



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO SOTO LA MARINA (1915), ESTADO DE
NUEVO LEÓN**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2. FISIOGRAFÍA.....	5
2.1 Provincia fisiográfica	5
2.2 Clima	6
2.3 Hidrografía	6
2.4 Geomorfología.....	7
3. GEOLOGÍA.....	7
3.1 Estratigrafía.....	7
3.2 Geología estructural.....	12
3.3 Geología del subsuelo.....	13
4. HIDROGEOLOGÍA.....	13
4.1 Tipo de acuífero	13
5. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	14
5.1 Entradas.....	14
5.1.1 Recarga vertical (Rv).....	15
5.2 Salidas.....	20
5.2.1 Bombeo (B).....	20
5.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)	21
6. DISPONIBILIDAD	21
6.1 Recarga total media anual (R)	21
6.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	21
6.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	22
6.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	22
7. BIBLIOGRAFÍA	23

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 Soto La Marina, definido con la clave 1915, se localiza en la porción sureste del estado de Nuevo León, entre las coordenadas 23°47' y 24°44' de latitud norte y 99°35' y 100°02' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 2918.90 km² (figura 1).

Limita al norte con el acuífero Citrícola Sur en el estado de Nuevo León; al sur con el

acuífero Palmillas-Jaumave estado de Tamaulipas; al este la colindancia es con los acuíferos Hidalgo-Villagrán y Palmillas-Jaumave ambos del estado de Tamaulipas; en dirección oeste con los acuíferos Sandia-La Unión y Navidad-Potosí-Raíces en el estado de Nuevo León.

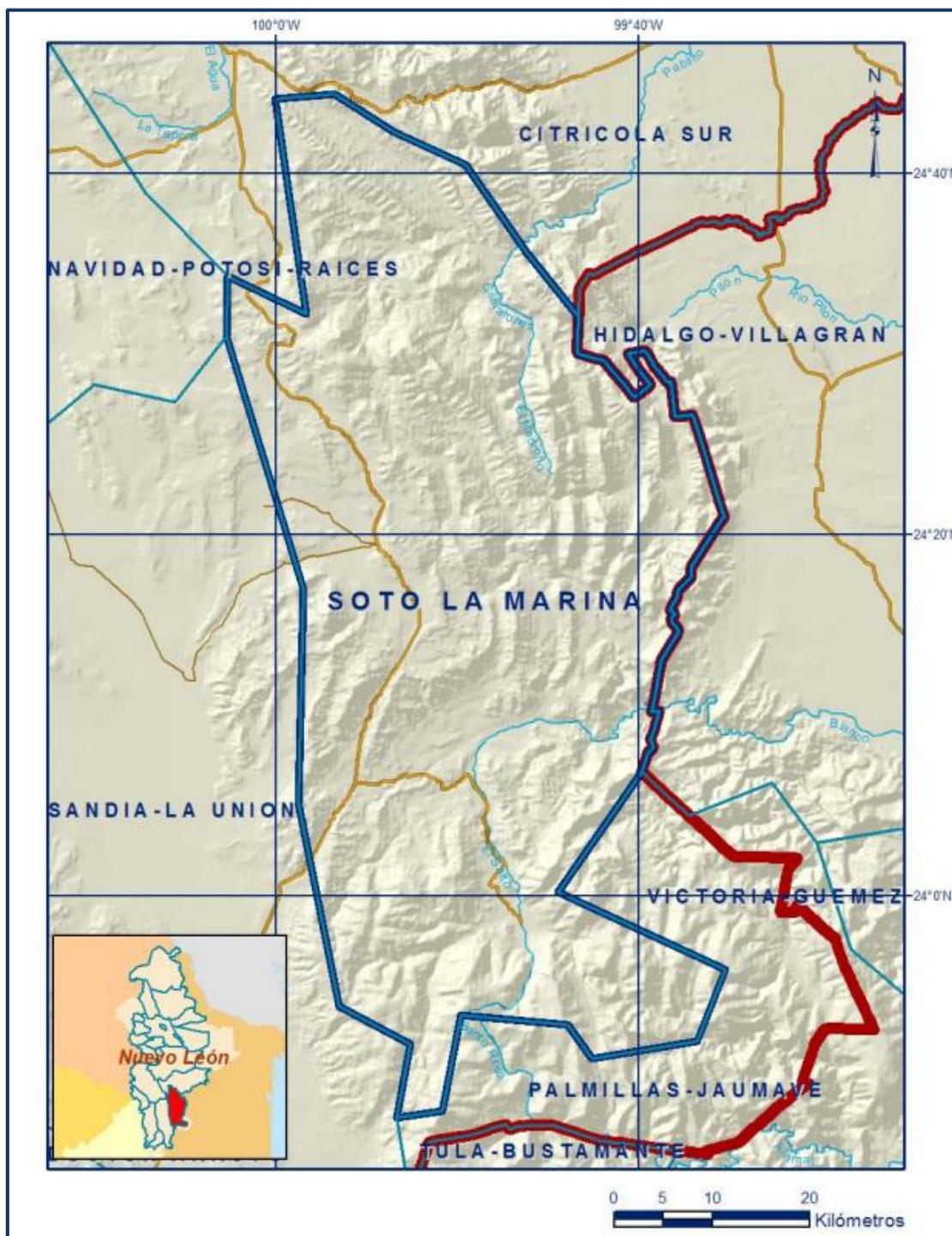


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente el acuífero se localiza en el estado de Nuevo León y se ubica en los municipios del mismo que son: Galeana, Aramberri, General Zaragoza e Iturbide.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimita el acuífero

ACUIFERO 1915 SOTO LA MARINA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	39	51.7	24	6	53.3	
2	99	44	26.9	24	0	11.9	
3	99	35	14.2	23	55	56.8	
4	99	36	47.2	23	51	57.8	
5	99	42	35.0	23	50	59.0	
6	99	43	55.8	23	52	54.1	
7	99	49	51.0	23	53	25.9	
8	99	50	49.8	23	48	5.1	
9	99	53	20.9	23	47	43.7	
10	99	52	38.3	23	51	48.4	
11	99	56	30.0	23	53	54.7	
12	99	58	46.9	24	5	6.4	
13	99	58	31.4	24	17	0.5	
14	100	2	45.4	24	30	58.8	
15	100	2	42.7	24	34	19.4	
16	99	58	22.4	24	32	10.8	
17	100	0	3.1	24	44	6.4	
18	99	56	49.1	24	44	22.6	
19	99	53	30.1	24	42	17.0	
20	99	49	34.3	24	40	27.6	
21	99	46	10.4	24	35	35.4	
22	99	43	21.0	24	32	4.2	DEL 22 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	99	39	51.7	24	6	53.3	

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

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Soto La Marina se encuentra entre los Organismos de Cuenca VI “Río Bravo” y IX “Golfo Norte”. Prácticamente la totalidad del territorio del acuífero se encuentra sujeto a las disposiciones de tres decretos de veda, abarcando la mayor parte el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende los Municipios de Madero, Villagrán, San Carlos y otros del Estado de Tamaulipas, etc.,” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 10 de febrero de 1964. Esta veda es de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Seguido por el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de

los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro del límite geopolítico del Municipio de Galeana, Edo. de Nuevo León, para el mejor control de las extracciones, uso y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 7 de julio de 1978. Esta veda es de tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En menor proporción al sureste del acuífero el *“Acuerdo que establece el Distrito de Riego de Llera, Tamps., y declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 de febrero de 1955. Esta veda es de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.*

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

2. FISIOGRAFÍA

2.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1964), la superficie del acuífero se ubica en la provincia fisiográfica “Sierra Madre Oriental”.

La provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental es un sistema montañoso, constituido principalmente de rocas mesozoicas sedimentarias plegadas, extendido desde el norte de Coahuila hasta el paralelo 20 en la costa de Veracruz. Aunque la estructura geológica es homogénea en toda su extensión, el relieve presenta diferencias notables debido a las condiciones climáticas que son gradualmente húmedas hacia el Sur. Por esto, en el Norte son comunes los relieves de crestas alargadas limitadas con pedimentos o disecadas por valles intermontanos, controlados por la estructura geológica.

La zona del acuífero se encuentra en la subprovincia “Gran Sierra Plegada”, esta representa el macizo principal de la Sierra Madre Oriental, y es tal vez su subprovincia fisiográfica más distintiva y representativa. Está conformada por una serie continua de imponentes anticlinales y sinclinales de marcada verticalidad y que son la manifestación física del plegamiento de la corteza terrestre ocurrida durante el evento orogénico que dio origen a estas montañas. Aquí es donde se presentan las mayores

elevaciones, alcanzando un máximo de 3700 msnm y un promedio alrededor de los 2200 msnm.

2.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García (1981), para las condiciones de la República Mexicana, para el caso del acuífero Soto La Marina el clima es variado y está compuesto de diferentes tipos debidos a la orografía, climas como: semicálido subhúmedo del grupo C ((A)(C(w1)) de temperatura anual mayor a los 18 °C, temperatura del mes más frío menor a esos 18 °C y precipitaciones del mes más seco menores a los 40 mm; semiárido semicálido (BS1h(x')) de temperatura anual mayor a los 18 °C, temperatura del mes más frío menor a esos 18 °C y precipitaciones repartidas todo el año; semiárido templado (BS1k(x')) de temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperaturas del mes más frío entre -3 y 18 °C, lluvias de verano; y representando áreas más pequeñas algunos como: templado subhúmedo (C(w1)), de temperatura media anual entre 12 y 18°C de precipitaciones del mes más seco menores a los 40 mm y el templado subhúmedo (C(wo)) de mismas condiciones de temperatura y precipitación.

Para la determinación de las variables climatológicas se analizó la información de 8 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie del acuífero determinada por medio del método de polígonos de Thiessen, estas estaciones son: Galeana DGE (19085), San Antonio Peña Nevada (19159), Cieneguillas y Crucitas (19144), Pablillo DGE (19091), Zaragoza SMN (19066) y San Francisco de Berlanga (19135) en el estado de Nuevo León; Puerto de Valles (28077) y Villa Mainero (28060) en el estado de Tamaulipas, con registros para el periodo 1982-2011 (29 años), donde se determinan los valores ponderados promedio anuales de precipitación y temperatura que corresponden a **639 mm** y **18.2 °C** respectivamente.

2.3 Hidrografía

El territorio que comprende el acuífero se encuentra ubicado entre tres Regiones Hidrológicas que son: No. 25 "San Fernando Soto La Marina", No. 37 "El Salado" y No. 26 "Panuco", Subregiones Hidrológicas "Río San Fernando" y "Río Soto La Marina", subcuencas Arroyo Alto Blanco, La Angostura-Rancho Viejo, Arroyo Alto de los Anegados, Benito Juárez, Las Ajuntas-Cinco de Mayo y Arroyo Medio Blanco.

La hidrografía regional está integrada por numerosos afluentes intermitentes y el

principal afluente es el Río Purificación que drena aproximadamente un área de 2,579.8 km². El Río Purificación en ciertas zonas se conoce como Río Blanco, sus aguas nacen en esta zona de la Sierra Madre Oriental, este es de gran importancia debido a que aguas abajo tendrá confluencia con otro río y en conjunto formaran el Río Soto La Marina.

La subregión Hidrológica Río Soto La Marina, se ubica al noreste del país, comprende parte de los estados de Nuevo León y Tamaulipas, con una superficie total de 21,475 km².

2.4 Geomorfología

El paisaje está conformado de contornos característicos de la Sierra Madre Oriental, que es un sistema montañoso de rocas plegadas con relieves de crestas alargadas, la subprovincia Gran Sierra Plegada en la que se encuentra el terreno del acuífero representa la geomorfología del lugar con una serie de anticlinales y sinclinales de gran y marcada verticalidad, estas representan el plegamiento de la corteza terrestre que dio origen a las montañas.

3. GEOLOGÍA

En la superficie del acuífero afloran en su mayor parte rocas calizas, lutitas, y areniscas y depósitos continentales como conglomerados y materiales aluviales, también se encuentra aflorando esquistos en la zona centro-sur del acuífero. La distribución de las diferentes unidades litológicas se presenta en la (figura 2).

3.1 Estratigrafía

En la zona afloran rocas sedimentarias, metamórficas cuyo registro estratigráfico varía del Cretácico Inferior al Reciente. A continuación, se describen las unidades de roca iniciando por la más antigua:

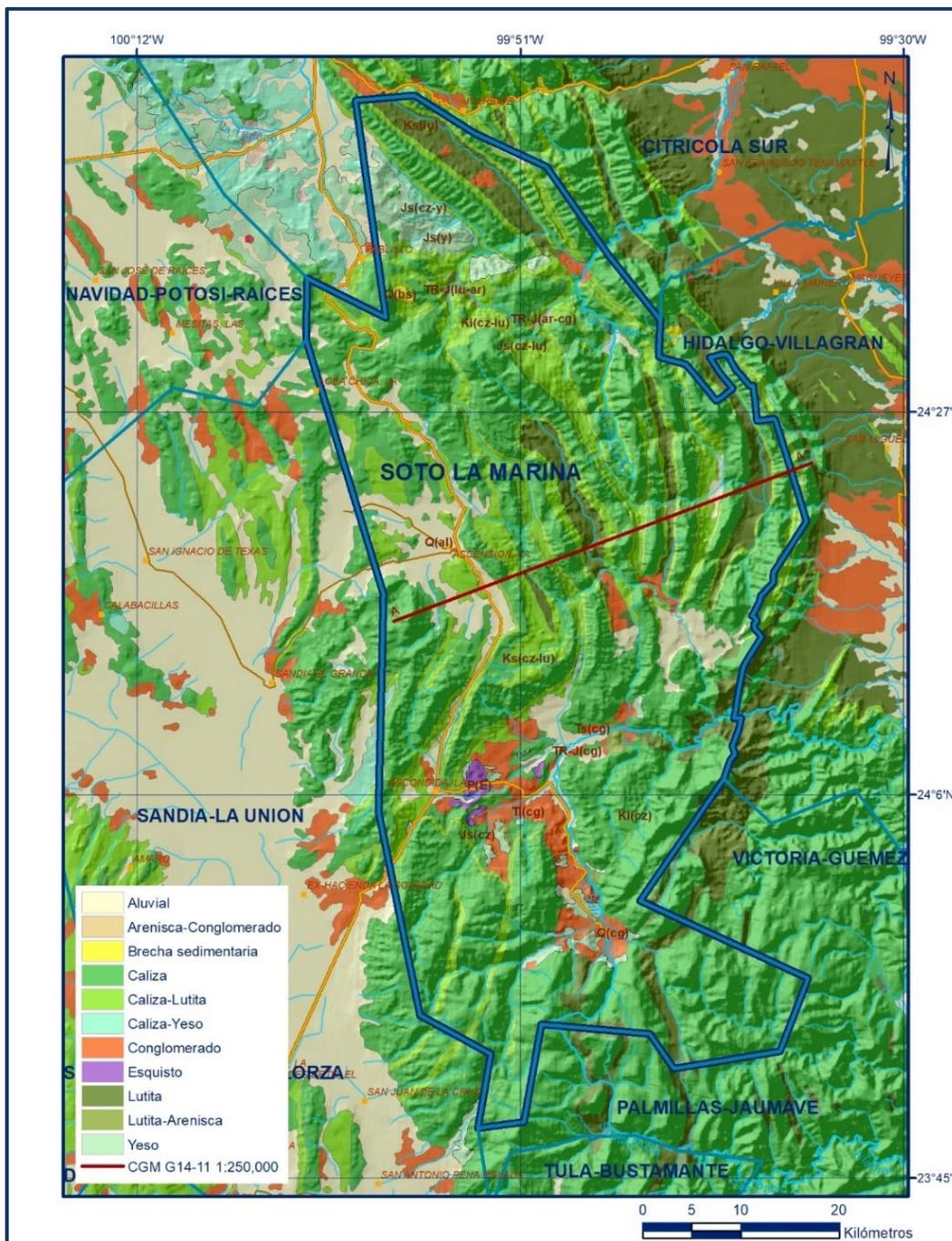


Figura 2. Geología general del acuífero

PALEOZOICO

Pennsylvánico

Esquisto Aramberri

Durante el paleozoico se depositó filita, filita de cuarzo y metagrauvaca, el basamento de la columna estratigráfica de este acuífero. Se trata de una roca compacta que

presenta un metamorfismo de bajo grado con un contenido mineralógico de: sericita, cuarzo, biotita, plagioclasa sódica, sílice, moscovita, epidota, hematita y trazas de manganeso, indicando que la acumulación de cuarzo y plagioclasas forman una estructura de micro ojos; la clasificación es de esquisto de sericita. Se encuentra aflorando en el centro-sur del acuífero.

Triásico Superior-Jurásico Inferior

Hettangiano

Formación Huizachal

Esta formación fue propuesta por Seemes en 1921 y publicada por Imlay en 1948; consiste en una secuencia de hasta 2,000 m de espesor de lutitas, lutitas arenosas, areniscas y conglomerados de color rojo, verde y gris verdoso. Esta formación se formó en fosas tectónicas que fueron rellenas por sedimentos continentales. No se ha encontrado fauna marina a estos depósitos, por lo que su edad ha sido determinada por su posición estratigráfica, que la ubica en el Triásico Superior.

JURÁSICO SUPERIOR

Oxfordiano Tardío-Kimmeridgiano Temprano

Formación Olvido

Constituida por yesos y dolomías intercalados con horizontes delgados de lutitas que conforman el núcleo de los anticlinales del área. Esta formación subyace concordantemente a la Formación La Casita y sobreyace en discordancia tectónica a la Formación Huizachal del Jurásico Superior. Se le ha asignado una edad del Oxfordiano-Argoviano. Presenta afloramientos en la porción norte y sur del acuífero, en la zona de Palmar Los Monos y Zaragoza respectivamente. Se considera que en la zona varía de 140 a 160 m de espesor.

Kimmeridgiano-Titoniano

Formación La Casita

Definida por Imlay en 1943. Corresponde a una secuencia de margas arenosas y carbonosas, calizas arcillo-carbonosas en parte fosfáticas y areniscas hacia la porción basal. Ocasionalmente presenta conglomerados, areniscas, lutitas, margas y yesos. En algunos sitios no es posible su diferenciación, razón por la que se mapea como una sola unidad junto con las formaciones Olvido y Zuloaga, como Jurásico Superior. Se correlaciona con la Formación Pimienta y de acuerdo con su contenido de fósiles (amonites), se le ha asignado al Kimmeridgiano-Tithoniano. Aunque su espesor es de

algunas decenas de metros su distribución está parcialmente en todo el acuífero. Se interpreta que se depositó en un ambiente de aguas someras parcialmente lacustre.

CRETÁCICO INFERIOR

Berriasiano-Hauteriviano

Formación Taraises

Imlay (1936) la define en dos miembros; el Miembro Inferior está constituido por calizas de estratificación media a gruesa que presenta algunas vetillas de calcita y algunos horizontes de limolita en estratos delgados. En correlación con el acuífero Citrícola Sur tiene un espesor aproximado de 80 m. Se depositó en facies de plataforma en aguas someras con mayor aporte proveniente del continente.

El Miembro Superior se depositó en facies de cuenca en aguas tranquilas constituidas por calizas arcillosas de estratificación delgada de lutitas físis.

CRETÁCICO INFERIOR

Hauteriviano-Aptiano

Formación Cupido

Guzmán (1973), compuesta por roca caliza en tres tipos de facies, entre las que están: facies de plataforma, constituida por wackestone y packstone de intraclastos, pellets y miliólidos, dolomitizadas; facies de cuenca, representada por capas gruesas de mudstone con estilolitos, pedernal y pirita; y facies marginal, determinado por arrecifes y bancos de rudistas y corales: Barragán y Díaz-Otero (2004) corroboraron que el contacto formacional Cupido-La Peña representa el punto inicial del evento transgresivo que provocó la interrupción de la sedimentación de plataforma en esta área del noreste de México. Su espesor es variable, pero en promedio es del orden de 400 m.

Aptiano

Formación La Peña

Fue definida por Imlay (1936) como calizas arcillosas delgadas intercaladas con lutitas calcáreas laminares muy fosilíferas. Esta formación es un horizonte índice de referencia, debido a su marcado contraste litológico con las formaciones que la limitan y a su contenido faunístico, siendo el más característico el género *Dufrenoyia* sp. Su ambiente de depósito indica un acarreo de detritos de las zonas positivas, durante movimientos verticales en el Aptiano por lo cual el depósito es infranérico. Su espesor es muy variable de 15 hasta los 450 m. Su ambiente de depósito en base a su fauna y

litología es considerado generalmente como de aguas profundas de una zona batial a epibatial. Su correlación estratigráfica es con la Formación Aurora.

Albiano

Formación Aurora

Humphrey y Díaz (1956), la describen como caliza de estratificación delgada a masiva con cantidad variable de pedernal en forma de nódulos irregulares y concreciones. Presenta raras intercalaciones de lutita calcárea. Subyace a la Formación Cuesta del Cura concordantemente. Representa una transgresión marina que ocasionó inicialmente el depósito de calizas en ambiente de plataforma, al progresar la transgresión se acumularon las calizas con nódulos de pedernal propiamente en un ambiente de cuenca.

Cenomaniano-Turoniano

Formación Cuesta del Cura

Imlay (1936), menciona que esta unidad se compone principalmente de calizas onduladas de estratificación delgada a media, es una caliza muy friable con intercalaciones de lutitas y contiene además nódulos, lentes y bandas de pedernal negro, ocupa generalmente las partes bajas de las sierras, aflorando como una banda de lomeríos alineados. Su ambiente de depósito es de facies profundas.

CRETÁCICO SUPERIOR

Cenomaniano-Turoniano

Formación Agua Nueva

Carrillo-Bravo (1971) la describe como caliza arcillosa finamente bandeada, caliza de grano fino a medio, en capas de espesor delgado a medio que alternan con estratos medianos a gruesos de lutita laminar, una de sus características principales es la presencia de lentes o láminas de pedernal negro. Su espesor al oeste de San Joaquín de Soto, Nuevo León, presenta 234 m. Carrillo-Bravo (1971) menciona que la alternancia rítmica de lutita y caliza arcillosa indica que el depósito se efectuó en condiciones inestables, en un ambiente nerítico, cerca de una fuente de material terrígeno; esta unidad transgredió a los sedimentos de la Formación El Abra.

Cenomaniano tardío-Campaniano temprano

Formación San Felipe

Está constituida por una alternancia de calizas delgadas, arcillosas en parte, con buena

estratificación, de colores gris claro, verde o pardo que intemperizan en anaranjado. Hacia arriba las calizas se tornan más arcillosas y se presentan interestratificaciones de lutita gris que son más frecuentes hacia la cima. En la parte más alta se encuentran intercalaciones de bentonita verde. El espesor máximo es de unos 330 m (PEMEX, 1988). Su contenido paleontológico está caracterizado por foraminíferos planctónicos y escasos bentónicos, además de radiolarios, espinas de equinodermos e icnofósiles. Su ambiente de depósito corresponde a uno de mar abierto, de baja energía con influencia de material terrígeno.

Campaniano-Maestrichtiano

Formación Méndez

Carrillo-Bravo (1971), describe esta unidad como lutita y marga distribuidas en capas medianas y gruesas, que con frecuencia alternan con capas delgadas de bentonita blanca. Esta unidad contiene abundante contenido fósil, destacando la presencia de foraminíferos de los géneros Carrillo-Bravo (1971) indica que los sedimentos de esta unidad fueron depositados en mares abiertos, con profundidades considerables. Sus espesores varían mucho desde 500 m hasta los 1,000 m.

CENOZOICO

Oligoceno-Mioceno

Conglomerado

La cubierta de estos elementos son depósitos continentales constituidos por conglomerados polimícticos mal consolidados.

CUATERNARIO

Holoceno

Aluvión

Está representado por abanicos aluviales, terrazas y depósitos granulares, constituidos principalmente por arcillas y gravas, producto de la erosión de las rocas calcáreas que constituyen las sierras, que se acumularon en las partes topográficamente más bajas. Su espesor es muy reducido en los valles, menor de 100 m.

3.2 Geología estructural

La Sierra Madre Oriental está formada por un complejo metamórfico basal de rocas mesozoicas, que fueron levantadas, comprimidas y transportadas hacia el noroeste formando pliegues y cabalgaduras durante la Orogenia Laramide.

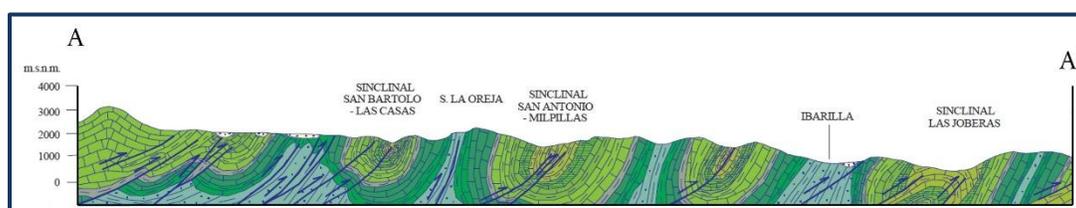
La tectónica se refleja en varios eventos, el más antiguo de probable edad pre-Jurásico superior, se observa en rocas metamórficas, rocas marinas del Paleozoico y rocas continentales del Triásico.

Las estructuras que enmarcan dentro del acuífero está definido por un cinturón de pliegues y cabalgaduras, conformados por anticlinorios y sinclinorios, con orientación NW-SE y N-S, en donde se conjugan fallas inversas paralelas a los ejes de pliegues, y un fallamiento normal lateral.

3.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica recaba en el acuífero, cartas geológicas con secciones litológicas del Servicio Geológico Nacional (SGM) y por correlación con acuíferos vecinos, es posible establecer la existencia de dos medios hidrogeológicos, en la porción superior están constituidos por materiales aluviales y la porción superior constituida por lutitas y margas, en función de las características de los sistemas de fracturamiento que existen en la zona y presencia de pliegues isoclinales ligeramente recostados, se deduce que la profundidad del fracturamiento en la Formación Méndez es posible que no se encuentre a más de 70 m.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento, la secuencia de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas, así como las rocas metamórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera G14-11 "Linares". Esc. 1:250,000 (SGM, 2008)

Figura 3. Sección geológica esquemática

4. HIDROGEOLOGÍA

4.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre a semiconfinado**, debido a los diferentes estratos presentes en la zona se cuenta con permeabilidades variables, los materiales que más abundan son las rocas calizas de diferentes formaciones, la Formación Cupido de permeabilidad secundaria por su fracturamiento funcionan como acuíferos libres en las sierras

anticlinales en donde afloran las rocas calizas y confinados en los valles intermontanos de sinclinales, valles donde las calizas se encuentran cubiertas por rocas arcillosas.

También se encuentran depósitos aluviales no consolidados que rellenan zonas bajas, estos presentan granulometrías variables, esta característica da como resultado permeabilidades de medias a altas dependiendo del material que predomine, estos depósitos constituyen áreas de recarga.

5. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

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

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

5.1 Entradas

Las entradas al acuífero Soto La Marina están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv). No existe información piezométrica actual ni histórica que cubra la zona del acuífero. La escasa información disponible, procedente de recorridos de campo hechos se encuentra dispersa en tiempo y espacio, de tal manera que no es posible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas.

Por estas razones, se optó por plantear el balance hidrometeorológico en la superficie de **2,918.90 km²** del acuífero para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

5.1.1 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:

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

Donde:

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:

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

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (2,918.90 km²) por la lámina de precipitación media anual (639 mm):

$$V_{LL} = 2,918.9 \text{ km}^2 (0.639 \text{ m}) = 1,865.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando el valor medio anual de precipitación de 639 mm y temperatura de 18.2°C.

Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas por todos los climas del mundo, define la siguiente expresión para la estimación de la evapotranspiración real:

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

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc, es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L. En caso contrario se obtiene una $ETR > P$ y para

estos casos se debe considerar a $ETR = P$. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración de **568 mm anuales**.

Por lo tanto, el volumen de ETR es:

$$V_{ETR} = 2,918.90 \text{ km}^2 (0.568 \text{ m}) = 1,655 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 27 de marzo de 2015, 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:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{VOLUMEN ANUAL DE} & & & & & & \\ \text{ESCURRIMIENTO} & & & & & & \\ \text{NATURAL DE LA} & = & \text{PRECIPITACION} & * & \text{AREA DE LA} & * & \text{COEFICIENTE DE} \\ \text{CUENCA} & & \text{ANUAL DE LA} & & \text{CUENCA} & & \text{ESCURRIMIENTO} \\ & & \text{CUENCA} & & & & \end{array}$$

El coeficiente de escurrimiento (C_e) 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, 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 (C_e), 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

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO
	A	B	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	CARACTERÍSTICAS		
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 la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) escala 1:1,000,000 en la zona que comprende el acuífero Soto La Marina predominan los siguientes tipos de suelo: Feozem, Litosol, Luvisol, Regosol, Rendzina, Vertisol y Xerosol que se clasificaron en tres tipos de suelo: A, B y C (figura 4).

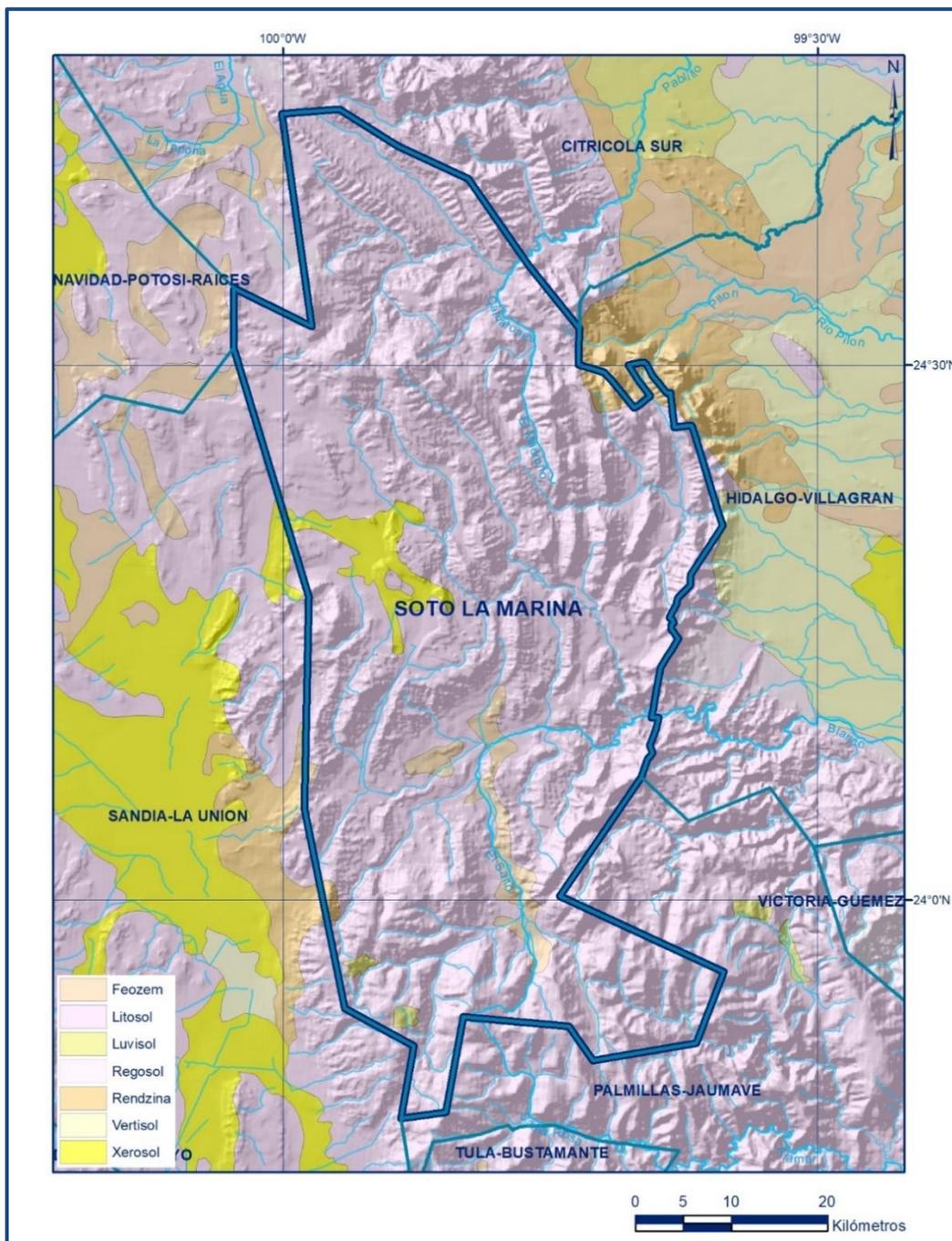


Figura 4. Tipo de suelo

En cuanto al uso de suelo, de acuerdo con la cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1:250,000, en el área donde se localiza el acuífero hay al menos seis usos de suelo diferentes: agricultura, asentamientos humanos, bosque, matorral, otros tipos y pastizal (figura 5).

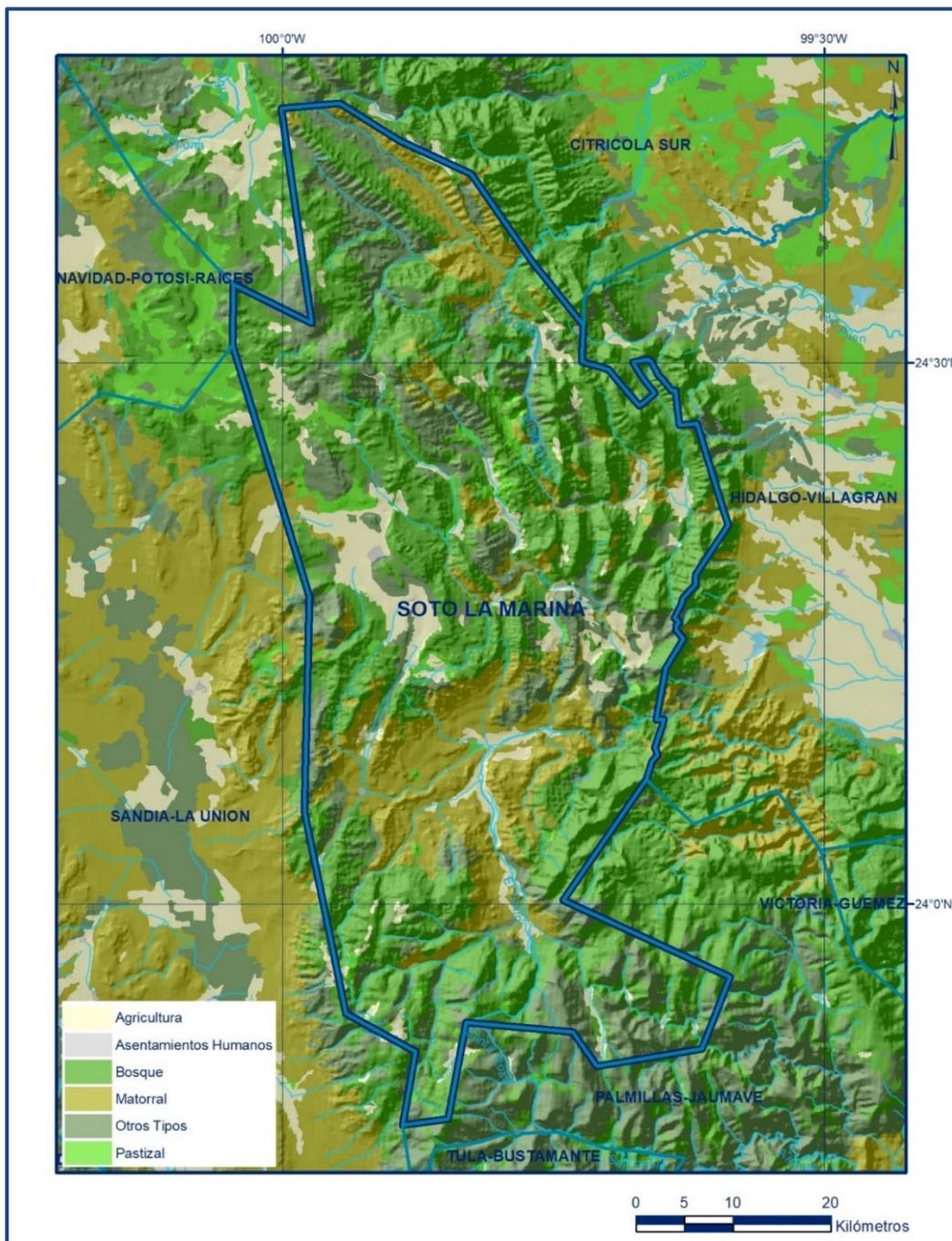


Figura 5. Uso de Suelo

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.23, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

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

$$\mathbf{Ce = 0.068}$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento:

$$\mathbf{V_{ESC} = 0.068 (1,865.2 \text{ hm}^3) = 126.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

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

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

$$\mathbf{V_{INF} = 1,865.2 - 1,655 - 126.8 = 83.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 1,865.2 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.0447.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 83.4 hm³/año en los 2,918.90 km² de superficie del acuífero.

$$\text{Por lo que } \mathbf{Rv = 83.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

5.2 Salidas

Las salidas de agua subterránea estimadas en este balance son las siguientes:

La descarga de un acuífero puede ocurrir principalmente por bombeo (B), salidas por flujo subterráneo (Sh), caudal base de un río y a través de manantiales (DM). La descarga del acuífero corresponde a la que se da naturalmente a través del caudal base del río Purificación además de la extracción registrada por bombeo.

5.2.1 Bombeo (B)

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), se tiene registrado un volumen de extracción de **9.9 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022.

5.2.2 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con la información de 2017, se identificó la existencia de manantiales, que en conjunto descargan **21.8 hm³ anuales**.

6. 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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

6.1 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 recarga vertical.

Para este caso, el valor estimado de esta recarga total media anual que recibe el acuífero es de **83.4 hm³ anuales**.

6.2 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 Soto La Marina se considera que el valor de la descarga natural

comprometida, que corresponde a la salida por manantiales y a caudal base del río Soto La Marina, es de **DNC = 73.1 hm³ anuales**.

6.3 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 **9,922,255 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 del 2022**.

6.4 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 83.4 - 73.1 - 9.922255 \\ \text{DMA} &= 0.377745 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe disponibilidad de **377,745 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

7. BIBLIOGRAFÍA

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2008. Carta Geológico-Minera “Linares” G14-11, Escala 1: 250,000.

Diario Oficial de la Federación (DOF), 2001. ACUERDO por el que se establece y da a conocer al público en general la denominación única de los acuíferos reconocidos en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, por la Comisión Nacional del Agua, y la homologación de los nombres de los acuíferos que fueron utilizados para la emisión de los títulos de concesión, asignación o permisos otorgados por este órgano desconcentrado.