



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO EL SABINAL (0825), ESTADO DE
CHIHUAHUA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincias fisiográficas.....	6
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía.....	11
4.2 Geología estructural.....	22
4.3 Geología del subsuelo.....	23
5. HIDROGEOLOGÍA.....	24
5.1 Tipo de acuífero.....	24
5.2 Parámetros hidráulicos.....	24
5.3 Piezometría.....	25
5.4 Comportamiento hidráulico.....	25
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	25
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	27
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	28
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	29
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	29
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	29
7.1 Entradas.....	30
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	30
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	31
7.1.3 Retornos de riego (Rr).....	32
7.2 Salidas.....	32
7.2.1 Bombeo (B).....	33
7.2.2 Evapotranspiración (ETR).....	33
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	33
8. DISPONIBILIDAD	35
8.1 Recarga total media anual (R).....	35
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	35
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	36
8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DMA).....	36
9. BIBLIOGRAFÍA	37

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

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

1.1 Localización

El acuífero El Sabinal, definido con la clave 0825 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noreste del estado de Chihuahua, entre los paralelos 30°19' y 31°39' de latitud Norte y los meridianos 107°16' a 107°45' de longitud Oeste, abarca una superficie aproximada de 1,822 km² (Figura 1.)

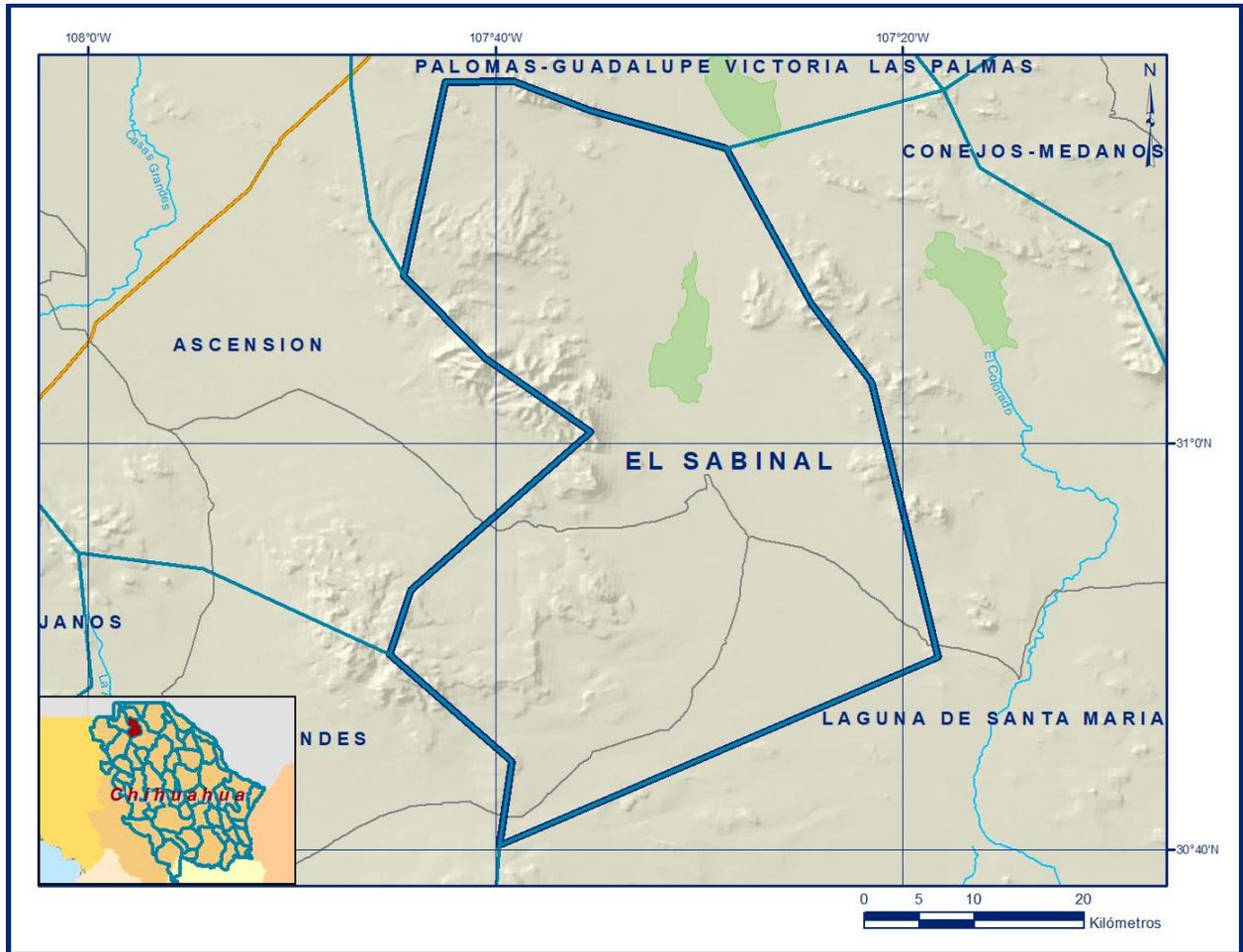


Figura 1. Localización del acuífero

Limita al norte con el acuífero Palomas Guadalupe Victoria, al sur y este con el acuífero Laguna de Santa María y al oeste con los acuíferos Ascensión y Casas Grandes, todos ellos pertenecientes al estado de Chihuahua. Geopolíticamente la mayor parte de su territorio se encuentra ubicado en el municipio de Ascensión y una pequeña porción al sur del acuífero se ubica en los municipios de Nuevo Casas Grandes y Buenaventura.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0825 EL SABINAL						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	107	45	12.0	30	49	36.4
2	107	44	9.3	30	52	47.5
3	107	35	21.3	31	0	36.2
4	107	40	34.4	31	4	14.2
5	107	44	32.8	31	8	18.6
6	107	42	28.0	31	17	48.0
7	107	39	7.9	31	17	51.2
8	107	35	23.8	31	16	24.4
9	107	28	40.1	31	14	32.3
10	107	24	30.4	31	6	55.0
11	107	21	33.9	31	3	11
12	107	18	18.1	30	49	29.1
13	107	39	48.3	30	40	12.4
14	107	39	12.9	30	44	21.5
1	107	45	12.0	30	49	36.4

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero El Sabinal pertenece al Organismo de Cuenca VI “Río Bravo” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Chihuahua. Prácticamente la totalidad de su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda.

El primero rige en la mayor parte del acuífero y es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en una 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 (DOF), el 25 de abril de 1979. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

El segundo rige en una pequeña porción al sur del acuífero y es el *“Decreto por el 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 de 16 junio de 1954, publicado en el “Diario oficial” el 6 de julio del mismo año en los Municipios de Casas Grandes y Nuevo Casas Grandes, Chih., 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”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF), el 27 de marzo de 1981.

Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Una pequeña porción al sur del acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de aguas subterráneas.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El uso principal del agua subterránea es el agrícola.

En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo diversos estudios geohidrológicos de evaluación. Entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

ESTUDIOS DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN LA ZONA EL SABINAL, CHIHUAHUA. SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS. DIRECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. Elaborado por Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. de C.V., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en 1986. El objetivo general fue determinar el espesor y distribución de los materiales granulares y de las rocas volcánicas que existan en el subsuelo del área además de conocer la profundidad del contacto entre las rocas ígneas y las rocas sedimentarias cretácicas.

CENSO DE APROVECHAMIENTOS Y MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS EL SABINAL, LAGUNA TRES CASTILLOS, LOS MOSCOS, JOSEFA ORTÍZ DE DOMÍNGUEZ, LAS PALMAS, EL CUARENTA, LOS LAMENTOS, LAGUNA DE HORMIGAS Y ALDAMA-EL CUERVO, ESTADO DE CHIHUAHUA. Elaborado por Estudios y Proyectos en Agua Subterránea S.A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Río Bravo, Dirección Local Chihuahua, en 2005.

El objetivo fue la actualización del censo de pozos lo cual permitirá conocer el número y localización de los aprovechamientos hidráulicos, así como el uso al que se destina el agua, y con ello hacer una estimación del volumen total de extracción de agua subterránea por los distintos usuarios además de actualizar el conocimiento de la posición de los niveles del agua subterránea en pozos seleccionados para la medición de los nueve acuíferos seleccionados y definir las evoluciones, en los acuíferos que exista información histórica, que presentan los niveles del agua, como resultado de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que están sujetos los acuíferos.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS: LAGUNA DE PALOMAS, LLANO DE GIGANTES, LAS PAMPAS, RANCHO EL ASTILLERO, LAGUNA DE JACO, RANCHO LA GLORIA, RANCHO DENTON, LAGUNA LOS ALAZANES, LAGUNA DEL REY, VALLE DEL PESO, FLORES MAGON-VILLA AHUMADA, EL SABINAL Y LOS JUNCOS, ESTADO DE CHIHUAHUA. Elaborado por la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. El objetivo general de este estudio fue el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea; así como conocer el número y distribución de las captaciones de agua subterránea existentes en la zona. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, en algunos de ellos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincias fisiográficas

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1964), la superficie cubierta por el acuífero se encuentra en su totalidad en la Provincia Fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte, esta provincia árida y semiárida se extiende desde el suroeste de los Estados Unidos de América hasta cerca de Nazas de Durango y la Laguna de Mayrán en Coahuila, se orienta más o menos noroeste-sureste y abarca parte de los estados de Durango, Sonora, Chihuahua y Coahuila.

El origen de la provincia está relacionado con el plegamiento de las secuencias marinas del Mesozoico que se desarrollaron sobre un basamento paleozoico y precámbrico, así como por el relleno de fosas tectónicas con sedimentos continentales y algunos derrames lávicos, esto dio lugar a la formación de cuencas endorreicas. Dominan rocas volcánicas ácidas en el oeste, calizas en el este y norte, en la región la morfología es de bolsones, esto es, cuencas con drenaje interno donde también se alternan sierras y valles.

Se ubica a su vez en la subprovincia de Llanuras y Médanos del Norte la cual colinda en el noroeste con la Sierra Madre Occidental, hasta unos cuantos kilómetros antes del inicio del Río Bravo como límite internacional, se caracteriza por llanuras, las amplias bajadas, las sierras escarpadas pequeñas y los campos de dunas. Los aluviones recientes y algunos antiguos cubren gran parte de las bajadas y de las llanuras, aunque hay importantes afloramientos dispersos de rocas volcánicas ácidas en las sierras y lomeríos, y en menor cantidad, rocas basálticas en el centro de la subprovincia.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), dentro del territorio que cubre el acuífero el clima que predomina es el “Muy seco”, del subtipo muy seco templado y en muy pequeñas proporciones el tipo “Seco”, del subtipo seco templado.

El grupo de los climas secos tienen como características principales que la evaporación excede a la precipitación, son los más secos del grupo, su baja humedad depende principalmente de la escasa precipitación y la temperatura, pero también influye la poca persistencia y lo torrencial de las lluvias que se presentan, la naturaleza del suelo y la cubierta vegetal; están clasificados como muy extremos por su oscilación térmica media anual mayor de 14 grados centígrados.

El tipo seco son intermedios entre en cuanto a humedad respecto a los muy secos y lo semisecos y están considerados como de transición entre estos dos, se distribuyen en forma de una franja que atraviesa la franja que cruza el Estado en sentido noroeste-sureste sobre los terrenos colindantes de la provincia fisiográfica de Sierras y Llanuras del Norte con la Sierra Madre Occidental, pero también se producen en las sierras dispersas en la primera provincia citada.

Para la determinación de las variables climatológicas se utilizó la información de 3 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: “Bismark”, “Ascensión” y “Nuevo Casas Grandes”, cuyo registro comprende un periodo de análisis de 2003 a 2008, 1957 a 2003 y 1957 a 2008, respectivamente. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **316.5 mm y 19.1 °C** respectivamente.

Con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **2,459.5 mm anuales**, según datos de evaporímetro de la estación climatológica “Bismark”, con periodo de análisis de 2003 a 2008.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 10 Cuencas Cerradas del Norte, cuenca Río Santa María, la cual forma una franja que se extiende desde la porción centro-oeste hacia el norte de la entidad, en una superficie de 8.7 %; sus límites son: al suroeste con la cuenca Río Yaqui (B) de la RH-9; al noreste con la cuenca Río Bravo-Cd. Juárez (I) de la RH-24; al norte con los Estados Unidos de América; al oeste-noroeste con la cuenca Río Casas Grandes (D); al este-noreste con la cuenca Río del Carmen (B) y al sureste con la porción noroeste de la cuenca Laguna Bustillos y de los Mexicanos (E), estas tres últimas pertenecen a la RH-34.

Las corrientes que conforman esta cuenca se caracterizan por ser de corta duración y recorrido, con tendencia a almacenarse en una serie de lagunas distribuidas en toda la cuenca, las que forman una red de avenamiento de tipo radial centrípeto, subparalelo, dendrítico desintegrado y anastomosado. No existen estaciones hidrométricas para la estimación del volumen de escurrimiento, ni infraestructura para el almacenamiento de las escasas corrientes superficiales.

3.4 Geomorfología

El área del acuífero se caracteriza por presentar un relieve originado inicialmente por procesos endógenos, con dominancia de los tectónicos, pero que se encuentran modelado por procesos exógenos destructivo-acumulativos fluviales, eólicos y lacustres. El relieve corresponde a montañas plegadas de orientación al noroeste, localmente distorsionadas por emplazamientos de pequeños cuerpos intrusivos.

Sobrepuesto a este relieve se expone un relieve de montañas y mesas piroclásticas y lávico piroclásticas sumamente disectadas.

El conjunto de ambos relieves se presenta en bloques afallados en dos direcciones regionales, al noroeste y al noreste, provocando frecuentes escarpes. El intenso modelado del relieve es evidentemente notable con la actividad erosiva acumulativa como responsable de la conformación actual del paisaje, a través de la notable disección observada en las montañas y elevaciones, de los persistentes y amplios abanicos aluviales que aureolan la mayoría de ellos, así como por las extensas planicies aluviales, en parte de las cuales se desarrollan depósitos lacustres y eólicos. De acuerdo al ciclo geomorfológico de Davis, el área se encuentra en una etapa de madurez avanzada.

4. GEOLOGÍA

El lapso de tiempo geológico representado por las unidades presentes en el área de estudio y en zonas circundantes comprende desde la parte superior del Cretácico Inferior hasta el Reciente (Figura 2).

Durante el cretácico inferior se depositaron las rocas marinas inicialmente detrítico carbonatadas y posteriormente por secuencias calcáreas con interrupciones calcáreo arcillosas; lo cual sugiere una avanzada transgresión marina con pequeñas fluctuaciones, la que regionalmente cubre la paleo isla de Aldama y hasta los terrenos internos de Sonora y Sinaloa (Rangin y Córdoba, 1976). El cretácico superior tiene su registro en rocas clásticas gruesas y detríticas carbonatadas que acusan la regresión definitiva de las aguas marinas en esta región.

El Terciario está representado parcialmente por pequeños cuerpos intrusivos silíceos, emplazados aparentemente sólo en rocas cretácicas. La mayor parte de las rocas con registro en este periodo dan testimonio de una intensa actividad volcánica sucedida en una secuencia de emisiones piroclásticas silíceas, seguidas por derrames basálticos e intermedios alcalinos y finalmente por emisiones de tobas, brechas y domos riolíticos.

Esta actividad está datada por métodos de K-Ar efectuados a rocas de la sierra del Gallego, de 45 a 36 Ma. (Keller et. Al., 1982) es decir, eoceno oligoceno. El Lapso mencionado corresponde al hiatus consignado en la sierra Madre Occidental entre las secuencias volcánicas calcoalcalinas, inferior, de composición intermedia y superior silícea (McDowell y Clabaught, 1979) así como que, las rocas volcánicas están dentro de la provincia de transición, propuesta por los autores citados, entre la calcoalcalina de la sierra Madre Occidental y la alcalina de trans-Pecos Texas.

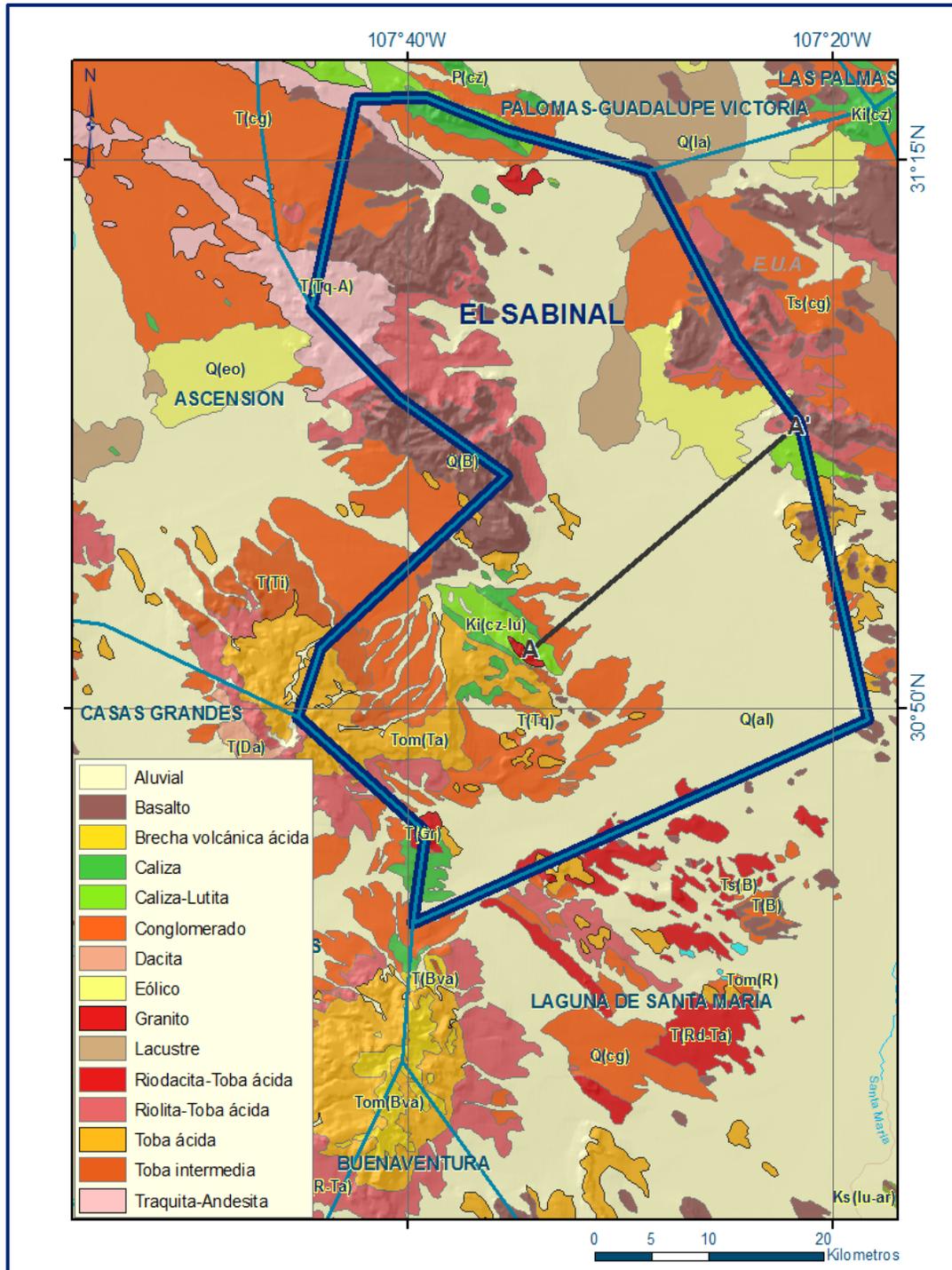


Figura 2. Geología general del acuífero

Para el terciario se cuenta con la presencia de depósitos clásticos continentales de abanicos aluviales, posteriores a la actividad volcánica, los cuales se continúan formando o reconstruyendo hasta el presente.

En el cuaternario continuó la depositación de material proveniente de las partes altas que fueron rellenando las cuencas tectónicas desarrollando extensos depósitos aluviales, se tienen restringidas coladas basálticas; se dan los depósitos lacustres producidos por el sistema de cuencas endorreicas y depósitos eólicos.

4.1 Estratigrafía

El lapso de tiempo geológico representado por las unidades cartografiadas, comprende la parte superior del Cretácico Inferior hasta el Reciente. La columna estratigráfica presente en la zona se describe a continuación, de la unidad más antigua a la más reciente:

CRETÁCICO INFERIOR

Lutita-Arenisca Ki(lu-ar)

Secuencia de lutitas calcáreas, areniscas y delgadas capas de caliza arcillosa, hacia su parte inferior presenta yeso que se explota comercialmente. Esta litología sugiere un depósito en aguas marinas someras inicialmente de salmueras. Los yesos se encuentran recristalizados por efecto de un cuerpo intrusivo que también es causante de mineralización hidrotermal, con sulfuros de cobre y hierro en esta unidad.

Esta secuencia está infrayaciendo a la unidad de calizas del cretácico inferior y se presenta en gran medida cubierta discordantemente por conglomerados terciarios, los cuales cubren por completo a los yesos. Por sus características litológicas y posición estratigráfica, esta unidad es equivalente a la formación Cuchillo (Burrows, 1910), que pertenece al Aptiano. Morfológicamente constituye parte de una ladera de sierra con perfil semicóncavo.

Caliza Ki(Cz)

Dentro de esta unidad se cartografiaron dos paquetes calcáreos separados por la unidad Ki (Cz-Lu). El paquete inferior que sobreyace a la unidad de lutitas y areniscas del cretácico inferior, consta de calizas de estratificación media a gruesa que alternan con algunas capas de caliza arcillosa, como se observa en las partes bajas de las sierras ubicadas al oeste de Benito Juárez y al noroeste de Villa Ahumada; la caliza es de textura micrítica y biomicrítica con escasos *miliolidos*, *orbitolina sp* y fragmentos de espículas de equinodermos, en ocasiones se presentan bancos de pelecípodos y escasos nódulos de pedernal café, indicando con ello un ambiente marino de plataforma de aguas relativamente someras de facies lagunar y postarrecifal.

Por sus características este paquete puede considerarse equivalente a la formación Benigno (Haengi, 1966) situada dentro del Albiano Inferior.

El paquete superior infrayacente a las lutitas y areniscas del cretácico superior y sobreyacente a la unidad Ki (Cz-Lu) presenta comúnmente en su base calizas masivas formadoras de riscos. Como en las partes altas de las mencionadas sierras, y estratos gruesos y medianos de caliza alternante con caliza arcillosa como se presenta en la sierra de Ranchería al Noroeste de la zona de estudio.

Las calizas masivas, de textura biointramicrítica, son biohermas de gasterópodos no identificados, rudistas y otros pelecípodos de los géneros *toucasia*, *caprinuloidea*, *exogyra*, *ostrea* y *griphaea*; en otros sitios las calizas son biomicríticas y bioespatíticas.

Las características de este paquete indican un ambiente marino de arrecifal a borde de plataforma que puede correlacionarse con las formaciones Finlay (Brunson, 1954) y Benevides (Ambsburg, 1957), localizadas dentro del Albiano medio.

Caliza-Yeso Ki (Cz-Y)

Unidad constituida principalmente por calizas biógenas, por yeso y algunos horizontes de lutita depositada en un ambiente que varía de nerítico externo a epinerítico y lacustre. Las calizas varían en su coloración de gris claro a gris oscuro, y están dispuestas en estratos que varían de delgados a medianos, con horizontes delgados fosilíferos. Generalmente se observan estratos gruesos de yeso sacaroide color gris claro, y de color amarillo claro al intemperismo, presenta cavidades por disolución y alterna con estratos medianos de areniscas de grano fino.

Esta unidad corresponde a la Formación Cuchillo (Burrows 1910), asignada al Aptiano-Albiano Inferior. Es correlacionable con las formaciones Cupido, La Peña y Aurora del estado de Coahuila y equivalente a las formaciones Hamlet Cow Creek y Hensel del centro de Texas.

El contacto inferior de la Formación Cuchillo es transicional con la Formación de las Vigas y se marca en el primer estrato de caliza biógena correspondiente a la base de la Formación Cuchillo. El contacto superior es nítido y concordante, definido por la base de la caliza masiva de bancos arrecifales de la Formación Benigno. Esta unidad no aflora.

Caliza Lutita Ki (Cz-Lu)

Unidad que consiste de una alternancia de lutitas calcáreas, margas y calizas en estratos delgados y escasamente gruesos como se pueden observar en la sierra La Mojina al sur; las margas y calizas de estratos delgados son de texturas micríticas y biomicríticas, lo cual indica un ambiente marino de borde de plataforma con predominante aporte de terrígenos y restringidos desarrollos arrecifales. Por lo general estas capas se encuentran separando la unidad de calizas del cretácico inferior en dos paquetes, mostrando afloramientos angostos, dado su delgado espesor, el cual se ve incrementado en algunos sitios aparentemente por varios pliegues extendidos.

La unidad equivale a la Formación Lágrima (Córdoba, 1968), situada en la parte central del Albiano medio. Su expresión morfológica es en laderas cóncavas de puertos de erosión suave y en lomeríos bajos de poca pendiente en los que destacan pequeños crestones de las capas calcáreas más gruesas.

CRETÁCICO SUPERIOR

Lutita Arenisca Ks (Lu-Ar)

Unidad que incluye calcarenitas gris rosado, limolitas y lutitas laminares calcáreas, areniscas rojizas calcáreas y escasas margas y calizas blanquecinas, los estratos son delgados y medianos con las litologías mencionadas. Esta unidad sobreyace a las calizas del cretácico inferior y se presenta parcial y discordantemente por tobas ácidas y basaltos terciario, y por conglomerados cuaternarios y terciarios. Litoestratigráficamente es correlacionable con el grupo Ojinaga, asignada del Albiano Superior al Cenomaniano, o bien con las formaciones Del Río y Buda de posiciones stratigráficas similares. Morfológicamente la unidad se expresa en lomas y cerros redondeados de poca altura y pendientes suaves.

Caliza Lutita Ks (cz-lu)

La descripción de esta unidad comprende a dos unidades que presentan características litológicas semejantes: Las Formaciones Del Río y Ojinaga que se encuentran separadas entre sí por una unidad constituida por calizas arrecifales: La formación Buda. Esta unidad no aflora.

La Formación Del Río está constituida por una alternancia de caliza y lutitas que se depositaron en un ambiente nerítico interno a medio. La caliza es del tipo mudstone arcillosa de color pardo, aparece en estratos delgados; está intercalada con calcilutitas y lutitas laminares y con esporádicos horizontes de yeso.

La formación descansa concordantemente en los últimos estratos de caliza masiva de la formación Loma de Plata y subyace concordantemente a los estratos de caliza compacta de la Formación Buda. Su edad es Albiano Superior-Cenomaniano Inferior, es correlacionable con la parte media de la Formación Cuesta del Cura del Estado de Coahuila.

La Formación Ojinaga está constituida por calizas arcillosas, lutitas y areniscas que se depositaron en un ambiente nerítico. La caliza es del tipo wakestone, de color gris claro en estratos medianos, aparece intercalada con lutitas calcáreas laminares de color gris en estratos que van de medianos a gruesos.

El contacto inferior de esta formación es concordante y se define con la presencia de caliza compacta perteneciente a la formación Buda. El contacto superior es concordante también y se marca con la aparición de las primeras capas de areniscas correspondientes a la formación San Carlos, su edad Cenomaniano Superior-Turoniano, y es correlacionable con la formación Agua Nueva del estado de Coahuila y equivale al grupo Eagle Ford del centro de Texas. Forma valles erosionales y lomeríos de pendientes suaves.

Caliza Ks (cz)

Unidad constituida por capas de caliza que fueron depositadas en un ambiente nerítico interno a medio.

La caliza es de tipo mudstone y grainstone de color gris claro, en estratos que van de medianos a gruesos, esta unidad corresponde a la formación Buda y sus contactos inferior y superior son nítidos y concordantes con la Formación Del Río y la Formación Ojinaga respectivamente, definidos claramente por los estratos de caliza compacta de la Formación Buda. Su edad Cenomaniano inferior está determinada por la *amonita budaicera sp.* y se correlaciona con la parte superior de la Formación Cuesta del Cura del estado de Coahuila. Esta unidad no aflora.

Conglomerado Ks (cg)

Ortoconglomerado petromictico de clastos de caliza sostenidos entre sí, muy bien consolidado y compactado con cementante calcáreo; los fragmentos están redondeados y subredondeados, por lo general bien clasificados uni y bimodales con diámetros promedio de 4 a 10 cm y/o de 40 a 30 cm.

La caliza que constituye los clastos es de textura mudstone y packstone que incluye fragmentos de pelecípodos y nódulos de pedernal café y proviene de las unidades de caliza y caliza y lutita del cretácico inferior; este conglomerado presenta estratificación gruesa bien definida que se observa claramente plegada.

Localmente contiene mineralización hidrotermal de fluorita en pequeños cristales cúbicos, asociada al afloramiento de un pequeño dique no cartografiable de composición diorítica. Se le considera del Cretácico superior, dada sus mencionadas características que sugieren un depósito en un ambiente litoral y la evidente existencia de un periodo compresivo causante del plegamiento; infrayace discordantemente a rocas volcánicas y conglomerados del terciario. Morfológicamente constituye una elevación topográfica prominente de pendientes fuertes.

TERCIARIO

Conglomerado Ts (cg)

Conglomerado polimíctico bien compactado y moderadamente cementado con carbonato de calcio y o sílice; sus clastos son subangulosos, se encuentran en ocasiones sostenidos entre sí y en ocasiones incluidos en una matriz arenosa; su granulometría es variable de 6 a 30 cm de diámetro en promedio. Son producto de la consolidación de depósitos de grava proluviales formados a partir de la erosión sobre los cerros y montañas de rocas sedimentarias cretácicas y pirovolcánicas terciarias a las que cubre discordantemente, por lo que sus clastos están constituidos de uno o de los dos tipos de roca; presentan una morfología bien definida de lomas suaves regularmente disectadas, dispuestas a manera de abanicos aluviales intercrecidos alrededor, o bien ya alejados, de las elevaciones señaladas; en varias ocasiones se encuentran ya erosionadas de tal manera que a su vez dan lugar a la formación de abanicos aluviales recientes los que los cubren discordantemente.

CUATERNARIO

Conglomerado Q (cg)

Depósitos proluviales y coluviales gravo-arenosos polimícticos, deficientemente compactados y cementados; su granulometría es variable pero generalmente predominan tamaños de grava finos menores a 15 cm, los cuales son angulosos y consisten de rocas carbonatadas e ígneas extrusivas. Se encuentran cubriendo discordantemente a rocas cretácicas y terciarias constituyendo en ocasiones claros conos de deyección; pero por lo general presentan una morfología poco definida consistente de laderas o lomas muy bajas sin o con muy poca disección.

Eólico Q (eo)

Depósitos de arena y de partículas floculadas (del tamaño de arena) de limo y arcilla; su origen es eólico y constituyen dunas longitudinales en el sentido noreste-suroeste a casi este-oeste que muestran alturas de 1 a 3 metros aproximadamente.

Las dunas tienden a ser inestables hacia el norte y en los depósitos más alejados hacia el sur se observan dunas ya establecidas gracias a la introducción natural de vegetación.

Estos depósitos se localizan en las áreas de pendientes menores, al oriente y sur de los suelos lacustres; hacia sus contactos con el aluvión se observa interacción de procesos eólicos y aluviales predominando en algunos sitios uno u otro.

Aluvial Q (al)

Suelos arcillosos, limosos y arenosos de origen aluvio-deluvial que conforman la mayor parte de las áreas planas o de poca pendiente. Constituyen los típicos suelos claros con poco contenido de materia orgánica de los desiertos, en los pequeños valles y hondonadas, donde hay más humedad, son más arcillosos y oscuros, y sostienen vegetación más densa; en los sitios sometidos a riego resultan muy fértiles e igualmente se desarrollan más arcillosos.

Lacustre Q (la)

Depósitos de facies continentales lacustres que forman una secuencia alternante de arenas de grano fino, limo y principalmente arcilla la cual da origen a los llamados barreales. Estos depósitos afloran en las depresiones que dan origen a zonas de inundación. Esta unidad no aflora.

Rocas Ígneas Intrusivas

Monzonita, T (Mz)

Unidad constituida por un pórfido monzonítico de textura holocristalina equigranular, de color gris claro, compacto. La monzonita presenta fracturamiento intenso. La unidad está emplazada en rocas volcánicas cenozoicas. Esta unidad no aflora.

Granito T (Gr)

Esta unidad consiste de granito de moscovita, de textura holocristalina equigranular. Es de color gris claro con tonos de verde en superficie fresca, mientras que, en superficie intemperizada, presenta tonos cafés. La unidad se presenta poco fracturada.

Se presenta como un gran promontorio de peñascos redondeados que contrasta con las rocas circundantes. Esta unidad no aflora.

Sienita T (Si)

Pórfido cuarzo-sienítico con un afloramiento a aproximadamente 13 km al este de Benito Juárez, en la falda sureste del cerro La Vinata, al sur del rancho. Muestra una textura fanerítica-porfídica de grano fino. Se distinguen minerales de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo, estudios petrográficos reportan una textura perítica, con albita incluida en microclina, y la presencia de actinolita, esfena, magnetita y pirita. Morfológicamente esta unidad se expresa en un crestón sobresaliente dentro de la unidad de tobas y derrames riódacíticos, en una relación poco clara en la que el pórfido parece intrusionar a las rocas mencionadas.

Granodiorita T (Gd)

Esta unidad consiste en granodioritas de textura holocristalina equigranular, generalmente de grano grueso y de color gris claro. La unidad presenta frecuentemente intemperismo esferoidal. Están emplazadas en las unidades calcáreas del Cretácico Inferior. Esta unidad no aflora.

Diorita T (D)

Roca ígnea intrusiva calco sódica, formada por oligoclasa con zoneamiento, como minerales accesorios: augita, biotita y tremolita-actinolita, su textura es holocristalina inequigranular. Presenta estructura masiva, fracturas verticales con dirección N-S, intrusionada por diques de la misma composición; el intemperismo ha dado origen a formas esferoidales y a la disgregación de la roca en gravillas de 5 a 10 mm de diámetro. Se infiere que afecta a la caliza del Cretácico Inferior. Esta unidad no aflora.

Rocas Ígneas Extrusivas

Andesita T (A)

Son derrames andesíticos de color gris y gris rosáceo de frecuente textura vesicular. Su textura es porfídica en la que se observan cristales de plagioclasa y piroxeno, identificados por estudios petrográficos como andesita y augita, en una matriz vítrea de composición relativamente más silíceo; se reporta además la presencia de apatito, hematita y calcita y sílice secundarios.

Esta unidad asignada al Terciario, se encuentra cubierta por tobas ácidas y derrames riódacíticos y se presenta afectada por un fracturamiento intenso a moderado. Su expresión morfológica es de aparatos volcánicos que constituyen cerros de pendientes abruptas.

Riolita Tom (R)

Roca ígnea extrusiva de quimismo ácido formado por cuarzo, sanidino y ortoclasa, como minerales accesorios biotita y circón, su textura es merocristalina porfídica y afanítica. En general la roca presenta tono gris claro en muestra y gris oscuro al intemperismo, estructura masiva fluidal, pseudoestratificación y fracturamiento vertical que favorece la formación de bloques de 1 a 3 metros de diámetro. Sobreyace a una secuencia sedimentaria del Cretácico e infrayace a rocas ígneas y sedimentarias del Terciario Superior. La unidad es correlacionable con el Complejo Volcánico Superior McDowell y Clabaugh del Oligoceno-Mioceno. Su morfología es de cerros con laderas escarpadas. Esta unidad no aflora.

Toba Ácida Tom (Ta)

Más abundantes al sur del área de estudio, esta unidad comprende tobas de composición riolítica a riódacítica, líticas, cristalinas e ignimbritas; muestran colores grises y gris rosado con frecuencia bandeados. Son faneríticas y afaníticas con textura piroclástica, holo y mero cristalina; contienen cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa sódica, fragmentos líticos, a veces en una matriz microcristalina con vidrio y, como accesorios magnetita y hematita.

A juzgar por sus posiciones relativas, estas tobas son producto de dos emisiones. La primera que se expresa morfológicamente en pequeñas y medianas elevaciones alargadas conforme el sentido noroeste-sureste, en las que se observan característicamente, pseudoestratos con la misma orientación e inclinados al suroeste o noreste; se encuentran parcialmente cubiertas por coladas de basaltos y conglomerados terciarios y cuaternarios.

La que se supone la segunda emisión constituye los grandes edificios, de las sierras al poniente del área, los que se sobreponen a la señalada primera emisión; en ellos se observa ocasional pseudoestratificación horizontal o inclinada al noreste; se presentan cubriendo a unidades de tobas con derrames riolíticos y tobas intermedias, están coronadas por brechas volcánicas ácidas y las cubren parcialmente conglomerados terciarios.

En la fotografía tomada en el cañón de la morita se observa la toba ácida al fondo y caliza en primer plano.

Riodacita-Toba Ácida T (Rd-Ta)

Unidad que incluye una alternancia de derrames de riodacita y tobas de composición riolítica, líticas cristalinas y soldadas dispuestas en una alternancia que muestra, en general, una pseudoestratificación, comúnmente inclinada al noroeste. Más abundantes al sur del área de estudio. Los derrames son de color gris con vivos blancos con textura holocristalina porfídica. Estas rocas están sobrepuestas localmente a conglomerados cretácicos y a aparatos andesíticos terciarios y se encuentra cubierta parcialmente por basaltos y conglomerados del Terciario.

Traquita (Tq)

Unidad que abarca traquitas afaníticas. Presenta color café, rosa y rojo y textura por lo regular holocristalina traquítica, con feldespato potásico, plagioclasa sódica, augita, egirina, hematita, apatito, actinolita y magnetita. En ocasiones muestra textura vesicular y amigdaloides con desarrollo de geodas localmente.

La traquita parece estar cubriendo tobas ácidas y a basaltos; el pórfido traquítico se encuentra emplazado en basaltos. Se sobreponen característicamente a esta unidad riolitas y tobas ácidas. Su expresión morfológica consiste en una importante sierra de mediana elevación y en pequeños cerros y lomas alineadas en el sentido noroeste-sureste.

Toba intermedia T (Ti)

Unidad en la que se incluyen tobas soldadas de composición traquítica a latítica de color gris, pardo y rojizo, textura piroclástica mero y holocristalina.

Localmente presenta derrames traquíticos que se llegan a diferenciar cartográficamente. Está sobrepuesta por tobas ácidas y cubierta por conglomerados del terciario.

Riolita-Toba Ácida T(R-Ta)

Es la unidad más extendida hacia el sur de la zona de estudio, formando en gran parte las sierras de Los Arados, El Pastor y El Pajarito.

Esta unidad contiene intercalaciones de tobas cristalinas e ignimbritas de composición riolítica y derrames de riolita porfídica, a veces esferulítica. Estas rocas son de color café rosado, rosa y rojo con frecuentes bandas blancas o rojas.

Las tobas son de textura piroclástica holo a merocristalina, en ocasiones perítica; contienen cuarzo, altopotásico (sanidino) y plagioclasa sódica en una matriz cripto o microcristalina con la presencia de biotita, circón, apatito, hematita, magnetita y a veces pirita o sericita y calcita secundaria. La unidad está asociada con arcillas de reciente depósito. Se le observa muy esporádicamente pseudoestratos horizontales. Está coronada, al occidente, por unidades de tobas y brechas volcánicas ácidas; cubre a basaltos, traquitas y tobas intermedias y está parcialmente cubierta por conglomerados terciarios.

En los sitios donde dominan las tobas e ignimbritas, la unidad, que constituye los edificios de sierras elevadas, se modela en escarpes verticales y cuando aumenta el contenido de derrames se expresa en formas topográficas más suaves y subredondeadas. En la fotografía se puede apreciar la Sierra el Venado constituida por riolita-toba ácida, y en primer plano cerros de basalto del cuaternario.

Latita T (La)

Latita afanítica de color gris pardo a rojo, ocasionalmente porfídica o con estructura vesicular. Su textura es holocristalina traquítica, contiene plagioclasa sódica en mayor proporción que feldespato potásico, augita, pigeonita, hematita, apatito, circón, hiperstena y antigonita, magnetita y calcita secundaria. Sus posiciones relativas parecen indicar que cubren parcialmente a tobas ácidas y localmente también a basaltos; se le sobreponen claramente conglomerados terciarios y cuaternarios. Morfológicamente conforma pequeñas elevaciones orientadas al noroeste. Esta unidad no aflora.

Basalto T (B)

Con afloramientos grandes en toda la zona de estudio, principalmente al norte y oeste de la zona de estudio, son basaltos de olivino y piroxenos a andesíticos de color gris pardo a negro con tonos rojos de estructura vesicular, con desarrollo de geodas. Su textura es afanítica y porfídica con menos frecuencia, contiene labradorita, augita, pigeonita, olivino, hiperstena, hematita, apatito, en ocasiones plagioclasa sódica, sericita y muy escasos fragmentos líticos.

Estos basaltos se encuentran moderadamente fracturados y se presentan en pequeños afloramientos ampliamente distribuidos sobre unidades de tobas ácidas, riolitas-tobas ácidas y rocas cretácicas y cubiertas en parte por conglomerados terciarios y cuaternarios, rocas de la unidad riolitas-tobas ácidas y localmente por traquitas y latitas. Morfológicamente se presentan en pequeños cerros y lomas de poca elevación y pendientes moderadas a bajas, orientados en el sentido noroeste-sureste como se observa en la fotografía tomada al norte del área de estudio al suroeste de la sierra de Bismark.

Basalto Q (B)

Unidad ígnea efusiva, formada mineralógicamente por: labradorita, con minerales accesorios: olivino y augita, unidos por una matriz de plagioclasas sódicas. Su textura es merocrystalina afanítica. Generalmente forma derrames de extensión reducida, por extrusión fisural o de un cono central. La roca es masiva con, así como intercalación de horizontes de escoria volcánica y ceniza volcánica.

Al intemperismo desarrolla formas esferoidales. La morfología está representada por: conos volcánicos, derrames con fase de malpaís y mesetas. Esta unidad no aflora.

Rocas Metamórficas

Skarn T (Skarn)

Rocas calcáreas afectadas por metamorfismo de contacto compuestas por silicatos de calcio, con textura granoblástica, con granate, epidota, actinolita, wollastonita y sílice, cuyo conjunto ofrece un color gris pardo con vivos verdes. Esta unidad aflora al oeste del Cerro La Vinata y se le asigna una edad terciaria, dada la evidente relación de los cuerpos intrusivos terciarios con el metamorfismo y se encuentran restringidamente cubiertas por conglomerados terciarios. Su expresión morfológica es la correspondiente a la roca madre, calizas y conglomerados cretácicos. Esta unidad no aflora.

Rocas Volcanosedimentarias

Vulcanosedimentario Ti (Vs)

Unidad formada por material ígneo piroclástico, depositado en zonas cercanas al centro de expulsión e intercalada con horizontes sedimentarios. Texturalmente en muestra de mano tiene una apariencia clástica samítica.

Al microscopio presenta textura vulcanoclástica, formada mineralógicamente por: cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca hematizadas y biotita, cementadas por carbonato de calcio, los fenocristales se encuentran en una matriz vítreo.

La secuencia presenta horizontes tobáceos de 20 a 30 cm de espesor, estratos vulcanosedimentarios de granulometría arenosa con grado de redondez de anguloso a subanguloso y estratos de 30 a 40 cm de espesor. Acusa fracturas verticales y sub verticales en diferentes direcciones. La unidad infrayace a tobas ácidas del Oligoceno-Mioceno, el contacto con la roca subyacente no se observó, pero se infiere que descansa en discordancia con caliza del Cretácico Inferior.

De acuerdo con la relación estratigráfica observada, la unidad puede ubicarse en el Terciario Inferior. Se expresa morfológicamente en forma de lomas de pendiente suave. Esta unidad no aflora.

4.2 Geología estructural

La mayoría de las estructuras muestran una orientación noroeste-sureste. Como tales están los ejes de plegamientos que involucran a las rocas sedimentarias cretácicas, los cuales son simétricos y asimétricos recostados hacia el noreste, en la porción oriental se observan moderadamente apretados, y ligeramente recostados hacia el suroeste, en la parte centro-occidental del área; estos pliegues se ven afectados por fracturamiento y fallamiento normal de igual orientación, por algunas fallas transcurrentes de dirección este-oeste y por el emplazamiento de pequeños cuerpos intrusivos.

El fallamiento normal se presenta más extensamente en la carpeta volcánica, donde se presenta además en otras direcciones oblicuas de sentido noreste-suroeste. Las rocas volcánicas conforman elevaciones alargadas también de orientación al noroeste y en ellas se observa con frecuencia pseudoestratificación ligeramente buzante hacia el suroeste y más escasamente hacia el noreste. Las estructuras descritas pueden interpretarse como producto de dos fases tectónicas consecutivas, la primera compresiva y la última distensiva.

La fase compresiva ocurrida durante el intervalo de la parte alta del cretácico inferior al terciario inferior, está relacionada con el choque y hundimiento de la placa paleopacífica farallón bajo la placa continental norteamericana.

Esta fase es responsable del plegamiento de las rocas cretácicas en el que sus recumbencias en sentidos opuestos han sido interpretadas como un arqueamiento de la banda central a nivel del basamento, lo que originó el desplazamiento hacia ambas direcciones noreste y suroeste (Gries y Haenggi, 1970).

La fase culmina con la actividad volcánica terciaria, la que, por su tiempo de emisión y caracteres químicos mencionados anteriormente, indican probablemente cambios importantes en la inclinación del plano de "benioff" con respecto a la superficie y relacionado a una diferente velocidad de colisión entre las placas mencionadas.

Una vez terminada esta primera fase con el cese de la colisión; hace 29 ma según Atwater (1970) o hace 26 según interpretaciones de Mc Dowell y Clabaugh (1979), a partir de datos de Handsshumacher (1976); se inicia una fase distensiva responsable del fallamiento normal y de las últimas emisiones basálticas.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, podemos afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su parte superior, por los depósitos eólicos, lacustres y aluviales de granulometría variada y los conglomerados polimícticos que rellenan los extensos valles, ésta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas ígneas extrusivas, como lo son los basaltos, riolitas y andesitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

A mayor profundidad, las calizas del cretácico, como las formaciones Buda, Ojinaga, Del Río y Cuchillo, constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de semiconfinamiento o de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas. Este es un acuífero que aún no ha sido explorado. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias fracturadas, cuando desaparece su fracturamiento a profundidad, y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas.

En la figura 3 se muestra una sección geológica esquemática que muestra la disposición en el subsuelo de las diferentes unidades litológicas.

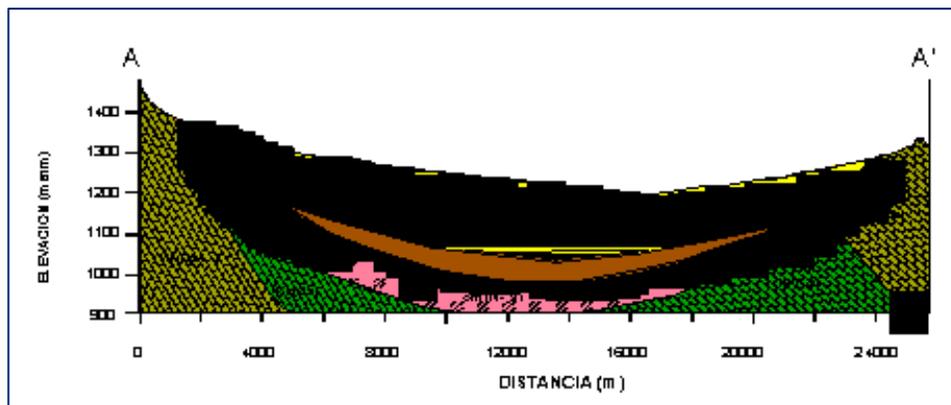


Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior, por sedimentos eólicos, lacustres y aluviales de granulometría variada y conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar varios cientos de metros en el centro de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas, las cuales pueden presentar permeabilidad secundaria por fracturamiento.

A mayor profundidad, las calizas del Cretácico representan una fuente potencial de agua subterránea que aún no ha sido explorada, siendo estas mismas el basamento hidrogeológico del acuífero, cuando desaparece su fracturamiento a profundidad, además de presentar condiciones de semiconfinamiento o de confinamiento debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades que se llevaron a cabo en el estudio realizado en 2010, se ejecutaron 5 pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 4 a 12 horas como máximo. De la interpretación por diversos métodos de las pruebas de bombeo realizadas en el presente estudio, fue posible obtener información de los parámetros hidráulicos que condicionan el comportamiento del sistema hidráulico subterráneo en la zona centro-sur, que es donde se concentran la mayor parte de los aprovechamientos locales. La conductividad hidráulica (k), obtenida con los valores de permeabilidad y espesor saturado del acuífero, comprende valores que varían entre 0.98 y 2.17 m/día, con un promedio de 1.6 m/día.

Por lo que respecta al coeficiente de almacenamiento (S) y rendimiento específico (Sy), se tienen para la zona en estudio valores comprendidos entre de 1.7 y 2.7×10^{-4} de coeficiente de almacenamiento, predominando un valor medio de 3.53×10^{-1} y para el rendimiento específico los valores van de 0.1 a 0.17 con un valor promedio de 0.12 .

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2010 los valores varían de 3 a 75 m, mostrada en la figura 4, donde las partes menos profundas corresponden a las proximidades de la zona lagunar que se encuentra al norte del acuífero.

En el resto del acuífero las profundidades varían generalmente entre 30 y 75 m aproximadamente; aunque se presentan también zonas con posiciones de la superficie freática profundas llegando hasta 130 metros por el suroeste del acuífero, estas profundidades se asocian a la localización de las captaciones que se encuentran en partes elevadas topográficamente.

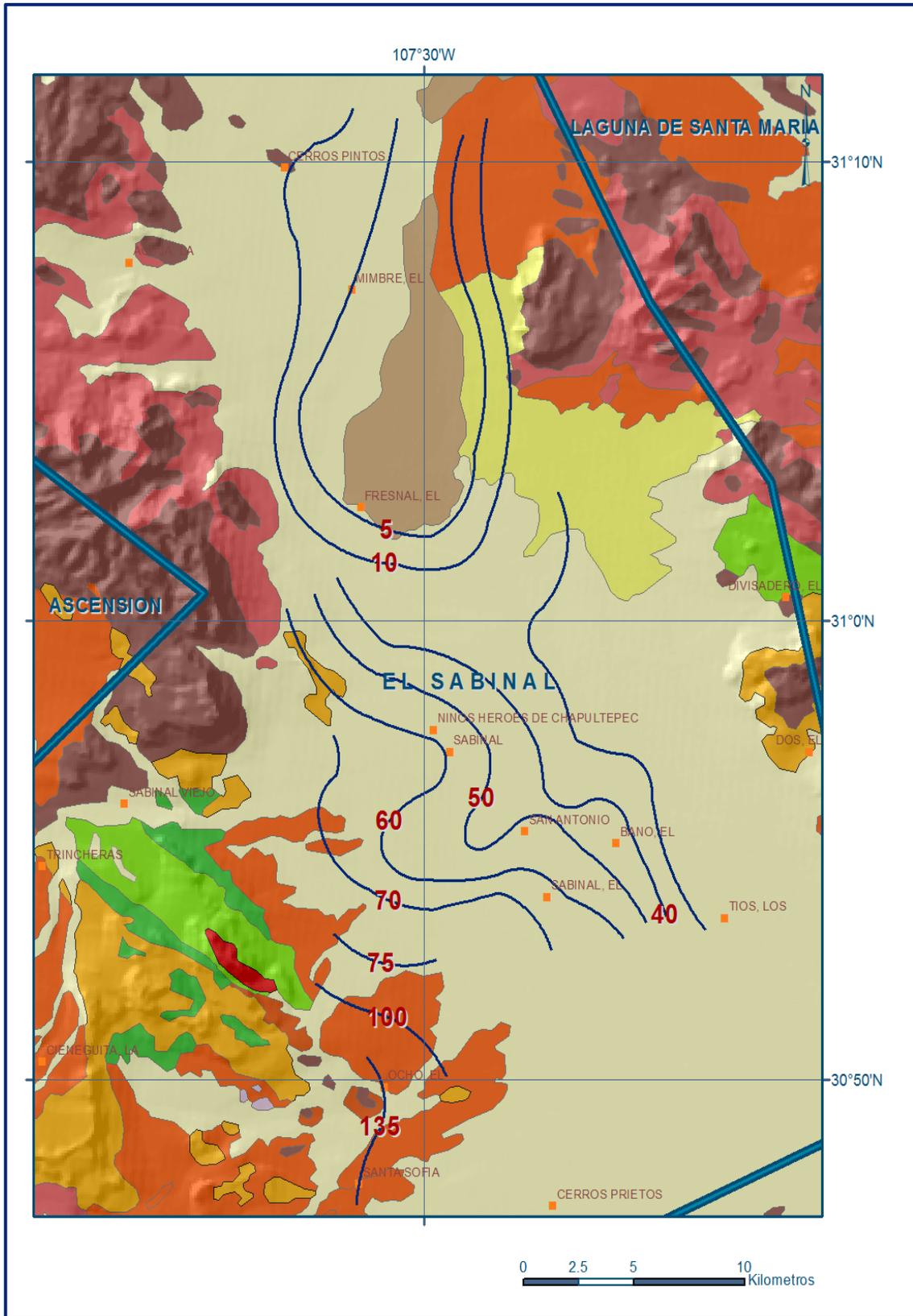


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

De acuerdo con la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2007-2010, mostrada en la figura 6, se muestra la configuración anual de los valores de evolución donde se observan abatimientos del orden de 4 m en la zona centro sur del acuífero que como se ha dicho anteriormente es donde se encuentra la mayor cantidad de pozos de bombeo; no se muestran recuperaciones importantes ya que en general la tendencia ha sido un descenso en los niveles de todo el acuífero particularmente en la zona de mayor bombeo y que es donde los niveles presentan los cambios mayores.

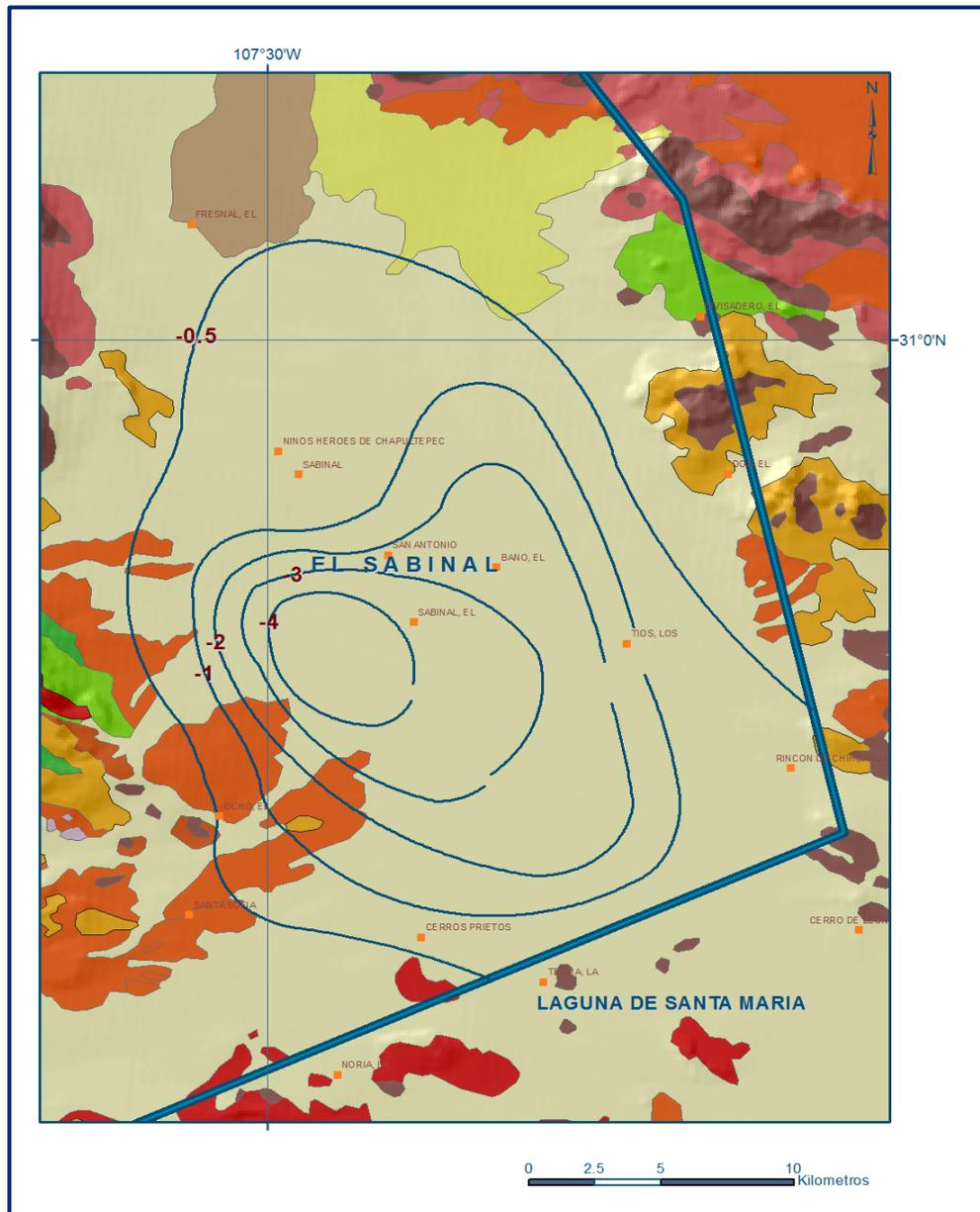


Figura 6. Evolución anual del nivel estático en m (2005- 2010)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Con respecto a la hidrogeoquímica y calidad de agua subterránea, a la fecha, no se ha realizado muestreo de aguas subterráneas para su análisis correspondiente.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en 2010, se registró la existencia de 210 aprovechamientos, de los cuales 207 son pozos y 3 norias. Del total de obras, 177 se encuentran activas y 33 inactivas.

El volumen de extracción estimado asciende a **36.8 hm³** anuales, de los cuales 36.3 hm³ (98.6 %) se destinan para uso agrícola y 0.5 hm³ (1.4 %) para uso doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2010 en una superficie de 421 km², que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos de agua subterránea.

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:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, la recarga total que recibe el acuífero (R_t) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (R_v), y por flujo subterráneo horizontal (E_h).

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

Para este caso, debido a que no existen poblaciones urbanas importantes, se considera que sólo existen recargas por retornos de riego (R_r).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el resto de las componentes de la ecuación tienen manera de ser evaluadas, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

R_v = Recarga vertical;

R_r = Retornos de riego;

E_h = Entradas por flujo subterráneo horizontal

B = Bombeo;

ETR = Evapotranspiración;

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para el cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, mostrada en la figura 5.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal Q en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

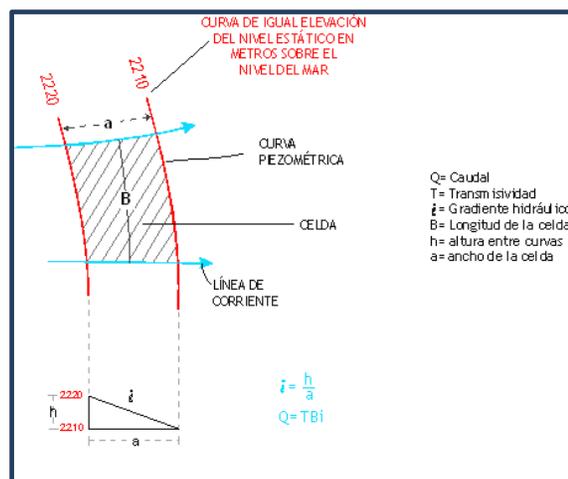
Donde:

Q = Caudal [m^3/s];

T = Transmisividad en [m^2 /s].

B = Longitud de la celda [m];

i = Gradiente hidráulico [1];



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo y de los obtenidos por correlación hidrogeológica en los acuíferos vecinos, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas (tabla 2).

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **29.5 hm³/año**.

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

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	11430	2140	10	0.004673	0.0010	0.0534	1.7
E2	7140	1140	10	0.008772	0.0008	0.0501	1.6
E3	10000	1140	10	0.008772	0.0005	0.0439	1.4
E4	7140	1430	10	0.006993	0.0010	0.0499	1.6
E5	11140	1430	10	0.006993	0.0010	0.0779	2.5
E6	11430	1715	10	0.005831	0.0010	0.0666	2.1
E7	5714	1140	30	0.026316	0.0010	0.1504	4.7
E8	8860	1000	10	0.010000	0.0008	0.0709	2.2
E9	5285	1570	30	0.019108	0.0010	0.1010	3.2
E10	4285	860	10	0.011628	0.0010	0.0498	1.6
E11	5715	715	10	0.013986	0.0010	0.0799	2.5
E12	7430	860	10	0.011628	0.0010	0.0864	2.7
E13	7860	1430	10	0.006993	0.0010	0.0550	1.7
Total entradas							29.5

7.1.3 Retornos de riego (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen aplicado.

Se considera para el acuífero El Sabinal un porcentaje conservador del 20%, por concepto de retornos de aguas de riego, por lo que, aplicando este porcentaje al volumen total de agua para uso agrícola se tiene que:

$$Rr = (0.20) (36.8 \text{ hm}^3/\text{año}) = 7.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

$$\mathbf{Rr = 7.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales.}}$$

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y por evapotranspiración (ETR). No existen salidas por flujo subterráneo horizontal, ni flujo base de los ríos.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado asciende a 36.8 hm³/año.

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando los valores promedio anual de precipitación de 316.5 mm y temperatura de 19.1° C. Coutagne propuso la ecuación siguiente para calcular la evapotranspiración real:

COUTAGNE	$ETR = P - \chi P^2$
Donde:	
ETR= Evapotranspiración m/año	
P = precipitación en m/año	
$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$	
t = temperatura en °C	

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

Aplicando la fórmula de Coutagne se obtiene una lámina de evapotranspiración real de 287.7 mm anuales. Si consideramos el valor de la ETR obtenida y el área donde se tienen niveles freáticos someros, el volumen de la ETR es: 46 km² (0.2877 m) = 13.2. Por lo que **ETR = 13.2 hm³ anuales.**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento, se tomó en cuenta la configuración de evolución del nivel estático 2005-2010 (figura 6). Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico (Sy) de 0.02, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A= Área entre curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h= Valor medio de la variación piezométrica en el período (m);

Como consecuencia de la explotación del recurso para el uso agrícola, la posición del nivel freático ha descendido principalmente en la porción centro sur del acuífero. El cambio de almacenamiento promedio anual es de **-12.5 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento anual (2005 - 2010)

Evolución Promedio Anual 2005-2010				
Evolución (m)	Abatimiento (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-4	-4	19.0	0.02	-1.5
- 4 a -3	-3.5	45.0	0.02	-3.2
-3 a -2	-2.5	58.0	0.02	-2.9
- 2 a -1	-1.5	65.0	0.02	-2.0
- 1 a - 0.5	-0.75	198.0	0.02	-3.0
Área de balance		385.0	Promedio anual	-12.5

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical (Rv), mediante la siguiente expresión, que fue establecida con anterioridad:

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

$$Rv = 36.8 + 13.2 - 12.5 - 29.5 - 7.4$$

$$Rv = 0.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de la recarga vertical, las entradas horizontales subterráneas y los retornos de riego.

$$R = Rv + Eh + Rr$$

$$R = 0.6 + 29.5 + 7.4$$

$$R = 37.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS= Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

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

Para este caso su valor es **37.5 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 están comprometidos 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 El Sabinal no existen descargas naturales comprometidas, por lo tanto, la **DNC = 0.0**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **65,853,186 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 37.5 - 0.0 - 65.853186 \\ \text{DMA} &= -28.353186 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **28,353,186 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1986) Estudios de Exploración Geofísica en la zona El Sabinal, Chihuahua.