



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL
ACUÍFERO LLANO DE GIGANTES (0849), 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	5
3.1 Provincia Fisiográfica.....	5
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	10
4.2 Geología Estructural.....	22
4.3 Geología del Subsuelo	24
5. HIDROGEOLOGÍA	24
5.1 Tipo de Acuífero.....	24
5.2 Parámetros hidráulicos.....	25
5.3 Piezometría	25
5.4 Comportamiento hidráulico.....	25
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	26
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	26
7.1. Entradas.....	26
7.1.1. Recarga vertical	27
7.2. Salidas.....	32
7.2.1. Bombeo(B)	32
8. DISPONIBILIDAD	32
8.1 Recarga total media anual (R).....	33
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	33
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	33
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA).....	34

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 (REPD).

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 Llano de Gigantes, definido con la clave 0849 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción central suroriental del estado de Chihuahua, cubriendo una superficie de 2, 817 km². Geográficamente, la zona se encuentra ubicada entre los paralelos 27°44'01" y 28°29'41" de latitud Norte y entre los meridianos 104°39'36" y 105°15'17" de longitud Oeste (Figura 1).

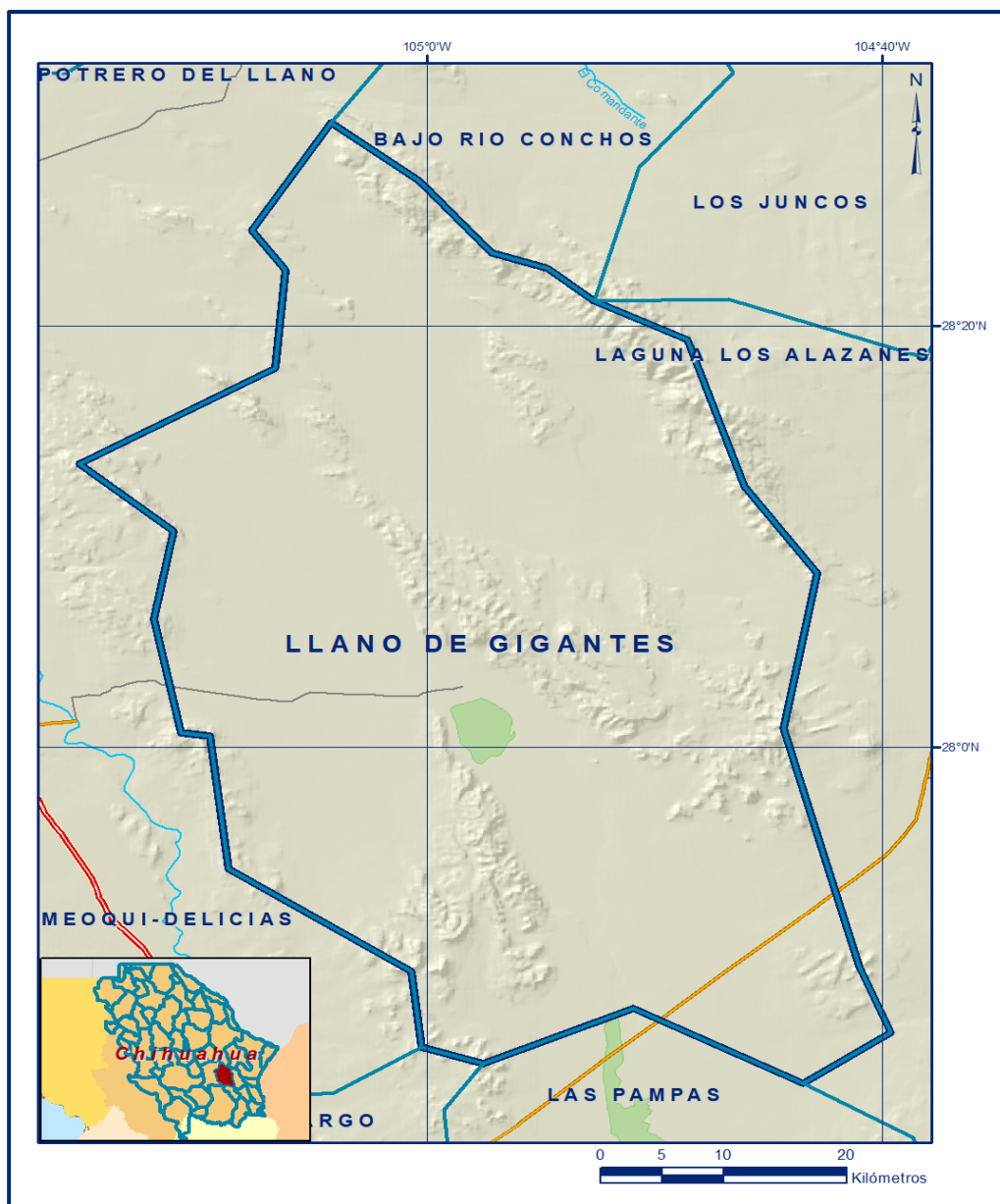


Figura 1. Localización del acuífero

Limita al norte con los acuíferos Bajo Río Conchos y Los Juncos, al este con Rancho El Astillero, al sur con Las Pampas, al suroeste con el acuífero Jiménez - Camargo y al oeste con el acuífero Meoqui - Delicias, todos ellos pertenecientes al estado de Chihuahua (Figura 1).

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios Julimes, Saucillo, La Cruz y Camargo. 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 0849 LLANO DE GIGANTES						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	104	42	52.7	28	8	15.1
2	104	44	20.4	28	0	53.8
3	104	41	0.3	27	49	34.5
4	104	39	36.3	27	46	27.1
5	104	43	28.1	27	44	1.7
6	104	50	54.6	27	47	35.5
7	104	57	32.6	27	44	57.9
8	105	0	14.1	27	45	44.1
9	105	0	41.3	27	49	21.7
10	105	8	42.4	27	54	12.0
11	105	9	32.7	28	0	31.0
12	105	10	47.2	28	0	40.9
13	105	12	0.1	28	6	4.6
14	105	11	7.3	28	10	17.6
15	105	15	16.7	28	13	27.8
16	105	6	38.6	28	18	0.5
17	105	6	13.4	28	22	41.0
18	105	7	39.9	28	24	33.8
19	105	4	11.2	28	29	40.9
20	105	0	19.1	28	26	54.0
21	104	57	10.5	28	23	29.8
22	104	54	41.5	28	22	45.4
23	104	52	40.0	28	21	12.1
24	104	48	32.5	28	19	20.9
25	104	46	2.2	28	12	24.4
1	104	42	52.7	28	8	15.1

1.2 Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero Llano de Gigantes pertenece al Organismo de Cuenca Río Bravo y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Chihuahua. Actualmente no existe en el territorio de acuífero ninguna veda de agua subterránea.

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

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero no se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación. En algunos acuíferos vecinos se han realizado estudios hidrogeológicos para determinar su recarga media anual. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

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 determinar 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 Provincia Fisiográfica

El acuífero Llano de Gigantes se encuentra prácticamente en su totalidad en la provincia Sierras y Llanuras del Norte y dentro de esa provincia se encuentra en la subprovincia Llanuras y Sierras Volcánicas.

La provincia de Sierras y Llanuras del Norte es una 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-sur-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.

La subprovincia Llanuras y Sierras Volcánicas en territorio mexicano comprende parte de los estados de Chihuahua y Coahuila; al norte se extiende hacia los Estados Unidos de América. Se localiza en el costado oriente de la entidad, a manera de una franja orientada norte sur que va del noroeste de Ojinaga y el límite boreal con Coahuila, al sur de la sierra Las Pampas y el oriente de la sierra El Diablo.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en la mayor parte del acuífero domina dentro del clima *Muy seco* el subclima *Muy seco semicálido* y luego dentro de los climas del tipo *Seco*, los subclimas: *Seco semicálido* y *Seco templado*.

Las características principales de los climas *Muy seco* son que la evaporación excede a la precipitación, además 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 la lluvia, la naturaleza del suelo y la cubierta vegetal; están clasificados como muy extremosos, por su oscilación térmica media anual mayor de 14.0 °C.

El subclima *Muy seco semicálido* se caracteriza por presentar temperaturas medias anuales mayores de 18.0 °C, temperaturas medias del mes más frío inferiores a 18.0 °C y precipitaciones totales anuales entre 200 y 400 mm.

El tipo *Seco* son intermedios en cuanto a humedad respecto a los *Muy secos* y los *Semisecos* y están considerados como de transición entre estos dos, se distribuyen en forma de una franja que atraviesa 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 dos estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Las Burras y Camargo que cuentan un con periodo de análisis de 1970 a 2003 y de 1957 a 2007, respectivamente.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **337.89 mm y 19.58 °C** respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1765.47 mm anuales**, según datos de evaporímetro de la estación climatológica Las Burras, con periodo de análisis de 1999 a 2002.

3.3 Hidrografía

El acuífero Llano de Gigantes se encuentra dentro de la región hidrológica Mapimí. Parte de esta región hidrológica está al este-sureste del estado y pertenece a la vertiente interior, es decir, no cuenta con salida al mar.

Cabe destacar, que no existen, en esta porción de la región hidrológica, escurrimientos de gran magnitud y las corrientes que se generan son arroyos intermitentes de trayectorias cortas, algunos de los cuales llegan a descargar en depresiones topográficas donde forman lagunas intermitentes.

Dentro de la región hidrológica de Mapimí el acuífero se encuentra en la cuenca hidrológica El Llano -Laguna Del Milagro, la cual se localiza al este de la entidad.

Esta cuenca está caracterizada por un conjunto de pequeñas lagunas intermitentes distribuidas en toda su área, entre las que se pueden mencionar la Laguna de Chicuas, Laguna Colorada y Laguna Las Arenosas. Debido a las características descritas, propiciadas por la escasa precipitación, en esta región no se conocen los montos de escurrimiento, ya que no han operado estaciones hidrométricas.

3.4 Geomorfología

La región presenta un relieve volcánico de mesetas que cubre, parcialmente, a un relieve plicativo; estos elementos aparecen dispuestos según montañas de bloques escalonados separados por valles de origen tectónico; mismos que están bordeados por depósitos recientes. El relieve volcánico está formado por rocas de composición silícica acumuladas durante el Oligoceno - Mioceno y está caracterizado por la presencia de escarpes y por una desecación profunda que ha labrado cañones.

El relieve plicativo se desarrolló a finales del Cretácico Superior, a partir de las secuencias sedimentarias del Paleozoico y del Mesozoico; por lo general, su morfología tiene una correspondencia directa con las estructuras sobre todo en las rocas mesozoicas.

Estos elementos geomorfológicos aparecen modificados por pequeños cuerpos intrusivos.

En los valles de origen tectónico se han desarrollado extensas planicies aluviales y algunas lacustres. Las corrientes fluviales que drenan en las montañas plegadas son, por lo general, subsecuentes.

Con base en las características que exhibe, el área se puede ubicar en una etapa geomorfológica correspondiente a la madurez; en algunas áreas se observa ruptura de pendiente en los sedimentos clásticos que rellenan los valles, lo que indica un levantamiento del área.

4. GEOLOGÍA

Durante el Mesozoico existía una serie de elementos paleo-geográficos y de actividad tectónica que se desarrollaron desde el Triásico y dieron pie a la formación de dos facies de sedimentación identificadas para el Cretácico Inferior (Pacheco C., Castro R., y Gómez Miguel, 1984).

La primera de ellas de edad Hauteriviano-Turoniano según Juan Araujo y Rodolfo Arenas (1986), que se depositó al occidente del Mar Mexicano o Geosinclinal Mexicano (Figura 2).

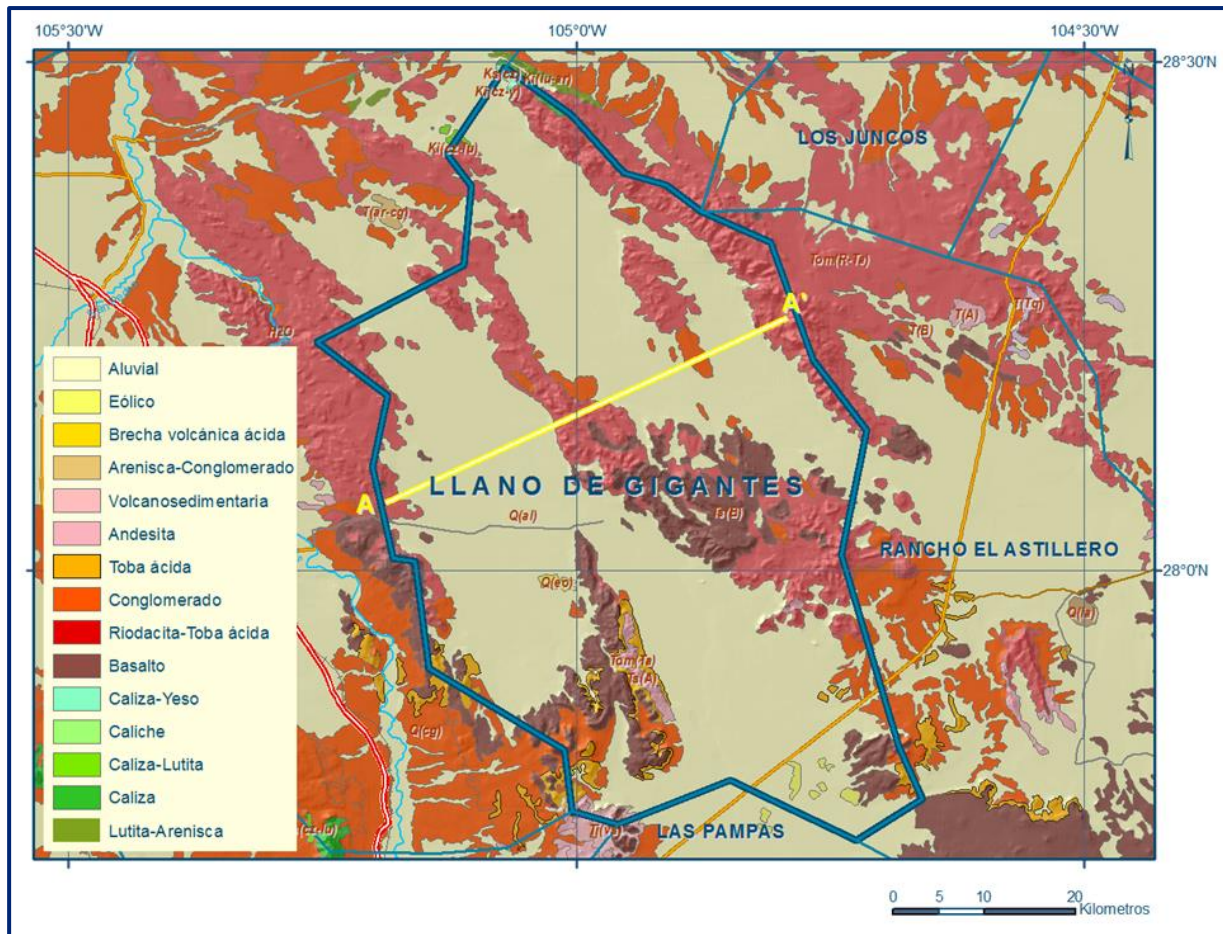


Figura 2. Geología general del acuífero

La segunda unidad, se deposita para este mismo tiempo al oriente, en donde prevalecían condiciones de facies litorales y de mares someros debido a la presencia de elementos positivos como la Isla del Cuervo e Isla de Coahuila, las que fueron transgredidas hasta el Albiano y predominar facies de plataforma de mar abierto con desarrollo de bancos arrecifales y condiciones lagunares en la Plataforma de Coahuila.

Para el Cretácico Superior (Cenomaniano-Turoniano), las condiciones de depósito varían a causa del levantamiento de la parte occidental y central (López Ramos, 1981) y dan lugar a la sedimentación marina con predominio de terrígenos en facies de mar abierto. Las relaciones estratigráficas entre las unidades cretácicas son transicionales y concordantes. Las rocas extrusivas de tipo andesítico y relacionadas con la primera fase volcánica que dio origen a la Sierra Madre Occidental, sobreyacen discordantemente a las rocas sedimentarias Cretácicas, que a su vez infrayacen discordantemente a tobas del Oligoceno-Mioceno y a rocas sedimentarias del Terciario Superior.

Se observaron secuencias volcano-sedimentarias que infrayacen a las rocas denominadas por Mc Dowell y Clabaugh (1979) como Complejo Volcánico Superior. La segunda fase volcánica la representan tobas de composición riodacítica y riolítica con intercalación de volcanoclásticos, así como riolita del Oligoceno Mioceno que en ocasiones extruyeron a través de fracturas; estas unidades sobreyacen en discordancia a las rocas del Complejo Volcánico Inferior, Mc Dowell y Clabaugh.

La andesita post-miocénica sobreyace concordantemente a las unidades ácidas e infrayace al basalto, el cual es representativo de las últimas manifestaciones volcánicas, de acuerdo con las observaciones de campo, esta unidad sobreyace también discordantemente a rocas ígneas, así como a unidades cretácicas e infrayace a rocas y sedimentos del Pliocuaternario.

Contemporánea y/o posteriormente a las manifestaciones volcánicas que dieron origen a la Sierra Madre Occidental, ocurre la depositación de sedimentos clásticos en facies continentales representados por areniscas y conglomerados, que rellenan antiguas cuencas continentales, sobreyacen en forma discordante a las rocas del Cretácico e infrayacen a rocas extrusivas volcánicas de tipo ácido e intermedio y a depósitos del Terciario Superior.

Para este mismo tiempo en el Valle de Zaragoza las condiciones iniciales fueron de relleno de cuenca formada por areniscas y conglomerados y posteriormente lacustres, evidenciados por la depositación de caliza continental, limolita y lutita, esta secuencia es discordante con las unidades cretácicas. Para el Cuaternario se deposita material clástico no consolidado y el desarrollo de amplias planicies aluviales que rellenan los bolsones, también se deposita: travertino, caliche, sedimentos lacustres y localmente suelos eólicos.

4.1 Estratigrafía

Rocas Sedimentarias

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.

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. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

CALIZA-LUTITA, Ki(Cz-Lu). Unidad que consiste de una alternancia de lutitas calcáreas, margas y calizas en estratos delgados y escasamente gruesos; 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 Lagrima (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. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

CALIZA, Ki (cz). Unidad formada por caliza depositada en facies de plataforma de mar abierto, con desarrollo lagunar y arrecifal. Megascópicamente su textura es de mudstone a wackestone, con variaciones locales a packstone, al microscopio las texturas son: micrita, biomicrita, espatita y en algunas muestras clástica samítica y clástica pelítica. En general la mineralogía de la unidad está representada por: calcita (micrita y espatita), trazas de sílice, trazas de hematita y feldespatos autógenos. Los tonos característicos son beige claro en muestra fresca, al intemperismo gris oscuro y gris claro. La estratificación es variable, de 30 a 40 cm en caliza arcillosa, de 20 a 40 cm con intercalación de limolita arenosa y abundantes fósiles.

Los esfuerzos compresivos que afectaron a la unidad están representados por pliegues abiertos. Acusa fallas normales de dirección NW-SE, fracturas las cuales sirvieron de conducto para la extrusión de toba ácida y fisuras que generalmente se encuentran rellenas de calcita. Esta formación está asignada por posición estratigráfica al Albiano Inferior, Albiano Medio y es correlacionable con parte de la Formación Aurora del estado de Coahuila y es equivalente a las formaciones Glen Rose y Paluxy del centro de Texas. La formación sobreyace concordantemente a la Formación Cuchillo y subyace en igual forma a la Formación Calizas y Lutitas sin Nombre. Sus contactos están definidos claramente por las capas masivas de caliza de su base y de su cima.

La segunda es la Formación Finlay, constituida por caliza masiva con aisladas capas de arenisca, que se depositaron en un ambiente nerítico interno a medio con presencia de rudistas que indica el desarrollo de bancos arrecifales. La caliza es del tipo mudstone y wackestone.

Esta unidad está situada por posición estratigráfica dentro del Albiano Medio y es correlacionable con la parte de la Formación Aurora del estado de Coahuila y equivalente a las Formaciones Comanche Peak y Edwards del centro de Texas.

Su contacto inferior es nítido y concordante y se sitúa al terminar la alternancia de la Formación Calizas y Lutitas Sin Nombre. El contacto superior es nítido y concordante y se marca en el último estrato de caliza masiva que subyace a la formación Benavides. La tercera es la Formación Loma de Plata, Ambsbury (1954) constituida por caliza masiva nodular que se depositó en un ambiente nerítico interno a medio con presencia de toucasitas y caprinídos que reflejan el desarrollo de arrecifes.

La caliza es del tipo mudstone, de color gris claro, en estratos que van de medianos a gruesos, con nódulos y lentes de pedernal, huellas de disolución y mineralización. En ocasiones se observa caliza del tipo grainstone en estratos gruesos a masivos. Su expresión morfológica es de sierra alta con pendientes abruptas y sierras aisladas.

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.

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 wackestone, 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. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

LUTITA-ARENISCA, Ks (lu-ar). Unidad constituida por lutita y arenisca, depositada en facies marinas litorales. Ocasionalmente se intercalan estratos conglomeráticos con clastos areno-redondeados de caliza y roca ígnea intrusiva, así como una capa de hierro sedimentario de 30 cm de espesor.

El espesor de los estratos varía de 80 cm a dos metros, en muestra fresca de lutita presenta tonos verde claro y rojizo, y la arenisca amarillenta. En las lutitas se pueden observar pistas de gusanos perpendiculares a la estratificación, nódulos de arenisca con diámetro de 10 a 60 cm, algunos en su interior contienen amonitas. Ocasionalmente en estratos de arenisca se observan nódulos de hierro, fragmentos de madera fósil y lentes de coquina. Esfuerzos compresivos ocasionaron en la unidad pliegues cerrados y apretados.

Sobreyace concordantemente a caliza lutita del Cretácico superior, subyace por contacto tectónico a caliza del cretácico inferior e infrayace discordantemente a toba ácida del oligoceno-mioceno y conglomerado del Terciario Superior.

La unidad se ubica en el cretácico superior y es correlacionable con las formaciones San Carlos y Parras. Su expresión morfológica es lomeríos de pendientes suaves. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

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 en la zona del acuífero.

CONGLOMERADO, Ks (Cg). Ortoconglomerado petromíctico 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 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. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

CONGLOMERADO, Ts (cg).- Unidad constituida por un conglomerado polimíctico depositado en facies continentales, se le observa mal clasificados con clastos de 5 a 50 cm de diámetro, predominando los fragmentos de roca calcárea, en menor proporción fragmentos de rocas ígneas, su grado de redondez varía de subangulosos a subredondeados y dispuestos en forma caótica.

Se encuentran unidos por una matriz arcillosa de color café cementante calcáreo, ocasionalmente se presentan con fracturas rellenas de calcita, se observaron pliegues de gran radio de curvatura, pequeñas fallas locales y en discordancia angular con conglomerados Cuaternarios.

La unidad presenta diferentes tonos de coloración entre los que sobresalen el gris con tonos de beige o rojizos. Estos conglomerados sobreyacen a rocas sedimentarias del Cretácico y de igual forma a rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno, está cubierto también en discordancia por basaltos del Terciario Superior, por la relación que mantiene con las demás unidades se le considera de edad Terciario Superior.

La unidad se encuentra rellenando fosas tectónicas, con expresión morfológica de lomas de pendiente suave y medianamente disectados.

CONGLOMERADO, Q (cg). Depósitos conglomeráticos polimícticos depositados en facies continentales derivados principalmente de rocas ígneas y escasas rocas sedimentarias, los clastos varían en tamaño siendo estos desde arenas hasta guijarros y bloques, el grado de redondez de los fragmentos es anguloso y subanguloso mostrando escaso retrabajo, unidos por una matriz areno-arcillosa de color rojizo, también llegan a contener poco cementante calcáreo.

En la base de estos conglomerados predominan los líticos pequeños desde unos milímetros a 5 centímetros y con horizontes arenosos de 10 cm aproximadamente con estratificación cruzada, en la parte superior los clastos son de diámetros que pueden exceder los 40 cm, estos se les aprecia imbricación con orientación noreste, el color es gris claro que intemperiza a color café, generalmente estos conglomerados presentan muy poca compactación encontrándose la mayoría de las veces deleznales, cubren discordantemente a rocas sedimentarias Cretácicas y de la misma forma a la secuencia volcánica del Oligoceno-Mioceno, así como a rocas basálticas y conglomerados del Terciario Superior. Por posición estratigráfica y las características que se observaron, se le asigna una edad correspondiente al Cuaternario. Su morfología es de lomas de pendiente suave y ligeras ondulaciones situadas en las planicies. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

ALUVIAL, Q (al).- Depósitos de origen fluvial derivados de la erosión y denudación de las rocas pre-existentes en el área, la acumulación de éstos representa el evento más joven del área y se encuentra rellenando extensos valles y fosas tectónicas, los materiales de relleno son arcillas, limos arenas y gravas, con un grado de redondez que varía de sub-redondeado a bien redondeado, en la que destacan grandes cantidades de granos de cuarzo, fragmentos de roca y feldespatos, localmente llega a presentar estratificación cruzada, así como la presencia de gradación y algunas estructuras lenticulares.

Debido al acomodo de las partículas granulométricas su permeabilidad es alta, dando origen a la formación de acuíferos de tipo libre, los cuales son ampliamente explotados en la región por medio de pozos. Los espesores de estos depósitos son variables con expresión morfológica de extensas planicies que en ocasiones están disectadas por pequeños arroyuelos que desembocan en lagunas endorreicas.

EOLICO, Q (eo). Unidad formada por sedimentos eólicos recientes, depositados por la acción del viento. Su granulometría es arenosa, los fragmentos se encuentran bien redondeados y el tamaño de las partículas es homogéneo. Sus componentes son cuarzo, feldespato y fragmentos de roca, los estratos presentan estructura cruzada. Se expresa morfológicamente en forma de dunas. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

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 en la zona del acuífero.

Rocas Igneas Extrusivas

ANDESITA, T (A). Unidad ígnea efusiva formada por andesina y oligoclasa, unidas por una matriz microlítica de plagioclasas de la misma composición, se reportan minerales accesorios como: augita, apatito, piogenita y circón.

Su textura es microcristalina afanítica y porfídica. Por lo general su estructura es masiva, aunque también se observó estructura fluidal y amígdalas alargadas rellenas de calcita. Los afloramientos presentan fracturamiento en varias direcciones, el cual ha ocasionado la formación de bloques. Sobreyace a las unidades ígneas del Oligoceno-Mioceno e infrayace en discordancia con el conglomerado del Terciario Superior. Morfológicamente forma cerros aislados y también aflora en los escarpes de las sierras.

TRAQUITA, T (Tq). Roca ígnea extrusiva, formada por sanidino y oligoclasa, como accesorios: apatito, esfena y cuarzo, su textura es merocristalina afanítica. Presenta tono gris oscuro en muestra fresca y ocre al intemperismo, forma Pseudo estratos y fracturas verticales, lo que ha originado prismas rectangulares de 1 a 2 metros.

La unidad muestra un alto grado de meteorización que contrasta con las unidades adyacentes. Infrayace a rocas andesíticas del Terciario Superior, se correlaciona con las primeras manifestaciones volcánicas del Terciario Inferior, de acuerdo con C. Ragin, 1978 en S.P.P. 1984. Su morfología es de ladera.

RIODACITA-TOBA ACIDA, 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 pseudo estratificación, comúnmente inclinada al noroeste. 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. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

RIOLITA-TOBA ACIDA, T (R-Ta). Unidad constituida por diversas rocas de composición ácida: tobas riolíticas, tobas riodacíticas y algunas ignimbritas. En general la mineralogía de la unidad lo constituyen: microclina, sanidino, andesina, oligoclasa y cuarzo; como minerales accesorios: circón, hematita, biotita, pirita y fragmentos de roca. La textura en las rocas efusivas es mero cristalina porfídica y vitrofídica en las rocas explosivas; piroclástica y brechoide. Las unidades efusivas son masivas, con estructura fluidal, intercalada con toba o inyectadas en planos verticales ondulantes, es decir perpendiculares a la pseudo estratificación con desarrollo de estructuras secundarias a partir de la segregación de sílice en cavidades preexistentes.

En general la unidad presenta fracturamiento vertical, ocasionando la formación de bloques. Sobreyace discordantemente a rocas cretácicas y a las unidades del Complejo Volcánico Inferior e infrayace a basalto y andesita del Terciario Superior, así como a depósitos recientes.

La unidad se correlaciona con el Complejo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental (Mc Dowell y Clabaugh, 1979) del Oligoceno-Mioceno. En general forma mesetas disectadas, mesetas basculadas y sierras escarpadas.

BASALTO, Ts (B). Unidad ígnea efusiva, formada mineralógicamente por: labradorita, con minerales accesorios: olivino y augita, unidos por una matriz de plagioclasas sódicas. Su textura es merocristalina afanítica.

Generalmente forma derrames de gran magnitud, por extrusión fisural o de un cono central. La roca es masiva con vesículas las cuales se encuentran rellenas de calcita, causa disyunción columnar prismática, así como intercalación de horizontes de escoria volcánica y ceniza volcánica. Al intemperismo desarrolla formas esferoidales. Sobreyace discordantemente a calizas del Cretácico Inferior y a rocas ígneas del Oligoceno-Mioceno.

La unidad es correlacionable con las emisiones basálticas ocurridas en el Plio-Cuaternario (Marc Tardy, 1977). La morfología está representada por: conos volcánicos, derrames con fase de malpaís y mesetas. La unidad aflora esporádicamente, donde conforma mesetas muy disectadas.

TOBA ÁCIDA, Tom (Ta). Unidad ígnea explosiva formada por: toba ácida, toba riolítica, toba riodacítica e ignimbrita; en general la mineralogía está representada por andesina, oligoclasa y cuarzo, unidos por una matriz vítrea, la textura es merocrystalina piroclástica.

Las rocas presentan en ocasiones intercalaciones de riolita y horizontes volcano clásticos, cuyos fragmentos varían de 5 a 10 mm de diámetro, sub angulosos, unidos por una matriz tobácea y cementante silíceo, en ocasiones los fragmentos son de riolita y vidrio volcánico.

La unidad presenta fracturamiento vertical y subvertical, formando bloques de dimensiones variables. Sobreyace discordantemente a caliza del Cretácico e infrayace a roca ígnea y sedimentaria del Terciario Superior. La unidad es correlacionable con el Complejo Volcánico Superior (Mc Dowell y Clabaugh) del Oligoceno-Mioceno. La expresión morfológica está representada por: mesetas, mesetas basculadas, sierras y lomerío de pendiente suave. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

RIOLITA, Tom (R). Roca ígnea extrusiva de quimismo ácido formado por cuarzo, sanidino y ortoclasa, como minerales accesorios biotita y circón, su textura es merocrystalina porfídica y afanítica.

En general la roca presenta tono gris claro en muestra y gris oscuro al intemperismo, estructura masiva fluidal, pseudo estratificación 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 Mc Dowell y Clabaugh del Oligoceno-Mioceno. Su morfología es de cerros con laderas escarpadas. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

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 en la zona del acuífero.

TOBA INTERMEDIA, Ts (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. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

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 merocristalina 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 en la zona del acuífero.

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 en la zona del acuífero.

GRANITO, T (Gr). Esta unidad consiste de granito de muscovita, de textura holocristalina equigranular. Es de color gris claro con tonos de verde en superficie fresca, mientras que en superficie intemperizada, presenta tono café. 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 en la zona del acuífero.

SIENITA, T (Si). Pórfido cuarzo-sienítico. Muestra una textura fanerítica-porfídica de grano fino. Se distinguen minerales de feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo, estudios petrográficos reportan una textura pertítica, 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 riodacíticos, en una relación poco clara en la que el pórfido parece intrusionar a las rocas mencionadas. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

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 en la zona del acuífero.

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.

La roca se correlaciona con los intrusivos del Terciario. Su morfología es una planicie interrumpida por lomas aisladas de pendiente suave. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

Rocas volcanosedimentarias

VOLCANOSEDIMENTARIO, Ti (Volcanosedimentario). 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 volcano-clástica, formada mineralógicamente por: cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca hematizadas y biotita, cementadas por carbonato de calcio, los fenocristales se encuentran en una matriz vítrea.

La secuencia presenta horizontes tobáceos de 20 a 30 cm de espesor, estratos volcano-sedimentarios 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 ubicársele en el Terciario Inferior. Se expresa morfológicamente en forma de lomas de pendiente suave. Esta unidad no aflora en la zona del acuífero.

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 en la zona del acuífero.

4.2 Geología Estructural

La secuencia mesozoica define estructuras plegadas, recostadas hacia el noreste, en ocasiones aparecen dislocadas por fallas inversas.

Los cuerpos intrusivos aparecen recortados por fallas normales de orientación general norte-sur, al igual que la secuencia piroclástica del Terciario.

Por las características morfológicas y estructurales que se aprecian, se distinguen zonas diferentes en cuanto al estilo de deformación continua de las unidades litológicas.

Los anticlinales y sinclinales, amplios y simétricos, con inclinación en sus flancos de 5 a 10 grados y orientación de los ejes estructurales NW-SE. El desarrollo de este tipo de estructuras suaves y abiertas fue debido a la competencia de la roca calcárea, a los esfuerzos de compresión.

Otra zona en donde las estructuras están representadas por anticlinales y sinclinales en disposición aislada, con tendencia NW-SE y un ligero arqueamiento de los ejes; en este caso dichas estructuras son angostas y alargadas con vergencia al NE y echado hacia el SW. El plegamiento en esta zona es de moderado a intenso con pliegues isopacos y cerrados. La deformación discontinua está representada por dos tipos: las fallas de compresión y distensión, de las primeras se observaron pliegues-falla y fallamiento inverso de poca magnitud con vergencia hacia el NE, así como de cabalgadura.

Las estructuras distensivas, están representadas por fallas normales y fracturas; las primeras guardan una orientación NW-SE principalmente, con variaciones N-S, son las causantes de la separación de los bloques sedimentarios y la formación de fosas tectónicas. Las fracturas forman dos familias una con orientación NE-SW y la otra NW-SE, que afectan a las unidades sedimentarias e ígneas. Estructuras de origen ígneo extrusivo, se encuentran diseminadas en el área y se representan por derrames lávicos, conos y mesetas.

Se distinguen tres fases de deformación: una fase compresiva del Cretácico Superior-Terciario Inferior que pliega las secuencias sedimentarias, un posterior emplazamiento de cuerpos intrusivos, que modifican localmente las estructuras existentes hacia formas cóncavas. Una fase de ajuste isostático, que dio origen a pliegues de fondo y fracturas de orientación NNE-SSW, del Mioceno Superior. M. Tardy (1977), D.A. Córdoba (1980) y observada en rocas ígneas y sedimentarias del Terciario (Eoceno Mioceno Inferior). Una fase distensiva del Plioceno, representada por fallas de extensión, que formaron la Provincia morfológica de Sierras y Cuencas.

Por último, se denota un fracturamiento que afecta a las estructuras anteriores, así como lineamientos interpretados en las imágenes de satélite y de acuerdo con M. Tardy estas se relacionan con el sistema de fallas de San Andrés y el proceso de oceanización que ocurre en la parte sur del mar de Cortés.

4.3 Geología del Subsuelo

De acuerdo con la información geológica recabada tanto en este acuífero como en los vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales de granulometría variable y conglomerados, de permeabilidad media a baja, que constituyen las planicies y los piedemonte, cuyo espesor es reducido.

En la parte baja del acuífero se localizan depósitos lacustres y eólicos. La porción inferior está alojada en rocas volcánicas: basaltos, tobas y riolitas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las fronteras al flujo subterráneo están definidas por las mismas rocas volcánicas y sedimentarias, al desaparecer el fracturamiento a profundidad.

La mayor parte del área en estudio corresponde a depósitos de aluvión en las zonas bajas o valles, y las elevaciones corresponden a tobas y riolitas; y unos pequeños lomeríos que corresponden a conglomerados. Según la sección geológica, este acuífero se compone de dos valles o cuencas, separados por una sierra.

De acuerdo a lo que se muestra en la sección, los derrames de riolitas y tobas sirven de basamento a los depósitos de aluvión que pueden llegar a tener espesores de más de 250 m. Las altas elevaciones de roca fracturada sirven como una buena zona de recarga hacia los depósitos granulares e incluso hacia la misma roca que le subyace.

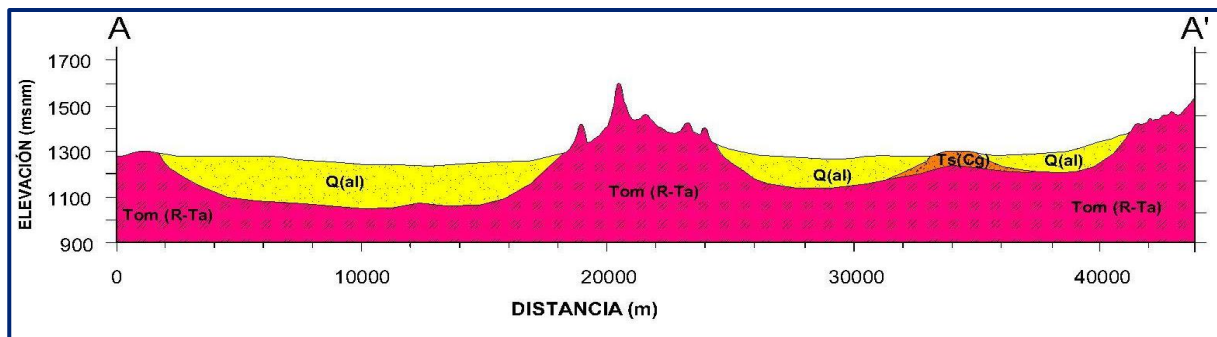


Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

El acuífero en la región se desarrolla fundamentalmente en los depósitos conglomeráticos de edad terciaria.

Las rocas volcánicas y calcáreas que contienen a estos depósitos tienen permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución, por lo que también forman parte de la unidad acuífera. No se presentan en el acuífero condiciones de confinamiento, por lo que el acuífero se considera de **tipo libre**.

5.2 Parámetros hidráulicos

En el territorio que cubre el acuífero no se han realizado pruebas de bombeo para la determinación de las propiedades hidráulicas del acuífero.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada durante el estudio realizado en 2010. Sólo fue posible obtener los valores de profundidad al nivel estático en un número escaso de aprovechamientos (12) dispersos en el acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

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

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Durante recorrido de campo realizado en 2010, fue posible obtener en campo algunos parámetros físico químicos del agua en ciertos pozos, teniendo como promedio: pH= 8.6, SDT= 664 ppm, CE= 540 μ S/cm y T= 23°C. Debido al escaso número de aprovechamientos, a las dificultades de acceso a ellos y al incipiente volumen de extracción del acuífero, 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 en 2010, existen 28 aprovechamientos, de los cuales 27 son pozos y sólo una noria. Del total de obras, 9 se encuentran activas, 16 inactivas y 3 en abandono.

El volumen de extracción total es de **0.042 hm³** anuales, destinados al uso doméstico y pecuario.

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 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

Las entradas al acuífero Llano de Gigantes están integradas por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia (Rv). No existe información piezométrica actual ni histórica en la superficie que cubre el acuífero. La escasa información disponible, procedente de recorridos de campo, es puntual e inconsistente de tal manera que no es posible extrapolar para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas.

Por estas razones, se optó por plantear el balance hidrometeorológico en la superficie total del acuífero (2,806 km²), para estimar el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

7.1.1. Recarga vertical

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

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

V_{LL} = Volumen de lluvia;

V_{ETR} = Volumen evapotranspirado;

V_{ESC} = Volumen escurrido;

V_{INF} = Volumen infiltrado;

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

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

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área 2 817 km² por la lámina de precipitación media anual (337.89 mm):

$$V_{LL} = 2,817 \text{ km}^2 (0.33789 \text{ m}) = \mathbf{951.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Para el cálculo de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, que considera el valor promedio anual de precipitación de 337.89 mm y el de temperatura de 19.58 °C. Coutagne propuso la siguiente ecuación 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 305.6 mm anuales. Si consideramos el valor de la ETR obtenida (305.6 mm anuales), el volumen de la ETR es:

$$V_{ETR} = 2817 \text{ km}^2 (0.3056 \text{ m}) = \mathbf{861 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

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

El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento. Para determinar el valor de escurrimiento, la norma establece la siguiente relación:

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

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo.

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

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO A	TIPO DE SUELO B	TIPO DE SUELO C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3
TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		

En el caso de que en la cuenca, existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento (C_e), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si K resulta menor o igual que 0.15,

$$C_e = K (P-250) / 2000;$$

Si K es mayor que 0.15,

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

Donde:

P= Precipitación anual;

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;

K = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

De acuerdo con la cartografía del CONABIO escala 1:1, 000,000 para el tipo, predominan los tipos Litosol y Xerosol (figura 4).

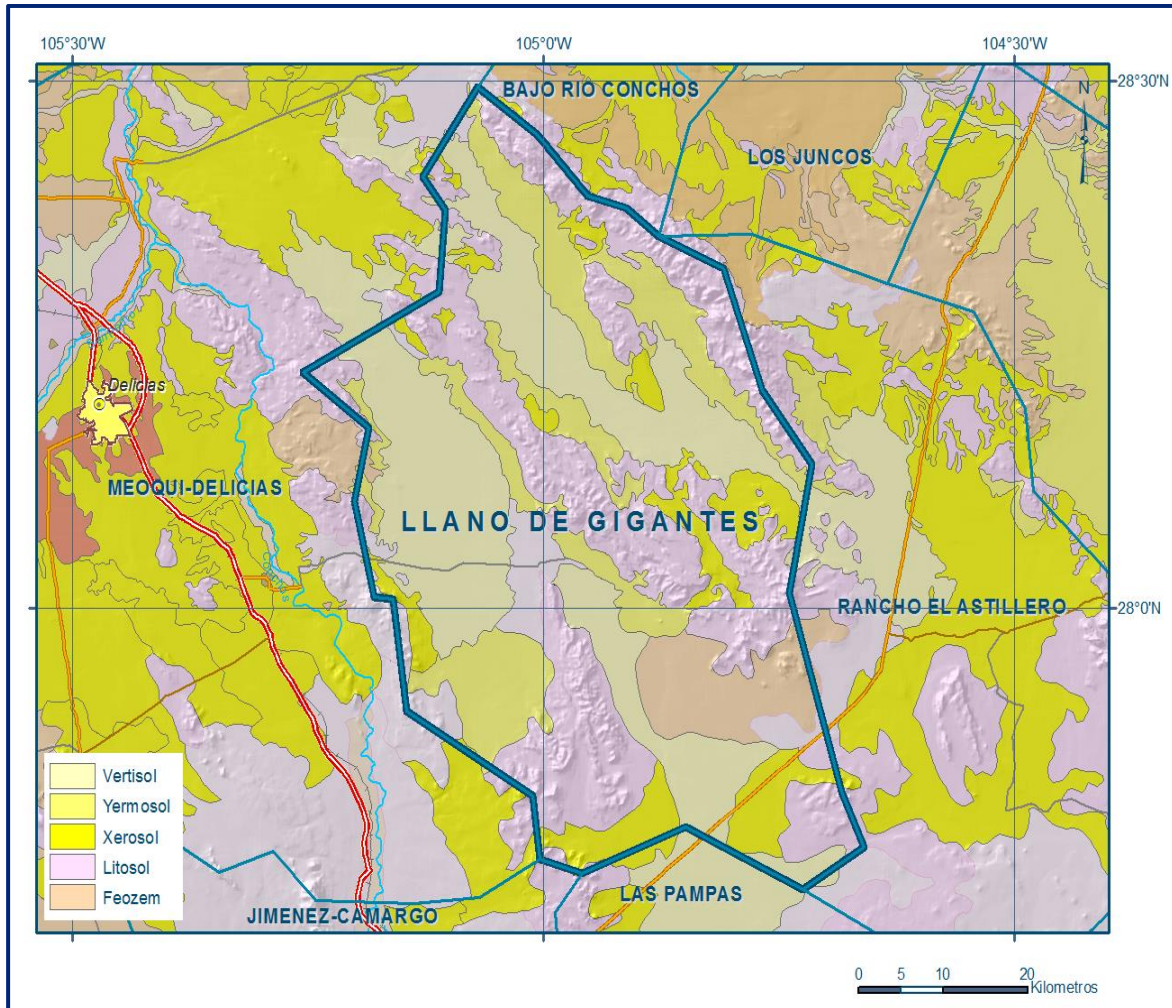


Figura 4. Tipo de suelo

En cuanto al uso de suelo (figura 5) de acuerdo con la cartografía de INEGI escala 1:1, 000,000, un 41% del acuífero está cubierto por matorral con $K=0.20$; un 58 % de la superficie del acuífero está cubierta por pastizal, con cobertura menor al cincuenta por ciento, en suelo tipo B, $K=0.28$ y por último 1% correspondiente a cuerpo de agua ($K=0.28$).

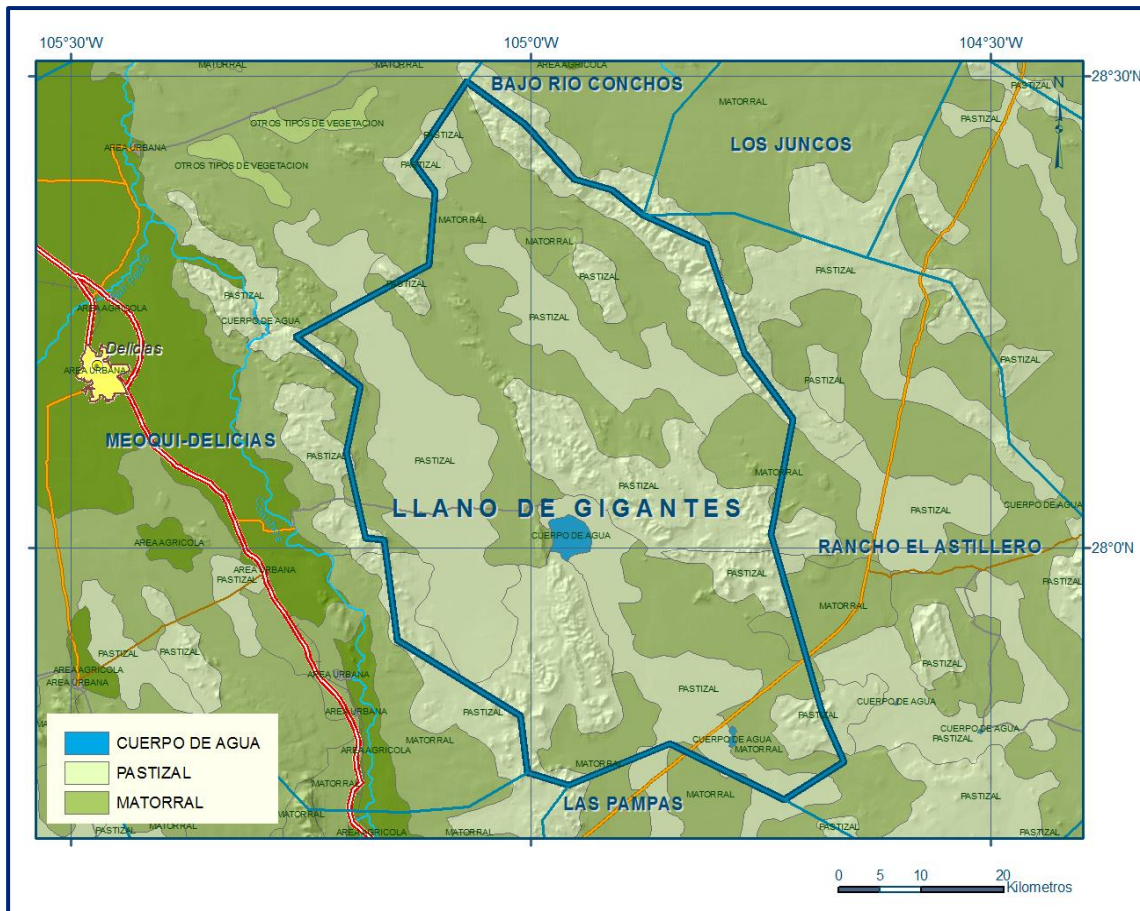


Figura 5. Uso de suelo

$$K \text{ ponderado} = 0.20 (0.41) + 0.28 (0.58) + 0.28 (0.01) = 0.2472$$

De esta manera, el valor de K es igual a **0.2472**, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

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

$$Ce = 0.0757$$

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

$$V_{ESC} = 0.0757 (951.8 \text{ hm}^3) = 72.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$\begin{aligned}V_{INF} &= V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \\V_{INF} &= 951.8 - 861.0 - 72.0 \\V_{INF} &= 18.8 \text{ hm}^3/\text{año}\end{aligned}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es de 951.8 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.02. De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 18.8 hm³/año en los 2817 km² de superficie del acuífero. Por lo que la **Rv = 18.8 hm³/año.**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y posiblemente a través de salidas subterráneas pero no se cuenta información piezométrica para su estimación. No existen manantiales, ni flujo base en ríos.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **18.8 hm³/año.**

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:

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

Donde:

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

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 **18.8 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 Llano de Gigantes no existen descargas naturales comprometidas.

Por lo tanto, **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 (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 **67,981,771 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 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 18.8 - 0.0 - 67.981771 \\ \text{DMA} &= -49.181771 \text{ hm}^3/\text{año}\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **49,181,771 m³ anuales**.