y hacia esta laguna drenaban todos los arroyos de las sierras circundantes, cuyas crecidas son tan raras como repentinas. Por el sur del municipio (no ubicado en el perímetro del acuífero) entra el río Nazas proveniente del municipio Francisco I. Madero; la laguna de Mayrán está ubicada al sureste del municipio.

3.4 Geomorfología

En la región de interés, la mayor parte del suelo es plano; destaca en la región el valle del Sobaco; al norte existen varias serranías siendo las principales, la Colorada, del Venado y de los Alamitos. Hay una prolongación de la sierra del Rey, proveniente del municipio de Sierra Mojada, que atraviesa el municipio Francisco I. Madero de norte a centro. Al sur de la zona de interés se encuentra la terminación meridional de la plataforma de Coahuila. En ésta, los valles con rellenos cuaternarios (valles de Acatita y Las Delicias), individualizan sierras calizas, áridas y bajas (1,200 a 1,500 metros de altura), cuya disposición es muy desordenada (Sierras de Tlahualilo, de Santa Ana, de Garcia, de la Punta, de Paila).

4. GEOLOGÍA

La geología general emplazada en la región que comprende el acuífero, está integrada por un gran paquete de material aluvial del cenozoico, que está rodeado por grandes extensiones de rocas calizas de origen marino del Mesozoico, que a su vez están acompañadas de yesos, y que dan forma a la cuenca que rodea al acuífero.

También podemos encontrar zonas de intercalaciones de lutita-arenisca, así como algunos conglomerados sedimentarios del cenozoico (figura 3).

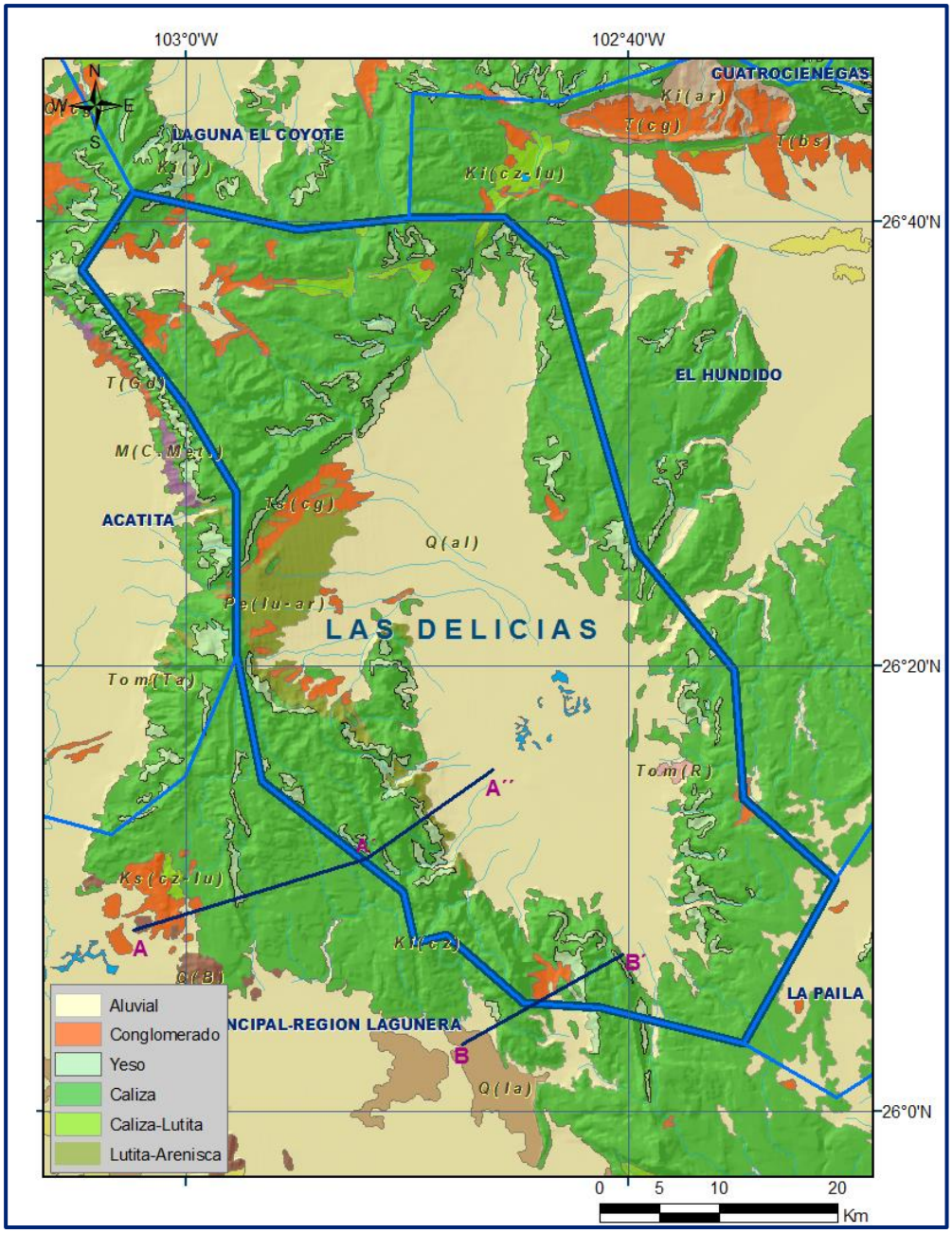


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La secuencia de rocas expuestas en la región se menciona a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente:

Granitoides del PALEOZOICO PÉRMICO

Las rocas más antiguas corresponden a un basamento conocido como Coyote Plutón (PpsGt) constituido por granitoides (granodiorita-granito), cuya edad fue determinada en 250 a 266 Ma (Barbosa, L. D. et al., 1998). Los afloramientos se localizan topográficamente en las partes bajas del flanco oriental de la sierra Las Delicias, desde el cañón del Diablo hasta el cañón Rosillo.

Rocas Sedimentarias del MESOZOICO

CRETÁCICO TEMPRANO (APTIANO)

Discordantemente al intrusivo se depositó un gran paquete de rocas sedimentarias que inician a partir del Aptiano con la Formación Las Uvas (KapAr-Lu) definida por Humphrey (1956). Consiste en su base: de areniscas, limolitas, areniscas conglomeráticas y conglomerados en tonalidades rojizas y concluye en la cima con lutitas verdosas y calizas arcillosas. Se encuentra expuesta en afloramientos restringidos en el flanco este y norte del cerro El Muerto, situado hacia el oeste de la comunidad de Nueva Delicias.

Paquetes sedimentarios del ALBIANO INFERIOR A MEDIO

El depósito de la columna sedimentaria continúa con la Formación Acatita (KaCz-Y) (Humphrey, 1956), la cual se encuentra ampliamente distribuida en las partes medias y bajas de las sierras La Candelaria y Las Delicias. Su litología consiste de estratos de caliza, caliza dolomítica, dolomía y yeso.

Con cantidades subordinadas de pedernal en forma de nódulos y lentes. Sobreyace concordantemente a la Formación Las Uvas y subyace concordante y gradualmente a la Formación Treviño. Su relación con el basamento se presenta como una discordancia.

Calizas del ALBIANO SUPERIOR-CENOMANIANO

Hacia la cima de la columna se continúa con el depósito de la Formación Treviño (Kace Cz), que consiste en caliza con miliólidos y rudistas de color gris claro, alternando con algunas capas dolomitizadas. Sus afloramientos son reconocidos claramente por su estratificación gruesa y por los cantiles que se forman en las partes altas de las sierras Las Delicias y La Candelaria.

Lutitas calcáreas y calizas arcillosas del CENOMANIANO-SENONIANO-SANTONIANO

La porción final de la cubierta sedimentaria está representada por la Formación Indidura (KcessLu-Cz), definida por Kelly (1936). La litología consiste de lutita calcárea y caliza arcillosa, en capas delgadas, con numerosas capas intercaladas, de caliza de color gris oscuro a café claro en estratos más gruesos. En los afloramientos se han encontrado restos fósiles de pelecípodos del tipo Inoceramus labiatus, que han sido datados como del Cenomaniano-Senoniano-Santoniano.

Rocas sedimentarias del CRETÁCICO
(DEPÓSITOS CUBIERTOS POR PAQUETES TERCIARIOS)

Estas rocas están cubiertas discordantemente por rocas terciarias. Primeramente, con depósitos del tipo molassa continental que se acumularon después del plegamiento de la Sierra Madre Oriental, formando conglomerados polimícticos (Te(?)Cgp) compuestos por fragmentos de calizas, dolomías y areniscas. Estos depósitos se ubican principalmente en la porción centro poniente de la Sierra de Las Delicias, ahí se pueden apreciar los mayores afloramientos formando pequeños lomeríos en forma aislada. Posteriormente se presentan eventos volcánicos que están representados por brechas volcánicas de poco espesor, seguidas de fuertes derrames y coladas de composición basáltica (Tmpl(?)B). Los afloramientos se ubican en la porción sur-suroeste de la carta en donde estos eventos tienen su mejor exposición (Cerro Toribio). Como tercer evento terciario se desarrollan depósitos intermontanos, formando conglomerados polimícticos (Tmpl(?)Cgp) producto de abanicos aluviales de corrientes intermitentes en épocas de grandes lluvias torrenciales provocando la destrucción de las rocas preexistentes.

HOLOCENO

Como evento más reciente, en el Holoceno, existen depósitos de aluvión en los arroyos (Qhoal), depósitos lacustres (Qhola) y yesos (QhoY) en las lagunas de Mayrán y El Sobaco.

4.2 Geología estructural

La deformación Laramide se manifiesta en el área por el plegamiento y fallamiento evidente en las rocas sedimentarias mesozoicas, destacando los frentes de plegamiento y el posible deslizamiento de la cubierta calcárea sobre los depósitos de yesos y dolomías. La deformación dúctil es observada en el intrusivo granodiorítico-granítico del basamento, manifestada por la presencia de zonas con desarrollo de superficies de foliación y alineamiento de minerales debidos a la orogenia Laramide.

Las estructuras producidas por compresión se representan en la carta como pliegues anticlinales y sinclinales de cortas dimensiones, los rasgos más notorios que se han cartografiado son tres sinclinales recumbentes denominados Los Aguilar, Ventanillas y Los Padres. Son pliegues cuyo eje presenta, en general, un rumbo NW 30° SE, mientras que su plano axial con una inclinación de 60° hacia el NE.

La deformación frágil en el área está representada por fallas normales que han dado origen a las fosas tectónicas El Sobaco y Mayrán. Estas fosas están delimitadas, al poniente por la falla Las Delicias y al oriente por la falla El Sobaco (fuera de la carta).

En la Sierra Las Delicias las fallas normales son poco expuestas y se encuentran representadas por lineamientos de los arroyos. Se han reconocido dos patrones estructurales principales: el primero con una orientación NW30°SE con variaciones al N-S, con lineamientos de magnitud considerable. El segundo de estos patrones es el representado por lineamientos con rumbo NE-SW con variaciones casi E-W, viéndose claramente en conjunto como un enrejado irregular.

El basamento expuesto en esta región podría corresponder al magmatismo orogénico en el Paleozoico medio que está representado por intrusivos en diferentes regiones de México, específicamente en la localidad de Acatita-Las Delicias-El Jabalí en el estado de Coahuila, (López I. M., 1986), considerado dentro del Cinturón Marathon-Ouachita- Apalaches.

Durante el Cretácico continúa la sedimentación formando cuencas y plataformas en la mayor parte de México, siendo principalmente calcáreo-arrecifal de laguna interna de aguas someras tranquilas con estabilidad tectónica. En ellas se depositaron grandes cantidades de sedimentos calcáreos y calcáreo-arcillosos. En el Albiano-Cenomaniano en su totalidad los elementos paleogeográficos desarrollados en el Jurásico son cubiertos por mares. Se da lugar a la sedimentación de evaporitas y cinturones arrecifales asociada a la plataforma del oriente de México (González R., 1975; Carrillo B., 1971; Viniegra F., 1981, citados en Morán Z. D., 1986). A partir del Cenomaniano-Turoniano se inicia una gran influencia detrítica en la sedimentación resultado del levantamiento del noreste de México y la retirada gradual de los mares del oriente depositándose secuencias terrígenas de tipo flysch con migración al oriente a medida que ocurría el levantamiento, los desarrollos arrecifales no se encuentran tan marcados.

La fase Laramide originó las deformaciones compresivas con aumento en la velocidad de convergencia en el intervalo 80-40 Ma, que es cuando ocurre la última fase de deformación compresiva. La sedimentación de unidades molássicas que acompañaron al levantamiento continental, se acrecentó durante la orogenia Laramide, siendo más antiguas en la parte occidental y más jóvenes hacia el Golfo de México.

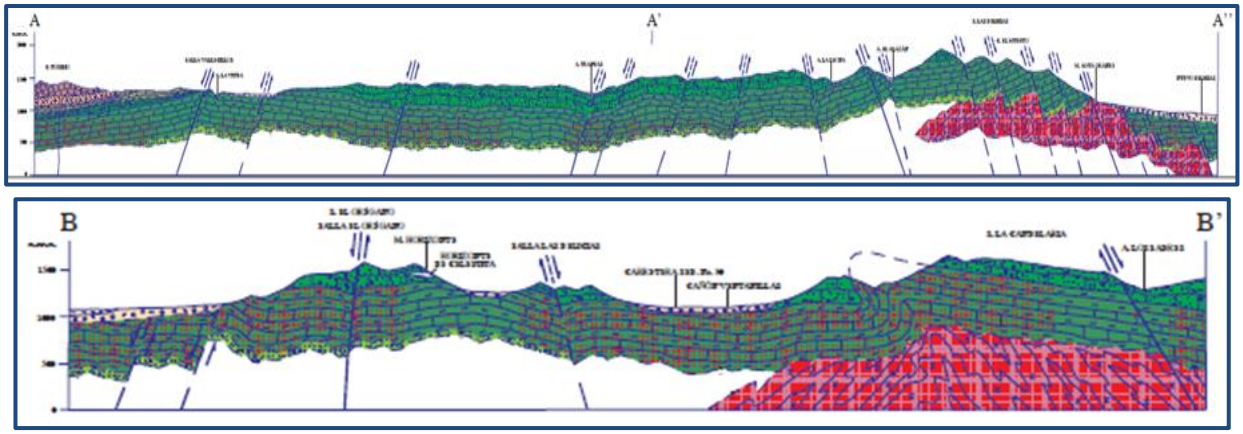
Durante el Oligoceno-Mioceno la actividad magmática es intensa con un vulcanismo violento en el occidente y hacia el oriente en algunos sectores. En el Mioceno-Plioceno como consecuencia y respuesta al comportamiento estructural de las rocas del basamento y continuidad de los procesos de relajación tectónica ocurridos durante el Oligoceno, se relacionan eventos de emisión basáltica y andesitas-basálticas, generalmente emplazados en los frentes de distensión y en ocasiones asociadas a fallas antiguas reactivadas.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica e hidrogeológica recabada en el acuífero, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variable y conglomerados, de permeabilidad media a baja, que constituyen las extensas planicies y los piedemonte. Hacia la parte baja del acuífero predominan sedimentos lacustres y eólicos intercalados con evaporitas. La porción inferior está conformada por calizas, areniscas y lutitas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.
Las calizas de las formaciones Buda, Aurora y Cupido, constituyen horizontes acuíferos profundos que no han sido explorados en la zona. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias, al desaparecer el fracturamiento. A mayor profundidad las barreras al flujo subterráneo y el basamento están representadas por las lutitas y las rocas graníticas. Dichos materiales han permitido la acumulación de agua en el subsuelo, formando un acuífero que se recarga por la infiltración del agua de lluvia y que se almacena en el subsuelo. Salvo los escasos pozos y norias, no se conoce otro tipo de salida o descarga de agua del acuífero.

En general se caracteriza por presentar alto contenido salino, lo que restringe su utilización. Las rocas que constituyen las elevaciones topográficas corresponden principalmente a calizas, de las cuales se desconoce su potencial acuífero, sin embargo, dichas calizas generalmente contienen yesos, lo que provoca que el agua

que tiene contacto con dichas rocas presente alta salinidad. En la figura 3 se muestran secciones geológicas esquemáticas que muestran la disposición de las unidades litológicas en el subsuelo



Fuente: Carta Geológica-Minera G13-B87 "Sierra Las Delicias", Coahuila. Esc. 1:50,000 (SGM, 2003)
Figura 3. Secciones Geológicas Esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y espesor moderadamente reducido.

El subsuelo del valle se encuentra constituido por arcillas, gravas y arenas de permeabilidad variable que permiten la formación de un acuífero con nivel de saturación a entre 60 y 70 metros de profundidad.

Este es el acuífero que actualmente se explota en la zona de este valle, y que es poco explotado principalmente mediante pozos que sólo satisfacen las necesidades del uso agrícola. El acuífero se recarga a partir de la infiltración del agua de lluvia, tanto sobre los materiales ubicados al pie de las sierras como en el valle. El agua subterránea presenta alto contenido de sales.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en el año 2010, sólo se realizaron 3 pruebas de bombeo de corta duración tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Para su análisis e interpretación se utilizaron los métodos analíticos de Theis, Hantush

y Theis & Jacob. Los dos primeros para los datos tomados en abatimiento y el tercero para los de recuperación. Los resultados de su interpretación arrojan valores que oscilan entre **0.5 y 28.5 x10^{-3}m^2/s**, que corresponden a condiciones locales del medio.

Ninguna de las pruebas contó con pozo de observación por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada durante el estudio realizado en el año 2010. Sólo fue posible obtener los valores de profundidad al nivel estático en un número escaso de aprovechamientos dispersos en el acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

No se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático. Las escasas mediciones piezométricas recabadas durante los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Debido al escaso número de aprovechamientos existentes en el área que cubre el acuífero y al incipiente volumen de extracción, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2010, se tomaron 11 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, As, coliformes fecales y totales, etc., para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos sobrepasan los límites máximos permisibles que establece 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. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) en las muestras de pozos presenta valores extremos que varían de 1,365 a 5,229 ppm, que sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la Norma Oficial Mexicana. Solo en los 3 manantiales muestreados y analizados, el agua tiene bajo contenido de STD (entre 201 y 816 ppm). En los aprovechamientos de la parte sur del valle se encuentran concentraciones de arsénico en el agua subterránea, ligeramente altas (entre 0.032 y 0.117 mg/l), con excepción de los manantiales; mientras que el límite máximo permitido (LMP) para el uso y consumo humano del agua es de 0.025 mg/l (de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana referida)).

El agua de la zona corresponde a la familia cálcico-sulfatada en todas las muestras con una sola excepción (el manantial D-22), donde el agua es cálcica-bicarbonatada. El agua cálcico-sulfatada es un reflejo de la influencia de los yesos y anhidritas que son de fácil disolución y se encuentran tanto entre las rocas calizas de la Formación Acatita, como entre los sedimentos aluviales del valle. De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las 3 muestras de los manantiales se clasifican como C_2-S_1 y C_3-S_1, que representa contenido medio y alto de sales (C_2 y C_3), respectivamente, y baja proporción de sodio intercambiable (S_1), que pueden utilizarse para riego agrícola bajo ciertas restricciones. Las aguas de los pozos se clasifican como C_4-S_1, C_4-S_2 y C_4-S_3 las cuales no son recomendables para su uso en agricultura, debido a su alta concentración de sales.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró un total de 25 aprovechamientos, de los cuales 3 corresponden a manantiales, y 22 son pozos. El volumen de extracción conjunto estimado (considerando los tiempos de operación para cada aprovechamiento), asciende a **14.1 hm³ anuales,** de los cuales 13.4 hm³ (95%) se utilizan en la agricultura y 0.7 hm³ (5%) se destinan al uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La poca información piezométrica actual e histórica en la superficie que cubre el acuífero, y debido a que se encuentra dispersa en espacio y tiempo; hace imposible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas tradicional. Aunado a esto, se

presentaron diferentes problemas para la medición de sus niveles. Por todas estas razones, se optó por plantear un balance hidrometeorológico en la superficie del acuífero (2,104 km^2), para estimar de manera conservadora el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

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

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

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento del acuífero:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

Las entradas al acuífero Las Delicias están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \qquad (1)$$

V_{LL}= Volumen de lluvia;
V_{ETR}= Volumen evapotranspirado;
V_{ESC}= Volumen escurrido;
V_{INF}= Volumen infiltrado;

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \qquad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero (**V_{LL}**), se obtiene al multiplicar su área (2,104 km^2) por la lámina de precipitación media anual (280 mm):

V_{LL} = 2,104 km^2 (0.280 m) = 589.1 hm^3 anuales

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando los valores promedio anual de precipitación de 280 mm y temperatura de 19° C. Coutagne propuso la ecuación siguiente para calcular la evapotranspiración real:

COUTAGNE $ETR = P - \chi P^2$

Donde:
ETR= Evapotranspiración m/año
P = precipitación en m/año
$\chi = 1/(0.8 + 0.14\ t)$
t = temperatura en ºC

La fórmula solo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre 1/8X y 1/2X, estando ETR y P en metros, y T en °C. Si P es menor que 1/8λ la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación es mayor que 1/2λ la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por: ETR = 0.20 + 0.035 T.

Aplicando la fórmula de Coutagne se obtiene una lámina de evapotranspiración real de 257.3 mm anuales. Considerando la estimación conservadora de la infiltración que se obtiene al tomar en cuenta la lámina de evapotranspiración obtenida con la fórmula de Coutagne, que es de 257.34 mm anuales, que representa el 91.9% de evapotranspiración respecto a la lluvia; por lo que el volumen de la ETR (**V_{ETR}**) es:

V_{ETR} = 2,104 km^2 (0.2573 m) = 541.4 hm^3 anuales

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia (**V_{ESC}**) se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, con fecha del 17 de abril de 2002, en la que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento. El volumen anual medio

de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA = **PRECIPITACIÓN ANUAL DE LA CUENCA** * **ÁREA DE LA CUENCA** * **COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO**

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo. En el caso de que en la cuenca en estudio, existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado. Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si K resulta menor o igual que 0.15,	Ce = K (P-250) / 2000;
Si K es mayor que 0.15,	Ce = K (P-250) / 2000 + (K –0.15) / 1.5;

Donde:
P = Precipitación anual;
Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;
K = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

Tabla 2. Valores de k en función del tipo y uso del suelo (NOM-011-CONAGUA-2000)

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO A	TIPO DE SUELO B	TIPO DE SUELO C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3

TIPO DE SUELO	CARACTERISTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

De acuerdo con la cartografía de CONABIO escala 1:1, 000,000 para el tipo de suelo, predominan los tipos: Litosol, Regosol Calcárico, Solonchak Órtico, Xerosol Cálcico, Xerosol Háplico, Yermosol Háplico (figura 4).

En cuanto al uso de suelo (figura 5), de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1, 000,000: el 89.70 % de la superficie del acuífero está cubierta por matorral (suelo tipo A), cubierta con menos del 50%, por lo que K=0.24; respecto de la vegetación gipsófila, ésta ocupa un 7.024 % (suelo tipo A), que corresponde a un área con poca vegetación y con presencia de yesos en el material aluvial, por lo que K=0.26; la vegetación halófila ocupa el 2.92% del total del acuífero (suelo tipo A), que son suelos cultivados, por lo que K=0.24. Sólo el 0.34% del acuífero está cubierto por bosque del 50 al 75%, está sustentado por calizas y yeso (suelo tipo B), por lo que K= 0.22. Los asentamientos urbanos ocupan el 1% de la superficie del acuífero (suelo tipo A), por lo que K=0.26

Entonces:

$K_{ponderado}$ = 0.24 (0.8970) + 0.26 (0.07024) + 0.24 (0.0292) + 0.22 (0.034) + 0.26 (0.01)
= 0.25

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.25, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

Ce= K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 **= 0.0704**

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia, se obtiene el volumen del escurrimiento: 0.0704 (589.1 hm^3) = 41.5 hm^3 anuales.

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$V_{INF} = V_{LL} – V_{ETR} – V_{ESC}$ (2)

V_{INF} = 589.1 – 541.4 – 41.5

V_{INF} = 6.2 hm^3/año

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado (6.28 hm^3/año), entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 589.1 hm^3/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.01.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 6.2 hm^3/año en los 2,104 km^2 de superficie del acuífero. Por lo que la **Rv = 6.2 hm^3/año.**

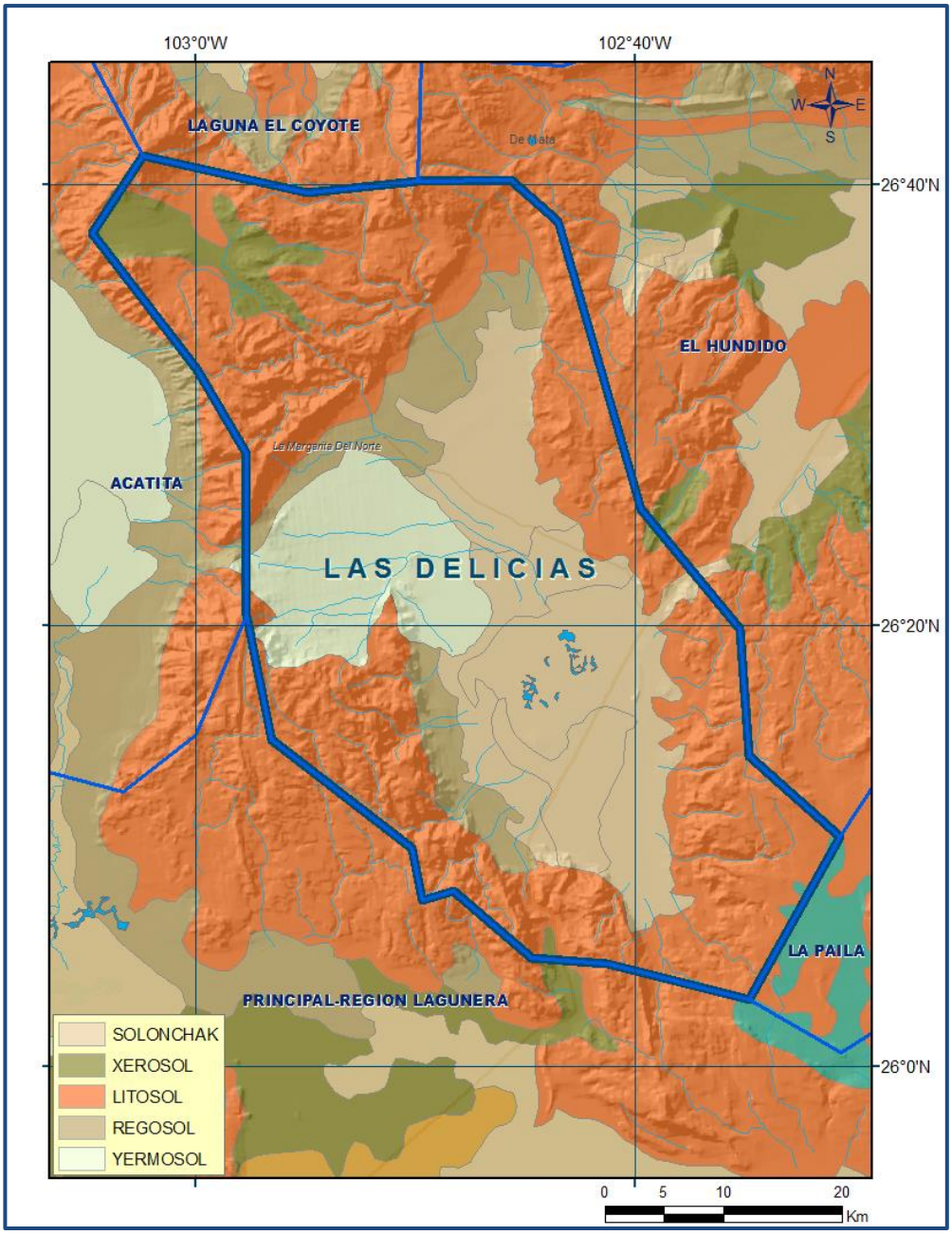


Figura 4. Tipo de suelo

Figura 5. Uso de suelo

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y posiblemente a través de salidas subterráneas y evapotranspiración pero no se cuenta información piezométrica para su estimación. Existen manantiales, pero por el contrario no hay flujo base en ríos, ya que ambos son de régimen intermitente.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **14.1 hm³ anuales.**

7.2.2 Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificó la existencia de 2 manantiales, donde en solo uno se pudo obtener su valor de descarga con un caudal de 6 lps, que representan un volumen de **0.2 hm³ anuales**.

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
R = Recarga total media anual
DNC = Descarga natural comprometida
VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

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

Para este caso, su valor es de **6.2 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 el caso del acuífero Acatita, se considera que la descarga natural comprometida es de 0.2 hm^3 anuales, correspondiente a la descarga de los manantiales que son aprovechados para uso doméstico. Por lo que **DNC = 0.2 hm^3 anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **5,578,114 m^3 anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 6.2 – 0.2 – 5.578114
DMA = 0.421886 hm^3/año.

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **421,886 m^3 anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos Santa Fe del Pino, Hércules, Laguna El Guaje, Laguna El Coyote, Acatita, Las Delicias, Serranía del Burro y Valle de San Marcos, en el estado de Coahuila, elaborado por el Instituto del Agua del Estado de Nuevo León.