

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LAGUNA DE SANTA MARÍA (0818),
ESTADO DE CHIHUAHUA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación Administrativa del Acuífero.....	5
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	7
3. FISIOGRAFÍA.....	11
3.1 Provincia Fisiográfica.....	11
3.2 Clima.....	12
3.3 Hidrografía.....	12
3.4 Geomorfología.....	13
4. GEOLOGÍA.....	13
4.1 Estratigrafía.....	14
4.2 Geología Estructural.....	15
4.3 Geología del subsuelo.....	17
5. HIDROGEOLOGÍA.....	18
5.1 Tipo de acuífero.....	18
5.2 Parámetros hidráulicos.....	18
5.3 Piezometría.....	19
5.4 Comportamiento hidráulico.....	19
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2 Elevación del nivel estático (2006).....	20
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	21
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	23
7.1 Entradas.....	24
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	24
7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (Eh).....	24
7.2 Salidas.....	25
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	25
7.2.2 Extracción por bombeo (B).....	26
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	26
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S).....	26
8. DISPONIBILIDAD	27
8.1 Recarga total media anual (R).....	27
8.2 Descarga Natural Comprometida (DNC).....	28
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	28
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	29
9. BIBLIOGRAFÍA	30

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas. Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero Laguna de Santa María, definido con la clave 0818 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Chihuahua, en los municipios de Nuevo Casas Grandes, Ahumada, Ascensión y Buenaventura, entre las coordenadas 30° 14' y 31° 18' de latitud norte y 106° 41' y 107° 41' de longitud oeste. Tiene una extensión superficial de 5,317 km² y colinda al norte con los acuíferos Palomas-Guadalupe Victoria y Las Palmas; al noreste con Conejos-Médanos; al este con Laguna de Patos; al sureste con Flores Magón-Villa Ahumada; al sur con Laguna La Vieja; al suroeste con Buenaventura; al oeste con Casas Grandes y al noroeste con el acuífero El Sabinal; todos ellos localizados en el estado de Chihuahua (Figura 1).

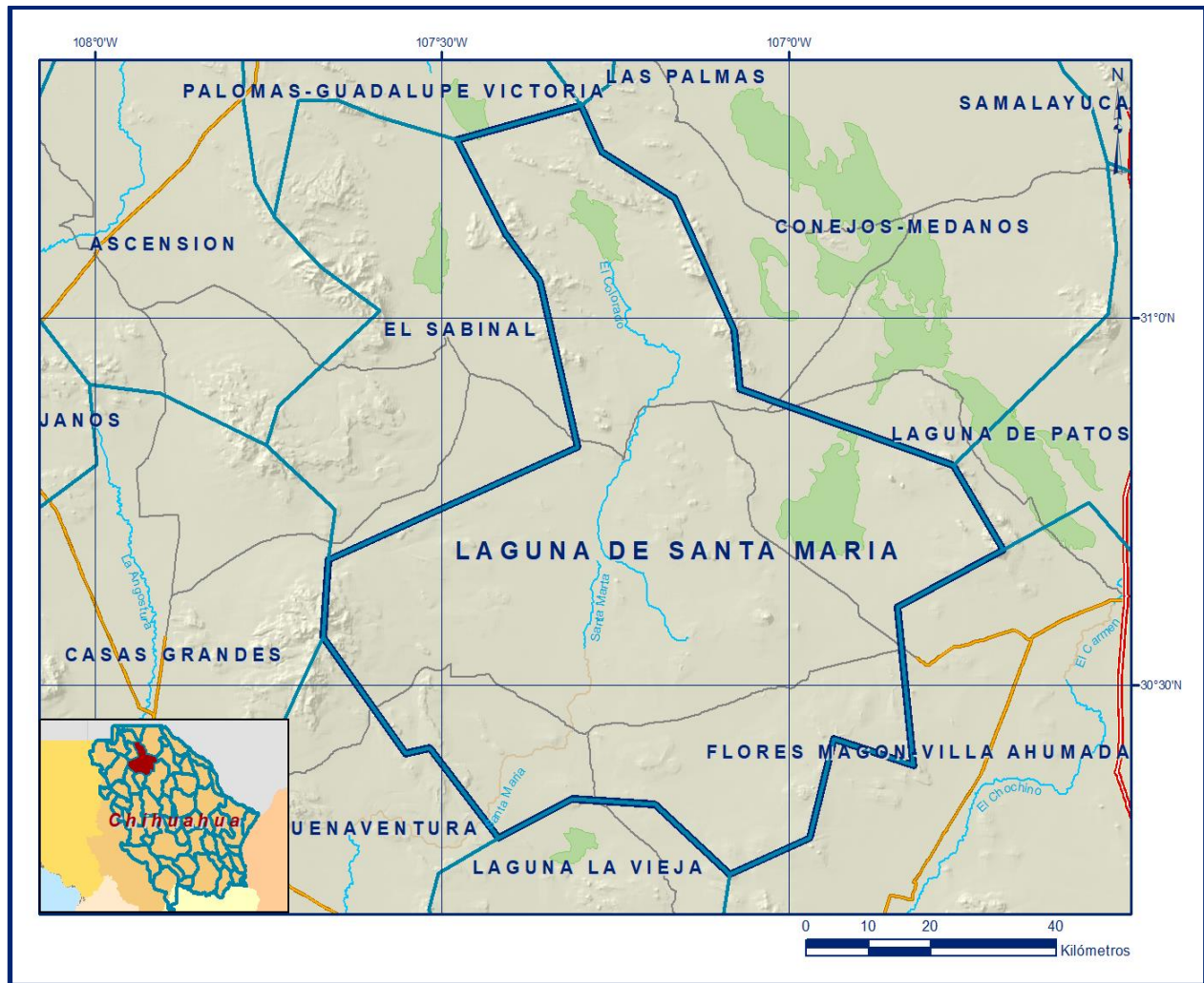


Figura 1. Localización del acuífero

Sus límites están definidos por la poligonal simplificada cuyos vértices se enumeran en la tabla 1.

La población de la zona está distribuida en 30 localidades, dispersas en los cuatro municipios referidos. Según los datos del XII censo de Población y Vivienda, en el año 2000 la población total era de 655 habitantes y estaba concentrada, principalmente, en los municipios de Ahumada y Buenaventura. Su tasa de crecimiento anual es de 1.4 %, en promedio.

La actividad más importante de la zona es la ganadería. En el año 1997, se estimó que el ganado estaba distribuido como sigue: 95.5%, bovino; 2.9%, equinos, y 1.6%, caprino, porcino, ovino y aviar.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 0818 LAGUNA DE SANTA MARIA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	107	39	48.3	30	40	12.4
2	107	18	18.1	30	49	29.1
3	107	21	33.9	31	3	11
4	107	24	30.4	31	6	55.0
5	107	28	40.1	31	14	32.3
6	107	18	11	31	17	25.0
7	107	16	13.2	31	13	37.2
8	107	9	53.9	31	9	49.9
9	107	7	26.2	31	4	419
10	107	4	47.9	30	59	4.5
11	107	4	16.2	30	54	119
12	106	45	49.3	30	48	0.3
13	106	41	28.6	30	41	2.4
14	106	50	39.7	30	36	24.9
15	106	49	17.7	30	23	46.7
16	106	56	10.5	30	25	36.8
17	106	58	14.6	30	17	30.0
18	107	5	7.8	30	14	319
19	107	11	35.3	30	20	13.5
20	107	18	43.1	30	20	42.8
21	107	25	7.5	30	17	32.6
22	107	31	3.1	30	24	52.9
23	107	33	9.9	30	24	23.5
24	107	40	17.4	30	33	54.5
1	107	39	48.3	30	40	12.4

Según estudio realizado por el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) para la SAGARPA, en el 2006, el coeficiente de agostadero es de 20 a 25 hectáreas por cabeza. Un servicio de transporte foráneo de pasajeros comunica a los municipios con el resto del estado. El servicio de carga privada es local; las líneas foráneas sólo usan la vía de paso. La infraestructura de los servicios es muy limitada (SAGARPA, IMTA, 2006). Las rancherías de la zona no cuentan con servicios de agua, luz, salud, correo ni mensajería.

1.2 Situación Administrativa del Acuífero.

El acuífero pertenece a la región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo y se encuentra sujeto en un 57% de su superficie a la disposición de decretos de veda para la explotación, uso y aprovechamiento del agua subterránea mediante un acuerdo y dos decretos presidenciales, emitidos en los años de 1957, 1979 y 1981, quedando la superficie complementaria, el 43%, en zona de libre alumbramiento.

La porción este del acuífero está cubierta por el acuerdo que establece el Distrito de Riego “El Carmen” en San Buenaventura y Villa Ahumada, Chih., publicado en el Diario Oficial el 30 de enero de 1957. En su artículo primero se declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas, en la inteligencia que el Distrito tendrá provisionalmente los límites que se mencionan.

En su artículo Segundo se declara por tiempo indefinido veda para el otorgamiento de concesiones con aguas del Río El Carmen y de toda su cuenca tributaria, así como las aguas de la Laguna de Patos y sus afluentes.

El artículo Tercero establece veda por tiempo indefinido, para el alumbramiento de las aguas del subsuelo en la región delimitada según el artículo primero.

El artículo Cuarto menciona que “excepto cuando se trate de alumbramiento para usos domésticos, a partir de la fecha en que este acuerdo entre en vigor, nadie podrá efectuar alumbramientos de agua del subsuelo dentro de la zona vedada sin previo permiso por escrito de la Autoridad del Agua, la que solo lo expedirá en los casos que de los estudios respectivos se deduzca que no se causarán los daños que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse”.

Al efecto, los interesados en alumbrar aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, inclusive compañías y contratistas particulares que las realicen, no podrán efectuarlas sin contar previamente con el permiso correspondiente y, de obtenerlo, estarán obligados a realizar las obras de conformidad con las especificaciones que en el permiso se fijan por dicha Autoridad. En la porción norte del acuífero está en vigor el Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida en los límites geopolíticos de los municipios de Ascensión y Janos, Chih. y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento del subsuelo en la región mencionada, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de abril de 1979.

Finalmente, en la porción oeste del acuífero rige el Decreto de veda, publicado en el Diario Oficial el 27 de marzo de 1981, en cuyo artículo primero menciona que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del municipio de Galeana y de las zonas no vedadas por el Acuerdo del 16 de junio de 1954, publicado en el diario Oficial de la Federación el día 6 de julio del mismo año, en los municipios de Casas Grandes y Nuevo Casas Grandes, en el estado de Chihuahua, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo de dichas zonas, que no quedaron incluidas en la veda impuesta por el ordenamiento ya mencionado.

Los decretos anteriores establecen que por causa de interés público, se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en la región mencionada en su artículo primero.

En su artículo segundo mencionan que “excepto cuando se trate de extracciones para uso doméstico y de abrevadero que se realicen por medios manuales, desde la vigencia del presente decreto nadie podrá ejecutar obras de alumbramiento de aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, sin contar previamente con el correspondiente permiso de construcción otorgado por la Autoridad del Agua, ni extraer o aprovechar las mencionadas aguas sin la concesión o asignación que expida también, según el caso, la propia Autoridad”.

El artículo Cuarto establece que sin previo permiso escrito de la Autoridad, a partir de la vigencia del presente decreto, los aprovechamientos existentes en la zona vedada, no podrán ser cambiados de uso, destino, ni aumentados en sus gastos y volúmenes de extracción. De la misma manera, tampoco podrán modificarse las características constructivas de las obras, ni la capacidad de los equipos de bombeo autorizados o que se vienen utilizando desde antes de la veda.

Artículo Quinto.- La Autoridad del Agua concederá permiso de construcción para obras, únicamente en los casos en que los estudios relativos concluyan que no se causarán los perjuicios que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse. En caso de autorizarse obras de alumbramiento como resultado de dichos estudios, los trabajos respectivos que al efecto se realicen, se sujetarán a los plazos y especificaciones que señale la Autoridad del Agua.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

Hasta ahora, la explotación del acuífero Laguna de Santa María es poco significativa. Dado que la actividad económica principal de la región es la ganadería y a que sólo existen pequeñas comunidades y rancherías diseminadas en la cuenca, la extracción se reduce a pequeñas cantidades de agua, del orden de 2 millones de metros cúbicos por año, para uso pecuario y doméstico.

Sin embargo, en los últimos cuatro años, grupos de productores agrícolas han emprendido ambiciosos proyectos de desarrollo agrícola, para lo cual han construido varias decenas de pozos que, en conjunto, tienen gran capacidad de extracción. Una vez que se inicie su operación, se espera que la extracción de agua rebase la escasa recarga natural del acuífero.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Los estudios realizados en el área del acuífero se resumen a continuación.

Geofísica de Exploraciones GUYSA, S. A. Estudios de exploración geofísica en la zona El Sabinal, Chihuahua. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección de Aguas Subterráneas, Contrato ACSH-86-05-E, México, Diciembre 1986. Aunque no abarca precisamente la zona de la Laguna Santa María, proporciona información de la región ya que El Sabinal se encuentra al oeste de este acuífero.

La región presenta las características de las zonas semidesértica y desértica de la República Mexicana: elevadas temperaturas en verano y escasa precipitación anual, esto trae como consecuencia la baja disponibilidad de agua superficial que impide el desarrollo social y económico de la región.

El estudio permitió ampliar el conocimiento del marco geológico de la región para que, junto con otros estudios, se definiera el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico de la zona. Se realizaron 60 sondeos eléctricos verticales tipo Schlumberger, distribuidos en cuatro perfiles, cuya interpretación cuantitativa junto la correlación geológica superficial y del subsuelo permitió la zonificación en cuatro partes. La primera con resistividades aparentes menores a 10 ohm-m, asociada a materiales granulares finos a muy finos o agua de regular calidad. La segunda se ha delimitado entre los 10 y 25 ohm-m de resistividad aparente y se correlaciona con material granular medio a fino o con agua de calidad aceptable. La tercera zona con resistividades aparentes entre 25 y 75 ohm-m y se asocia con material granular mediano. La última zona con resistividades aparentes mayores a 75 ohm-m se correlaciona con roca consolidada, ígnea o sedimentaria.

Algunas de las conclusiones de este estudio son las siguientes: en las inmediaciones de El Sabinal Viejo se encontraron calizas de facies arrecifales con algunas evidencias de disolución y aunque este proceso no se encuentra en una etapa avanzada, se debe tomar en cuenta que la precipitación de la región es escasa, 200 mm en promedio, por lo que bajo otras condiciones, la caliza puede desarrollar una mayor permeabilidad a la observada en superficie. Los espesores de los materiales ígneos y sedimentarios que rellenan la cuenca, varían de unos cuantos metros, hasta alcanzar valores de 570 m. Estos volúmenes acumulados han permitido que se almacene agua subterránea, como lo demuestran las 19 obras censadas, en las que los niveles piezométricos oscilan entre los 5 y 78 m.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Estudio hidrológico del estado de Chihuahua. México, 1999. Es un documento que forma parte de una serie de estudios hidrológicos por entidad federativa.

Ofrece información sobre los factores más importantes del ciclo hidrológico, que permite descender a un detalle particular y adecuado para planear estrategias en la optimización del recurso hídrico, complementándolo con una serie de tablas, gráficas y planos. Este estudio da a conocer las condiciones del estado, así como las perspectivas en cuanto a las posibilidades del recurso; información que es resumida y de forma gráfica para su fácil comprensión y aplicación. Todo ello a través de los temas de generalidades, marco físico general, climas, geología, hidrología superficial y subterránea. De las conclusiones solamente se presentan algunas:

El clima en el estado de Chihuahua presenta muchas variantes producto de su configuración y posición, respecto al resto de la República Mexicana. Se reconocieron tres grandes grupos climáticos: secos, templados y cálidos, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1973).

Fisiográficamente el estado de Chihuahua se ve regido por dos provincias fisiográficas, Sierra Madre Occidental y Sierras y Llanuras del Norte. De esta manera, el flanco oeste está dominado por la estructura fisiográfica de la Sierra Madre Occidental; en tanto que las porciones centrales y este están constituidas por sierras y valles. El aspecto fisiográfico está íntimamente relacionado a un dominio litológico: la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, conformada por rocas ígneas félsicas; las Sierras y Llanuras del Norte por rocas carbonatadas y rellenos aluviales. Algunas de las recomendaciones de este estudio son:

Dar prioridad a la demanda con fines de agua potable y a las actividades que generen mayor ingreso por m³ de agua. Hacer cambios en el patrón de cultivos por aquellos de menor consumo de agua.

Levantar de manera periódica y detallada el control piezométrico para de esta manera conocer: la profundidad al nivel estático, la elevación del nivel estático y la evolución del nivel estático.

Conocer la extracción y recarga de todos los acuíferos, para tener un balance geohidrológico más real y exacto de la disposición adicional del agua. Tener control estricto de los censos de aprovechamientos, permisos para nuevas perforaciones, y rehabilitación de pozos y sistemas de bombeo.

Actualizar, fomentar y elaborar estudios geohidrológicos.

Comisión Nacional del Agua. Reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos Laguna La Vieja, Laguna de Santa María, Laguna de Tarabillas, Los Juncos y Flores Magón-Villa Ahumada, del estado de Chihuahua. México, Diciembre de 2005. Este estudio está enfocado al diseño de una red óptima de monitoreo piezométrico de la zona de la Laguna de Santa María. Los antecedentes del estudio remarcan que el agua, es un elemento determinante del crecimiento económico y uno de los más importantes recursos naturales que debe ser administrado como parte de los programas de desarrollo sustentable. Por tal motivo es de vital importancia contar con estudios de los procesos hidrológicos con el fin de llevar a cabo observaciones sistemáticas que permitan establecer un manejo adecuado de las fuentes de aprovechamiento. Las principales conclusiones y recomendaciones del estudio son las siguientes:

La red de monitoreo quedó integrada por 79 puntos: 57 pozos piloto y 22 piezómetros. La configuración del nivel estático obtenida en el presente estudio muestra elevaciones que van desde la 1,180 a la 1,330.

En la zona suroeste, que es la de mayor concentración, se presentan valores de elevación de 1,250 a los 1,330, no se observan manifestaciones de abatimientos fuertes. Se elaboró un plano con las profundidades del nivel estático el cual muestra curvas de igual profundidad que van desde los 10 a los 70 m. En la zona de mayor concentración se presentan profundidades de 20 a 60 m. La mayor profundidad puntual se registró en el pozo 4, con una lectura de 78 m.

Se recomienda llevar a cabo una nivelación de brocales en los pozos piloto indicados; asimismo, establecer fechas periódicas para que en forma sistemática, se realicen las lecturas piezométricas, por lo menos dos veces al año, con el fin de tener un registro histórico confiable. Además, de llevar a cabo la construcción de piezómetros propuestos. Dada la extensión de áreas sin aprovechamientos, se recomienda la construcción de piezómetros al norte, este y suroeste de las zonas de concentración de las extracciones.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Estudio hidrogeológico regional de los acuíferos del noroeste del Estado de Chihuahua (acuífero Laguna de Santa María), 2006. Un grupo de agricultores inició en 2005 y los primeros meses del 2006 la exploración del agua del subsuelo en zonas clasificadas por la CONAGUA como de libre alumbramiento, mediante perforaciones de pozos profundos para ser utilizados con fines agrícolas principalmente.

Las nuevas áreas en desarrollo se ubican en la región de Laguna de Tarabillas, Palmar del Berrendo y Laguna de Santa María. Agricultores establecidos en las mismas zonas han manifestado a las autoridades estatales y federales su preocupación por que estos nuevos desarrollos afecten negativamente a sus propiedades y desarrollos agrícolas ya existentes.

Ante la problemática planteada, el gobierno del estado y la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua de Chihuahua solicitaron al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua la realización de los balances subterráneos de dichas zonas. A partir de esta información se podrá definir, con base en la NOM-011-CNA-2000, la disponibilidad media anual de cada acuífero. Con ello las autoridades involucradas podrán implementar políticas de explotación sustentable de cada acuífero.

Los materiales donde se aloja en acuífero son del tipo detrítico en la parte superior, principalmente arenas y conglomerados. No obstante, estos depósitos tienen una variación granulométrica como consecuencia de los procesos de erosión y transporte, encontrando horizontes arcillosos y limosos hacia las partes centrales del valle. El espesor de estos depósitos es del orden de los 500 m. Subyaciendo a los depósitos aluviales se encuentra una andesita, que dadas las condiciones de tectonismo, intemperismo y erosión es posible que presente fracturamiento que permita la circulación del agua subterránea. Cuando estas rocas no presentan fracturamiento, constituyen el basamento hidrogeológico de la zona.

Con respecto al censo de aprovechamientos, de un total de 35 pozos encontrados en el acuífero de Santa María, solamente se tiene medición de la profundidad del nivel estático en 18 pozos. En algunos de los aprovechamientos no se tenía acceso a la sonda y otros se encontraban en perforación. La profundidad al nivel estático de los aprovechamientos se encuentra de 3 a 43 m de profundidad.

Con base en la piezometría se realizó la configuración del nivel estático con variaciones espaciales de la carga hidráulica que revelan una dirección preferencial del flujo de aguas subterráneas en sentido SW-NE proveniente de las zonas de mayor elevación. La zona de Los Chontes presenta una elevación del nivel estático de 1,230 msnm con gradiente hidráulico de 0.0043 mientras que en la zona de El Mirador y El Chamizal se reportan elevaciones de 1,165 msnm con gradiente de 0.0013. La dirección preferencial del flujo subterráneo es SW-NE, definiendo así al sistema de flujo en estado establecido, ya que la influencia de la explotación para uso agrícola aún no tiene efectos negativos en la zona. El volumen de extracción estimando es del orden de los 217,152 metros cúbicos por año ($m^3/año$), que, comparados con el volumen anual concesionado de 2,030,672 inscritos en el REPDA, resulta un volumen muy pequeño.

El flujo de la zona está definido por el agua subterránea que se incorpora desde las zonas de recarga en las serranías, viaja a través de las calizas Cretácicas y se mueve a través del conglomerado. Estos sistemas de flujo corresponden a tiempos de residencia de al menos 50 años.

Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que se analizan y discuten en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

El área está comprendida en la provincia fisiográfica denominada Cuencas y Sierras (Erwin Raisz, 1964), caracterizada por largas sierras paralelas orientadas en dirección noroeste-sureste, separadas por grandes depresiones, llamadas bolsones, rellenos de sedimentos continentales, que se caracterizan por su suave pendiente a partir de las sierras y extensa planicie en la parte central. Una de estas depresiones forma a la denominada Laguna de Santa María, ubicada por debajo de la cota 1,200 metros sobre el nivel del mar y se ubica entre las sierras de Borregos (Cantiles) y la de La Naríz (Guzmán).

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1970), el clima de la región es de tipo seco o estepario extremoso con lluvias en verano. De los datos climatológicos registrados en la estación “8066, Galeana” y 8155, Villa-Ahumada” para el lapso 1961-1988, se infiere que la precipitación media anual de la zona varía desde los 210 hasta los 318 milímetros; el período de lluvias comprende los meses de junio a octubre, siendo julio el mes más lluvioso, y mayo, el más seco. La temperatura media anual en el mismo período fue de 16.2° C y la evaporación potencial media anual de 2,044 milímetros.

3.3 Hidrografía

La cuenca del río Santa María pertenece a la Región Hidrológica No. 34 Cuencas Cerradas del Norte.

Se trata de una cuenca endorreica o cerrada que es drenada por el río Santa María, el arroyo El Queso y los arroyos tributarios de ambos; sus cauces son poco definidos debido al escaso escurrimiento y a la capacidad de infiltración de los terrenos por los que transitan. El régimen de escurrimiento es intermitente, con avenidas torrenciales esporádicas durante la temporada de lluvias. El agua colectada por el sistema de drenaje desemboca a la laguna de Santa María, ubicada en la porción Norte de la cuenca y en una laguna de mayor dimensión localizada al oeste en la desembocadura del arroyo El Queso. Los escurrimientos del río Santa María son almacenados por la presa El Tintero que se localiza a 32 km aguas arriba de Buenaventura, sobre el río Santa María.

La cuenca presenta un drenaje dendrítico que se caracteriza por mostrar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal, río Santa María, formando ángulos agudos. Debido a la relativa uniformidad del sustrato y similar resistencia a la erosión, la forma del patrón dendrítico está determinada básicamente por la dirección de la pendiente del terreno. Se caracteriza por la unión irregular de los afluentes con gran variedad de ángulos, generalmente menores a noventa grados. Este tipo de drenaje se desarrolla sobre rocas de resistencia uniforme y denota una notable falta de control estructural. Las lagunas de Santa María y la localizada al oeste en la desembocadura del arroyo El Queso son cuerpos de agua intermitente cuya extensión varía estacionalmente a lo largo del tiempo, dependiendo de las aportaciones superficiales y subterráneas que recibe, así como de la cantidad de agua que pierde por la intensa evaporación. Su extensión máxima es del orden de 36 y 127 kilómetros cuadrados respectivamente.

3.4 Geomorfología

En general, la zona presenta rasgos singulares que la ubican en una etapa senil, observándose tres unidades geomorfológicas: sierras, pie de monte y llanuras. Las sierras alcanzan elevaciones en el rango de 1,200 a 2,400 metros sobre el nivel del mar; las principales son las denominadas: Borregos, La Naríz y Escondida.

El pie de monte es una unidad geomorfológica formada por materiales conglomeráticos depositados en forma de abanicos y terrazas de suave pendiente, cortados por numerosos arroyos de cauce poco profundo. Se le encuentra en las estribaciones de las sierras principales.

La Llanura es la unidad de mayor extensión. Ocupa gran parte de la porción noreste del estado de Chihuahua y se formó por el depósito de sedimentos continentales aluviales y lacustres que rellenaron profundas fosas. Presentan un relieve suave con moderada pendiente. En particular, esta unidad abarca gran parte de la cuenca del río Santa María, que desemboca en el lago de mismo nombre; su elevación es un poco menor a los 1,200 metros sobre el nivel del mar.

Los sedimentos marinos se plegaron y emergieron durante el episodio orogénico Laramide y desde el Mioceno hasta el Reciente han sido afectados por fallas normales asociadas al episodio extensional de Cuencas y Sierras (Basin and Range, E. Raisz, 1959) que dio sus rasgos morfológicos distintivos a esta provincia fisiográfica, caracterizada por la alternancia de serranías constituidas por bloques tectónicos levantados y bolsones en las depresiones estructurales. Los productos de erosión de las serranías se acumularon en abanicos aluviales que posteriormente rellenaron los bolsones, intercalándose con depósitos basálticos alcalinos.

4. GEOLOGÍA

Las rocas que afloran en el área de estudio son de origen ígneo y tienen una distribución estratigráfica que comprende del Cretácico al Reciente (figura 2).

Las rocas del Cretácico (aproximadamente 135 millones de años de antigüedad) se ubican de norte a sur en la porción oriental, principalmente son sedimentarias, e ígneas extrusivas, mientras que las rocas del Cenozoico (63 millones de años) son principalmente de origen ígneo extrusivo y en menor proporción de tipo sedimentario. El Cuaternario está representado por suelos y rocas ígneas extrusivas. Se presenta a continuación una breve descripción de las principales formaciones geológicas.

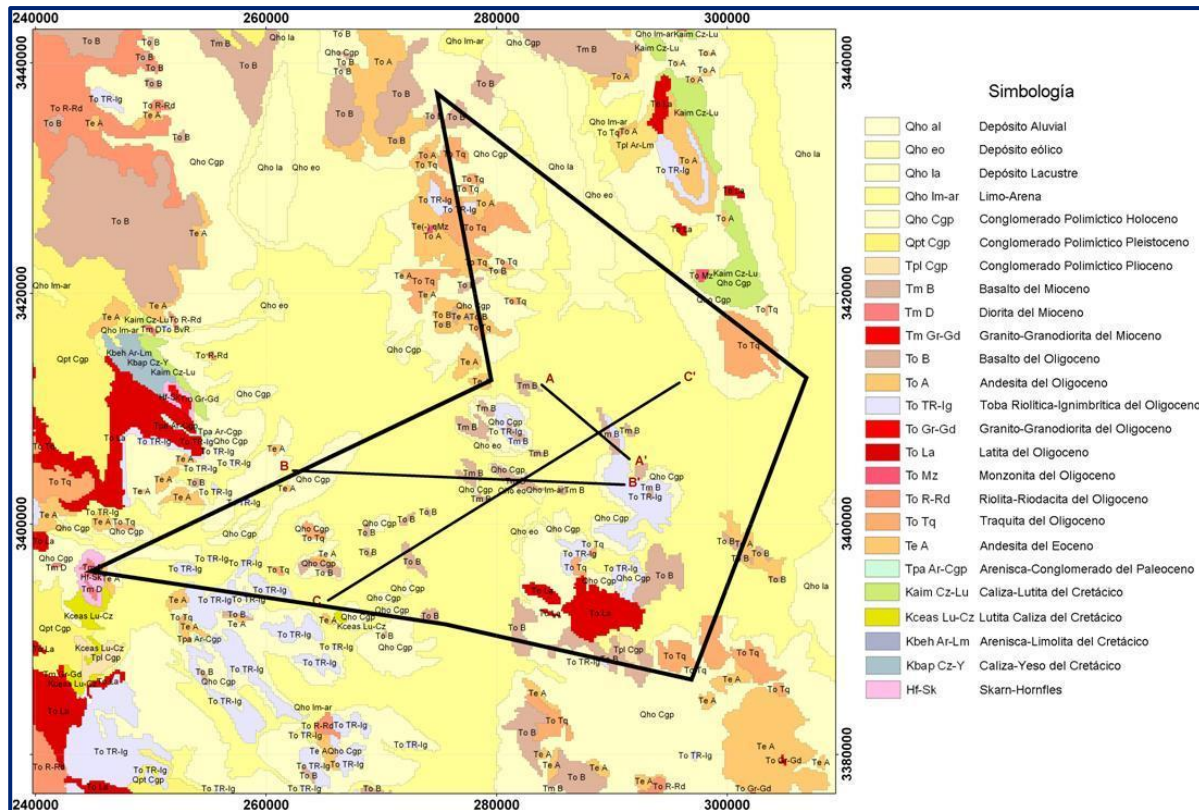


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Las rocas de mayor antigüedad corresponden al Grupo Chihuahua y afloran en las sierras de: Borregos, La Nariz y Banco de Lucero. Este Grupo está integrado por las formaciones: Benigno, constituida por calizas masivas; Lágrima, por calizas en estratos delgados con esporádicas intercalaciones arcillosas; Finlay, por calizas masivas; Benavides, por lutitas con intercalaciones de fangolita arcillosa, y Loma de plata, por calizas nodulares con intercalaciones arcillosas. Las formaciones Lágrima, Finlay y Benavides presentan cambios laterales en su litología y se agrupan en la unidad denominada Formación Ahumada.

A las rocas del Grupo Chihuahua sobreyacen en forma transicional, las formaciones del Cretácico Superior: Del Río, constituida por lutitas y areniscas con algunas intercalaciones de caliza arcillosa; Buda, calizas generalmente en estratos gruesos con esporádicas intercalaciones de margas; Ojinaga, lutitas y areniscas marinas con estratos subordinados de calizas y dolomías, y Picachos, compuesta por areniscas, limonitas y lutitas de origen continental. Sus principales afloramientos se observan en las sierras Escondida (o Agua Hedionda) y La Sanguijuela.

Sobre las rocas cretácicas, en las partes altas de las sierras, se observa un grupo de rocas ígneas extrusivas de composición riolítica y edad terciaria, las cuales forman una unidad casi horizontal que se prolonga a todo lo largo de la Sierra Madre Occidental. En la cuenca de Santa María estas rocas afloran en las sierras Borregos, La Nariz, Banco de Lucero, Gavilán, Sanguijuela y Escondida. En algunas de éstas, las rocas antes descritas están intrusionadas por rocas graníticas de edad terciaria, que forman diques o pequeños troncos de forma irregular.

En los flancos de las sierras afloran materiales granulares poco compactos: - gravas, arenas, limos y arcillas- de origen continental y edad terciaria, que cubren en forma discordante a las rocas preexistentes, formando cerros y pequeños lomeríos con pendiente suave hacia las llanuras. Estos materiales conforman el relleno de las profundas fosas formadas entre las sierras.

Cubriendo en forma discordante a las rocas cretácicas y a los depósitos terciarios, en las sierras afloran basaltos fracturados originados durante el tiempo comprendido del Plioceno al Reciente.

Materiales granulares de origen eólico, aluvial y coluvial -limos, arcillas, arenas y gravas poco cementados- afloran en la superficie de las llanuras y forman la parte superior del relleno. Su tamaño de grano disminuye de los bordes superiores hacia las partes bajas de la llanura, donde están interdigitados con sedimentos lacustres. Estos últimos son limo-arcillosos, forman capas delgadas laminares e interestratificadas y contienen abundante cantidad de sales depositadas por la evaporación del agua.

4.2 Geología Estructural

Para conocer las relaciones estratigráficas y estructurales de los diferentes materiales geológicos en la zona se realizaron tres secciones geológico-estructurales.

La sección geológica A-A' está orientada del NW al SE (figura 3), en ella se pueden observar los materiales de tipo detrítico en la parte superior, principalmente arenas y conglomerados. No obstante, estos depósitos tienen una variación granulométrica como consecuencia de los procesos de erosión y transporte, encontrando horizontes arcillosos y limosos hacia las partes centrales del valle. El espesor de estos depósitos es del orden de los 500 m.

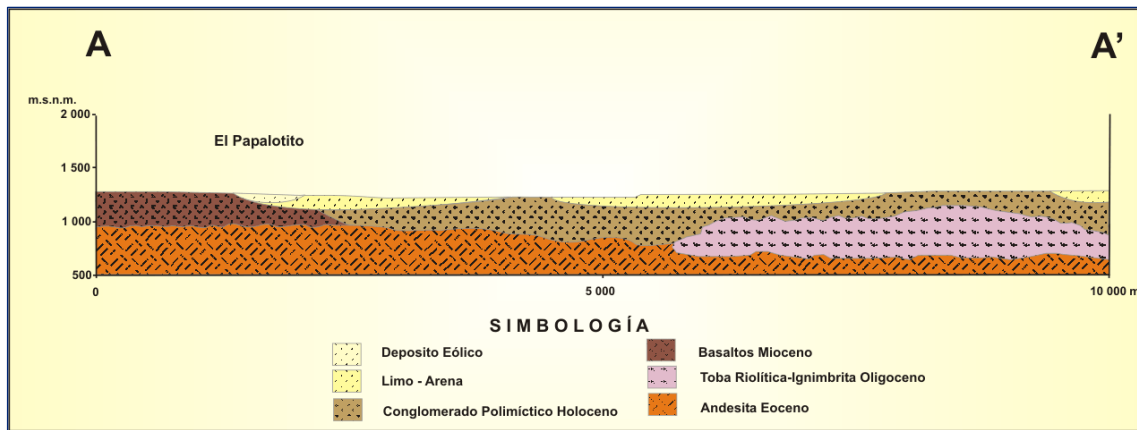


Figura 3. Sección geológica esquemática A-A'

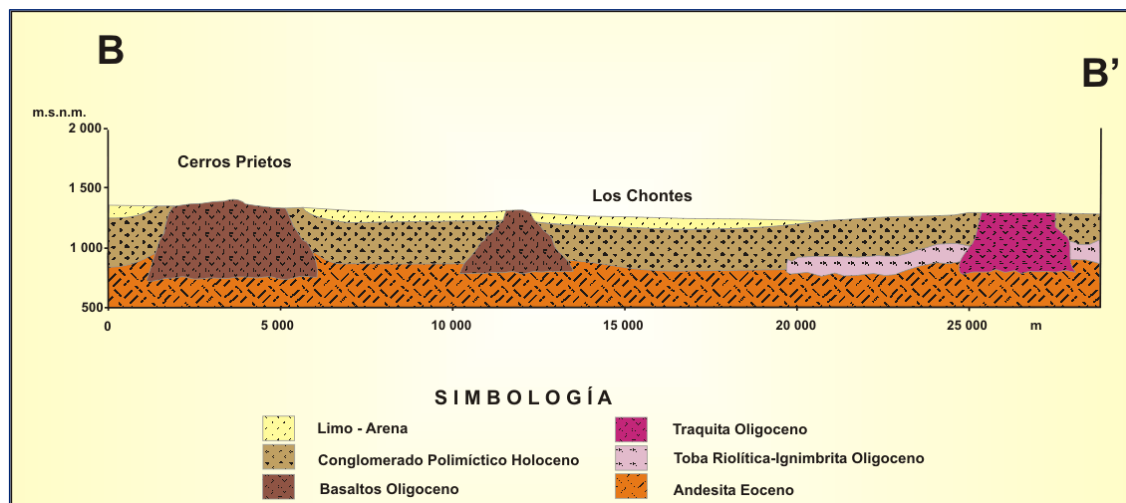


Figura 4. Sección geológica esquemática B-B'

Subyaciendo a los depósitos aluviales se encuentra una andesita, que dadas las condiciones de tectonismo, intemperismo y erosión también puede presentar fracturamiento que permita la circulación del agua subterránea.

En dirección SW-NE y prácticamente de manera longitudinal al valle se realizó la sección geológica C-C' (figura 5). En esta sección se pueden observar las diferentes unidades volcánicas que conforman el posible basamento hidrogeológico de la zona, el cual está conformado por rocas andesíticas que hacia su parte superior puede presentar fracturamiento. Le sobreyace una unidad de tobas riolíticas que puede presentar buena permeabilidad, lo cual la hace potencialmente importante para la transmisión y almacenamiento de agua. Finalmente, en la parte superior se tienen depósitos aluviales con espesores de hasta 500 m.

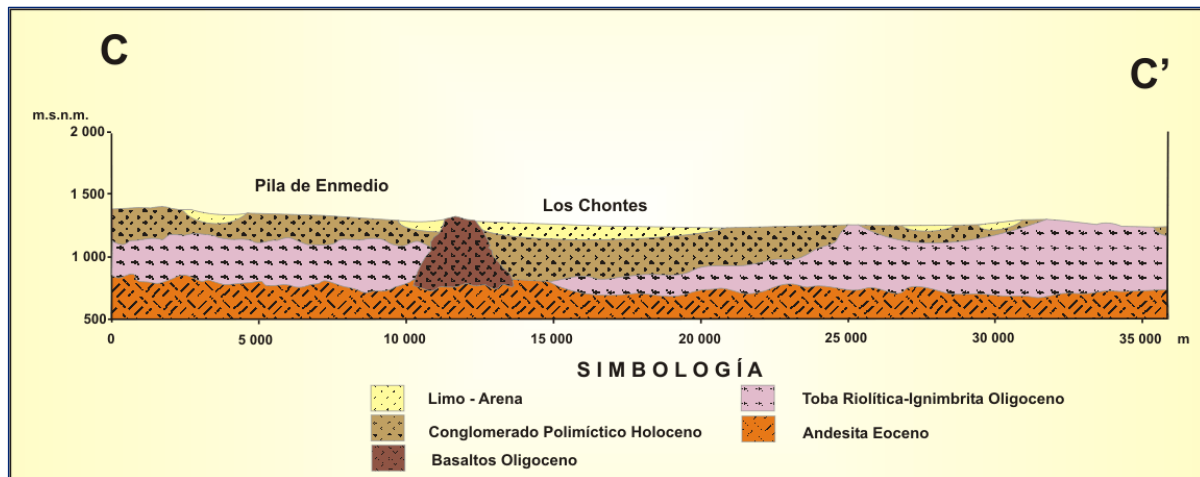


Figura 5. Sección geológica esquemática C-C'

4.3 Geología del subsuelo

En el estudio realizado por el IMTA en el 2006, se realizaron 65 sondeos geofísicos Transitorios Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (TEM), distribuidos en la superficie del acuífero, con una separación de 2 km entre ellos. Con esta información y la que corresponde a los cortes litológicos de pozos, fue posible definir las unidades hidrogeológicas en el subsuelo y elaborar secciones geológicas esquemáticas. Por lo que respecta a la geometría del acuífero se ha definido un espesor del orden de 500 m para la porción central del valle, apoyado tanto en la información de los sondeos geofísicos como de la geología de la zona (figura 6).

La información geológica directa en la porción central del valle es muy escasa, ya que los pozos que se han perforado recientemente no cuentan con el registro del corte litológico y su profundidad de exploración sólo alcanzó los 150 m.

Desde la porción central hasta el norte se observa que las líneas equipotenciales son más amplias, lo que indica un cambio en la geometría y/o propiedades hidráulicas del subsuelo. A este respecto, a partir de la información geofísica se puede inferir que existe un estrechamiento del espesor saturado hacia la porción norte del acuífero, en el que el flujo se presenta hasta una profundidad de 100 m.

Es probable también que exista continuidad del material volcánico de menor permeabilidad a ambos lados del río Santa María a la altura del rancho El Vado.

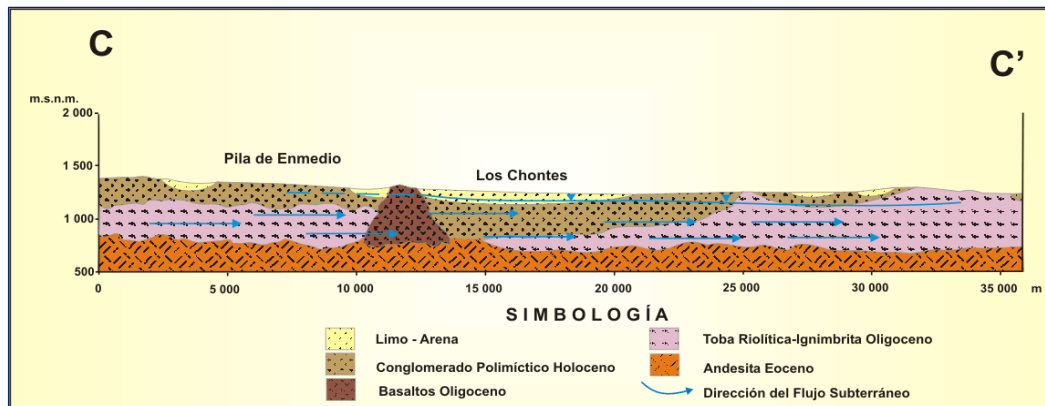


Figura 6. Modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero

Los materiales donde se encuentra alojado el acuífero corresponde a material aluvial y a material volcánico, principalmente tobas ignimbríticas y derrames basálticos.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero de Laguna de Santa María es de tipo libre, con profundidades del nivel estático que varían de 10 a 45 m. El flujo del agua subterránea es del SW hacia el NE de manera preferencial.

El acuífero está alojado en los materiales aluviales que rellenan el valle, cuyo espesor, de acuerdo con los sondeos geofísicos, alcanza los 500 mm en la porción central. Debajo de estos materiales se ubican basaltos y rocas andesíticas fracturadas, por lo que localmente el acuífero incrementa su espesor.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades de campo llevadas a cabo durante el estudio realizado en el 2006, se ejecutaron cinco pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De acuerdo con el modelo conceptual planteado y con el comportamiento piezométrico observado durante las pruebas de bombeo, se decidió interpretar las pruebas utilizando la metodología propuesta por Theis (1935) para un acuífero confinado, ya que los abatimientos registrados eran muy pequeños con respecto al espesor del acuífero. Solo se cuenta con información de pruebas de bombeo realizadas en los aprovechamientos localizados al sur del acuífero. Sin embargo, los valores obtenidos, pueden extrapolarse con sentido hidrogeológico a las áreas donde existen entradas y salidas horizontales del acuífero, dado que los materiales geológicos que los constituyen tienen el mismo origen y evolución.

La geología general del área es la misma y los procesos exógenos y endógenos que han controlado su depositación de los materiales granulares son comunes a toda esta región del estado.

De acuerdo con los resultados de su interpretación, se observa que los valores de conductividad hidráulica varían entre 8.7×10^{-8} y 1.2×10^{-3} m/s, que corresponden a materiales clasificados entre limo-loess y arena limpia, respectivamente (Freeze y Cherry, 1979). No existen actualmente pozos que exploten las rocas fracturadas. En la tabla 4 se reportan los valores obtenidos.

Tabla 4. Conductividad hidráulica en la porción sur del acuífero

Número de pozo	K(m/s)	Método
Lote 49	1.23E-4	Theis
	8.78E-4	Recuperación Theis
Lote 56	2.13E-6	Theis
	2.94E-6	Recuperación Theis
Lote 88	2.76E-4	Theis
	8.93E-4	Recuperación Theis
Lote 135	8.68E-8	Hvorlev
Lote Sur	8.34E-8	Theis
	1.16E-3	Recuperación Theis

5.3 Piezometría

No existe información piezométrica histórica por lo que la única que cubre de manera confiable es la recabada en el 2006. Con respecto al censo de aprovechamientos, de un total de 35 pozos encontrados en el acuífero de Santa María, solamente se tiene medición de la profundidad del nivel estático en 18 pozos, debido a que algunos aprovechamientos se encontraban en perforación.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2006 se puede observar que los valores varían de 5 m, registrados en las inmediaciones de la laguna de Santa María, hasta 70 m en los bordes norte y poniente del acuífero (figura 7). En la zona de mayor concentración de pozos, se registraron profundidades de 20 a 60 m; la mayor profundidad registrada fue de 78 m.

5.4.2 Elevación del nivel estático (2006)

20

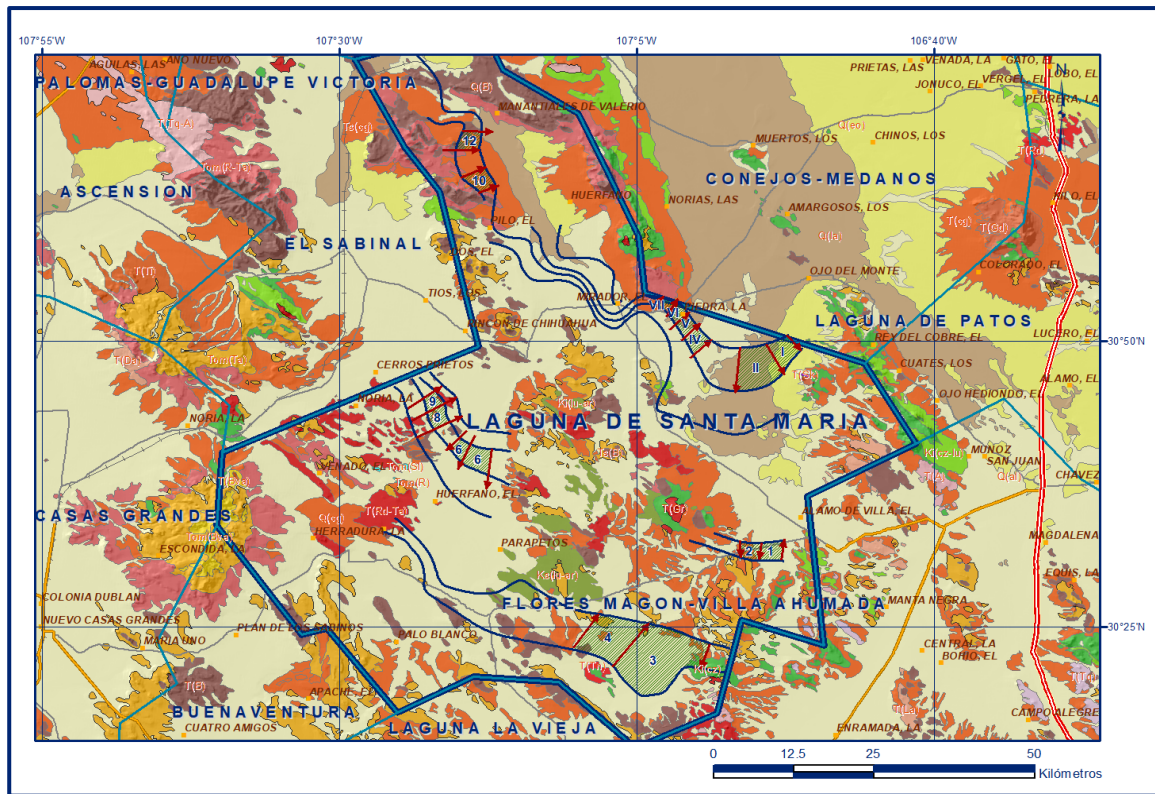


Figura 8. Elevación del nivel estático en msnm (2006)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas en se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos. Adicionalmente, el volumen de extracción actual es muy pequeño comparado con el valor de la recarga más conservadora que pudiera estimarse.

Por estas razones, 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 año 2006, se tomaron muestras de agua en 9 pozos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Los parámetros determinados en campo fueron: temperatura del agua subterránea, conductividad eléctrica (CE), salinidad, pH, potencial redox, oxígeno disuelto (OD) y alcalinidad. Las determinaciones incluyeron sólidos totales disueltos, iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, litio, zinc, hierro, flúor; elementos traza como cadmio, aluminio, arsénico, y análisis isotópicos.

El agua subterránea en el acuífero Laguna de Santa María manifiesta de manera general baja salinidad, mostrando un incremento en dirección hacia el sur, en el mismo sentido que la dirección preferencial del flujo subterráneo. (La dirección preferencial del flujo es hacia el noreste, en dirección del acuífero Conejos-Médanos). Los valores de concentración de sólidos totales disueltos varían de 400 a 600 mg/l, lo que las hace aptas para el consumo humano, de acuerdo con los límites máximos permisibles que establecen las normas oficiales mexicanas e internacionales (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 naturaleza volcánica de los materiales geológicos con los que interacciona el agua subterránea también se refleja en la concentración de otros elementos mayores que se derivan de las rocas volcánicas como el Na (promedio de 130 mg/l y menores y traza como el F (3.5 mg/l) y Li (73 ug/l) que señalan que la interacción del agua subterránea con los minerales de las rocas volcánicas de composición predominantemente félsica y probablemente con su matriz vítrea, constituye el principal origen de los solutos identificados.

Las concentraciones de NO_3 , considerado un indicador de contaminación difusa asociada con las actividades agrícolas, son en general bajas, el promedio calculado de 14 mg/l aunado a las condiciones aeróbicas y oxidantes que se identificaron en el subsuelo, parecen reflejar el valor de fondo geoquímico natural (línea base) para los compuestos de nitrógeno en el agua subterránea. Al oriente de la zona de Santa María y al noreste de la región del Palmar del Berrendo se identifica la zona topográficamente más baja denominada Laguna Ojo del Diablo en donde se reportan zonas con manantiales algunos de ellos termales. Es probable que esta región constituya una zona de descarga de flujo regional en la que el efecto de evaporación ha favorecido el incremento de las concentraciones de sales en el agua subterránea.

Al norte de Santa María se encuentra otra zona topográficamente baja, denominada Laguna Santa María, que representa su zona de descarga natural. Con relación a las familias de agua subterránea, el diagrama de Piper señala que en el 78% de las muestras de agua analizadas predomina la familia $\text{HCO}_3\text{-Na}$, lo que confirma la interacción del agua con las rocas volcánicas.

De acuerdo con las normas oficiales mexicanas, los valores de las concentraciones de F y Fe, superan los límites máximos permisibles en algunas muestras de agua. Otros elementos como Na, As y Al son rebasados de manera menos común.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados del censo realizado durante el 2006, existen en la región un total de 35 pozos cuyo volumen de extracción estimado es del orden de los **217,152 metros cúbicos por año ($\text{m}^3/\text{año}$)**. Sin embargo, durante los trabajos de campo se identificó un número importante de pozos en etapa de perforación, por lo que el volumen de extracción será muy superior cuando entren en operación.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

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

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 de un acuífero:

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

Para este caso particular, debido a que la lámina de precipitación media anual es inferior a los 350 mm, definida como el límite para la aplicación de los métodos empíricos de Turc y Coutagne para calcular la evapotranspiración real, se optó por considerar a esta variable la incógnita en la ecuación de balance.

De esta manera la ecuación de balance propuesta es la siguiente

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

Donde:

Rv: Recarga vertical por lluvia (incluye a las infiltraciones que se producen a lo largo de los escurrimientos)

Eh: Entradas subterráneas horizontales

ETR: Evapotranspiración real

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

$\Delta V(S)$: Cambio en el volumen de almacenamiento

De esta manera:

$$ETR = R_v + E_h - B - SH \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1 Entradas

La recarga total (R) al acuífero Laguna de Santa María está integrada básicamente por las entradas subterráneas (Eh) y la recarga vertical por lluvia (Rv).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Para el caso del acuífero Laguna de Santa María, se tiene un área de infiltración directa de 2'841,936 m², para fines de este cálculo y debido a la gran variación de la precipitación, se tomó el valor de precipitación media extremo de 0.21 (m/año) y un coeficiente de infiltración de 0.02, la infiltración directa por lluvia es de:

$$R_v = 2,841,936.123 \text{ m}^2 (0.21 \text{ m/año}) (0.02)$$

$$R_v = 11,936,131 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$R_v = 11.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Recarga natural

Esta recarga está constituida por recarga por flujo horizontal subterráneo que se presenta a través de las zonas de pie de monte y por la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle y a lo largo de los escurrimientos superficiales.

7.1.2 Entradas subterráneas horizontales (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas altas del área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través de los piedemonte, para posteriormente llegar a recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos.

Para su cálculo se utilizó la configuración de las curvas de igual elevación del nivel estático correspondiente al 2005, mostrada en la figura 8. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 5 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda y el total de 33.3 hm³/año.

$$Q = B * i * T$$

Donde

B: Ancho (m) del canal de flujo

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

T: Transmisividad (m²/s) en el canal de flujo = $k * b$

Tabla 5. Entradas subterráneas por flujo horizontal

No. de canal de flujo	h ₂ - h ₁ (m)	k (m/d)	Esp. Med. Sed. (m)	Prof. N. E. (m)	b (m)	Q (m ³ /d)	Q (m ³ /año)
1	10	5.00	200	24	176	8800	3,212,000
2	10	5.00	200	20	180	9000	3,285,000
3	10	7.00	200	55	145	10150	3,704,750
4	10	7.00	200	30	170	11900	4,343,500
5	10	5.82	200	15	185	10767	3,929,955
6	10	5.00	200	30	170	8500	3,102,500
7	10	5.00	200	38	162	8100	2,956,500
8	10	5.00	200	43	157	7850	2,865,250
9	10	5.00	200	43	157	7850	2,865,250
10	5	3.00	175	50	125	1875	684,375
11	5	4.00	175	60	115	2300	839,500
12	5	7.00	175	60	115	4025	1,469,125
SUMA TOTAL							33,257,705

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el acuífero Conejos-Médanos (Sh) y la evapotranspiración (ETR). No existen manantiales ni descarga de flujo base.

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Debido a que este parámetro depende de diversos factores climáticos y del suelo, no siempre disponibles o fáciles de conocer o medir, y a que la lámina de precipitación media anual impide la aplicación de métodos empíricos para su estimación, su valor será despejado de la ecuación de balance propuesta.

7.2.2 Extracción por bombeo (B)

La extracción de agua subterránea en el área ha variado a través del tiempo y de acuerdo con la estimación más reciente, dicha extracción efectuada por bombeo es del orden de 0.2 hm³/año, según datos del REPDA con fecha de corte 31 de mayo de 2005.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas que ocurren como descarga hacia el acuífero Conejos-Médanos fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir también de la configuración de elevación del NE presentado en la figura 8. El Valor estimado es de **14.6 hm³ anuales**, tal como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Salidas subterráneas por flujo horizontal

No. de canal de flujo	h2 - h1 (m)	k (m/d)	Esp. Med. Sed. (m)	Prof. N. E. (m)	b (m)	Q (m3/d)	Q (m3/año)
I	5	5.00	200	5	195	4875	1,779,375
II	5	5.00	200	5	195	4875	1,779,375
III	5	3.00	200	10	190	2850	1,040,250
IV	5	3.00	200	8	192	2880	1,051,200
V	5	3.00	200	3	197	2955	1,078,575
VI	5	11.00	200	3	197	10835	3,954,775
VII	5	11.00	200	5	195	10725	3,914,625
SUMA TOTAL							14,598,175

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV_S).

Como se mencionó en el apartado de evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los escasos registros existentes se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto, para fines del balance $\Delta V(S) = 0$

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la evapotranspiración, mediante la expresión (2):

$$ETR = E_h + R_v - S_h - B - \Delta V(S) \quad \text{----- (2)}$$

$$ETR = 33.3 + 11.9 - 14.6 - 0.2 - 0.0$$

$$ETR = 30.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = R - DNCOM - VCAS \quad \text{---- (3)}$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica.

R = Recarga total media anual.

DNCOM = Descarga natural comprometida.

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA.

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 **45.2 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 Laguna de Santa María, la descarga natural del acuífero se pierde por evapotranspiración en la Laguna de Santa María y en los salitrales adyacentes; y las salidas subterráneas son hacia la zona de evaporación localizada en la zona El Barreal dentro del acuífero Conejos-Médanos.

Debido a la intensa evaporación y al depósito de minerales evaporíticos que ocurre en estas zonas, se produce un incremento en la concentración de sales en el agua subterránea hasta de 9000 partes por millón de sólidos totales disueltos, que las convierte en inadecuadas para su utilización.

En tal situación, es conveniente interceptar el agua mediante pozos antes de que llegue a las áreas donde incrementa su salinidad sustancialmente y deja de ser aprovechable. Por ello, la mayor parte de la descarga natural resulta disponible para su uso. Únicamente se considera como descarga natural comprometida un volumen de agua de **3.2 hm³ anuales**, correspondiente al flujo que conviene mantener hacia las áreas lagunares, con el fin de prevenir que el bombeo invierta el flujo de agua salina hacia los pozos.

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 **361,492,601 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión (3) 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 concesionado e inscrito en el REPDa.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 45.2 - 3.2 - 361.492601 \\ \text{DMA} &= -319.492601 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **319,492,601 m³ anuales**.

Cabe hacer la aclaración de que el cálculo de la recarga media anual que recibe el acuífero, y por lo tanto de la disponibilidad, se refiere a la porción del acuífero granular en la que existen aprovechamientos del agua subterránea e información hidrogeológica para su evaluación. No es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación, ni en las rocas fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo en pozos cercanos a los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección de Aguas Subterráneas 1986. "Estudios de exploración geofísica en la zona El Sabinal, Chihuahua", Realizado por la empresa Geofísica de Exploraciones GUYSA, S. A. Contrato ACSH-86-05-E.

Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. "Conservación del Recurso Agua - Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales".

SAGARPA, IMTA, 2006. "Estudio hidrogeológico regional de los acuíferos del noroeste del Estado de Chihuahua (Acuífero Laguna de Santa María).