



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO POTRERO DEL LLANO (0841),
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	4
3. FISIOGRAFÍA	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1 Estratigrafía	10
4.2 Geología estructural.....	18
4.3 Geología del subsuelo.....	19
5. HIDROGEOLOGIA	20
5.1 Tipo de acuífero	20
5.2 Parámetros hidráulicos.....	21
5.3 Piezometría	22
5.4 Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	22
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	23
5.4.3 Evolución del nivel estático	25
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	25
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	26
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS.....	26
7.1 Entradas.....	27
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	27
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	28
7.2 Salidas	29
7.2.1 Bombeo (B).....	29
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	29
7.2.3 Evapotranspiración (ETR)	30
7.2.4 Descarga por manantiales (Dm).....	31
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	31
8. DISPONIBILIDAD	32
8.1 Recarga total media anual (R).....	33
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	33
8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS)	33
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (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-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

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

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

1.1 Localización

El acuífero Potrero del Llano, definido con la clave 0841 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-este del estado de Chihuahua, entre los paralelos 28° 31' a 29° 9' de latitud Norte y los meridianos 105° 04' a 105° 44' de longitud Oeste, cubre una superficie aproximada de 2,492 km² (Figura 1).

Colinda al norte con el acuífero Laguna de Hormigas, hacia el oriente con Bajo Río Conchos, al sur con Meoqui-Delicias y al ponente con el acuífero Aldama-San Diego.

Geopolíticamente el acuífero abarca parcialmente los municipios Aldama y Julimes. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1.

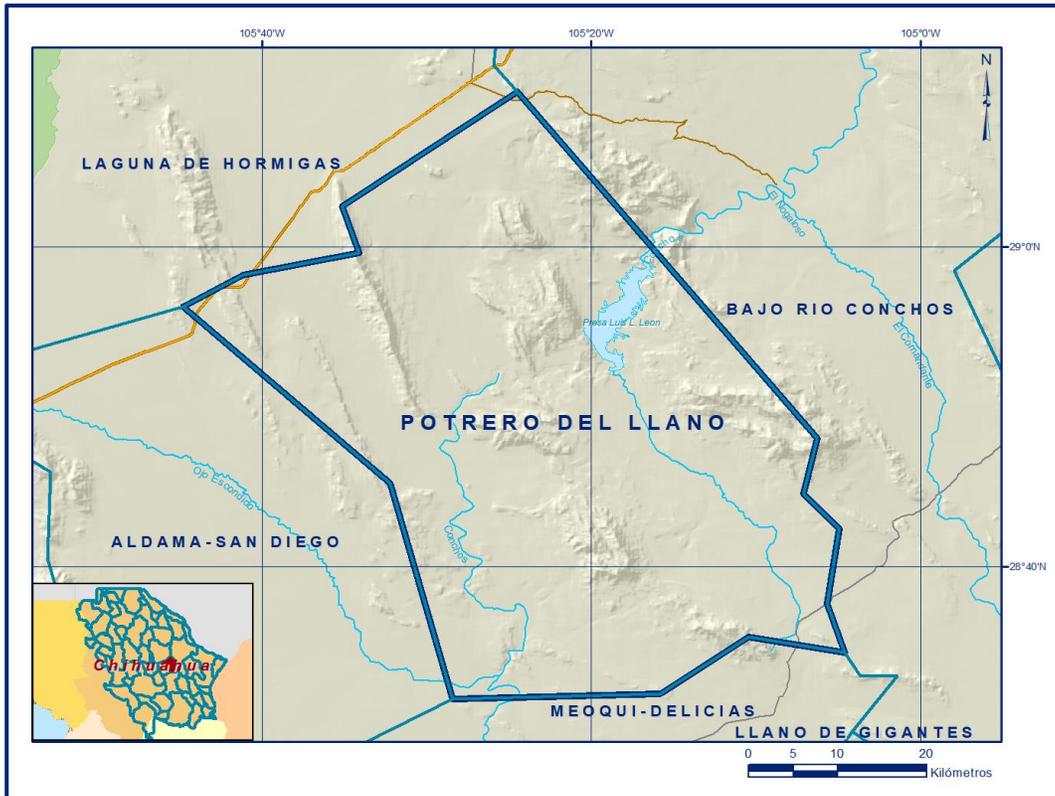


Figura 1. Localización del acuífero

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0841 POTRERO DEL LLANO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	105	24	30.3	29	9	45.4
2	105	6	18.5	28	48	16
3	105	7	8.7	28	44	34.9
4	105	4	58.1	28	42	24.3
5	105	5	42.4	28	37	42.3
6	105	4	37.4	28	34	39.3
7	105	10	28.1	28	35	37.8
8	105	15	48.3	28	32	41
9	105	28	25.5	28	31	43.7
10	105	32	14.7	28	45	13.3
11	105	44	48.6	28	56	15.6
12	105	41	10.2	28	58	15.3
13	105	34	7.5	28	59	39.9
14	105	35	9.5	29	2	34.2
1	105	24	30.3	29	9	45.4

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Potrero del Llano pertenece al Organismo de Cuenca Río Bravo y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Chihuahua. Dentro del territorio que cubre el acuífero una pequeña porción, ubicada al noroeste, se encuentra regida por dos decretos de veda, primero el *“Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región circunvecina de Villa Aldama, Chih.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 31 de diciembre de 1953 y segundo el *“Decreto que establece veda, por tiempo indefinido, para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona de Delicias, Chih.”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de julio de 1962.

Ambos decretos se clasifican como tipo III, que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El principal usuario es el agrícola. En su territorio no existen Distritos de Riego y actualmente no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han realizado varios estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes se encuentran los siguientes:

ESTUDIO GEOQUÍMICO DEL YACIMIENTO DEL SKARN DE CHORRERAS, MUNICIPIO DE ALDAMA, CHIHUAHUA, MEX. GERARDO VARGAS TORRES. Tesis Profesional UACH. 1990. Este trabajo incluyó la geoquímica del yacimiento de skarn ubicado en el poblado Chorreras; aunque el área de este estudio se encuentra fuera del acuífero, resulta interesante porque hace una buena descripción geológica de la sierra de Chorreras, ubicada parcialmente dentro de este acuífero. Esta sierra constituye una estructura dómica, cuyo origen es el resultado del emplazamiento de un cuerpo ígneo intrusivo sobre las rocas calcáreas. En ella se desarrolla un incipiente drenaje radial con algunos arroyos que drenan hacia la presa El Granero.

PALEOGEOGRAFÍA DEL MESOZOICO EN LA PORCIÓN CENTRO ORIENTAL DEL ESTADO DE CHIHUAHUA. Tesis profesional UACH. Virginia Angélica Mena. 1994. Este trabajo describe las características litológicas y paleontológicas de las rocas sedimentarias marinas del Mesozoico, esencialmente del Jurásico Superior y Cretácico, depositadas en la cuenca de Chihuahua; el estudio geológico comprende la porción centro-oriental del mismo estado.

BOSQUEJO GEOLÓGICO DEL ÁREA BOQUILLA COLORADA. MUNICIPIO DE ALDAMA, CHIHUAHUA. Tesis Profesional UACH. Abelaid Loera Flores. 2003. Este trabajo de tesis recepcional es un bosquejo geológico del área denominada Boquilla Colorada, situado al norte del área del acuífero.

GEOLOGÍA Y TECTÓNICA DE PLACER DE GUADALUPE, CHIH Y SU RELACIÓN CON LA EVOLUCIÓN GEODINÁMICA DE NORTEAMÉRICA. Tesis Profesional UACH Héctor Félix González Ramírez. 2005. Se desprende de este trabajo que la estratigrafía de Placer de Guadalupe, está representada por cuatro ciclos de sedimentación bien definidos; para el Paleozoico Inferior, se tienen rocas sedimentarias de plataforma de las formaciones El Paso, Cable Canyon y Montoya, cuyo rango de edad abarca desde el Ordovícico Inferior hasta el Silúrico Temprano.

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS EN EL RÍO CONCHOS, EN EL TRAMO DE LAS PRESAS LA BOQUILLA Y FRANCISCO I. MADERO, HASTA OJINAGA, CHIHUAHUA, elaborado por: Basin, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua, en 2005. La zona de estudio que comprende este informe abarca la trayectoria del río Conchos, desde la presa La Boquilla, hasta llegar a Ojinaga, además de un tramo del río San Pedro (desde la presa Fco. I. Madero hasta su confluencia con el río Conchos); atravesando el acuífero Potrero del Llano. Su objetivo principal fue estimar las pérdidas en los cauces, debidas ya sea a la evaporación, a la infiltración y a la extracción; en relación con los volúmenes descargados de las presas. Sus conclusiones tienen algunas limitaciones ya que al carecer de estaciones hidrométricas no es posible el análisis del escurrimiento en la propia cuenca, restringiendo de esta manera los alcances del estudio. Como parte del reporte final del estudio se propone una red de estaciones hidroclimatológicas e hidrométricas, que permitan una mejor estimación de las componentes del ciclo hidrológico presentes.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN EL ACUÍFERO POTRERO DEL LLANO EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, elaborado por el Ing. Pedro Martínez Leyva para la Comisión Nacional del Agua, en 1996. El objetivo del estudio es la actualización del conocimiento geohidrológico del acuífero, con el propósito de definir su potencial como fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Chihuahua. Se llevaron a cabo el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales, sondeos geofísicos, hidrometría de las extracciones, pruebas de bombeo y muestreo de agua para análisis fisicoquímicos.

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

La región se ubica fisiográficamente, de acuerdo con la clasificación de E. Raisz (1959), en la provincia Sierras y Cuencas, la cual está situada entre las provincias de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, la cual representa la extensión al sur de la provincia Sierras y Cuencas (Basin and Range) de los Estados Unidos de América.

Esta provincia, se caracteriza por la presencia de unidades orográficas longitudinales falladas y regularmente orientadas al NNO-SSE, separadas por extensos valles de origen tectónico rellenos por potentes espesores de sedimentos aluviales, sobre los cuales se han desarrollado amplias planicies, que generalmente muestran un drenaje de tipo endorreico (bolsones) que culminan hacia el centro en vastas lagunas efímeras sujetas a una intensa evaporación, como la laguna del Cuervo o la laguna Maijoma situadas al norte y al oriente del área respectivamente. Si se considera la clasificación fisiográfica de INEGI (1981), el área del acuífero queda situada en la provincia Sierras y Llanuras del Norte, dentro de la subprovincia Bolsón de Mapimí, en la cuyo rasgo característico es la presencia de estructuras serranas con abanicos aluviales, bajadas y llanuras en las que normalmente se encuentran suelos salinos originados en extensas zonas sometidas a inundación temporal.

En general, las sierras son de relieve accidentado presentando flancos escarpados que denotan su naturaleza tectónica, como bloques montañosos levantados y fallados, en tanto que los valles constituyen las fosas tectónicas adyacentes. Sin embargo, hacia la porción oriental de esta provincia los valles se desarrollan normalmente sobre estructuras de tipo sinclinal, en las que las sierras corresponden a estructuras anticlinales.

3.2 Clima

El clima de la región pertenece al tipo clasificado como muy seco, cuyo rasgo característico es que la evaporación supera los valores de precipitación media anual. Su baja humedad depende principalmente de la escasa precipitación y la temperatura, pero también influye la duración de las lluvias, la naturaleza del suelo y la cobertura vegetal.

De acuerdo con los datos registrados en las estaciones climatológicas Las Burras y Presa El Granero, el valor de la precipitación promedio anual es de 307 mm, con régimen de lluvias en verano. El valor de la temperatura media anual es de 19.8° C. De los datos reportados por evaporímetros, en las estaciones aledañas se tiene un valor medio de evaporación potencial de 2,188 mm anuales.

3.3 Hidrografía

El acuífero Potrero del Llano pertenece a la región RH 24, que se localiza en la Mesa del Norte. Es la región de mayor relevancia en la entidad y en ella queda incluida la corriente superficial más importante en el estado, el río Conchos, que se origina en las estribaciones de mayor altitud de la sierra Madre Occidental.

El drenaje es poco definido; en algunas porciones dendrítico y en otras subparalelo, está conformado por corrientes que tienden a desembocar en el río Bravo y éste a su vez en el Golfo de México.

La RH 24 se divide en 14 cuencas, quedando incluidas siete dentro del estado de Chihuahua, una de ellas es la denominada Cuenca (K) Río Conchos - P. El Granero, dentro de la cual se encuentra el acuífero Potrero del Llano.

Esta cuenca se localiza completamente en la porción central de la entidad, comprende 5.0% de su territorio y es drenada por corrientes de tipo intermitente y perenne, la principal es el río Conchos, con una pendiente de 0.12% en este tramo.

El rasgo hidrográfico más importante del área lo constituye el río Conchos que prácticamente atraviesa el área del acuífero de sur a norte, pasando por la localidad El Potrero y posteriormente dobla hacia el noreste para tributar sus aguas a la presa Luís L. León (El Granero), recibiendo antes afluentes intermitentes de relativa importancia como los ríos Chuviscar y Bachimba, además de numerosas corrientes efímeras u ocasionales.

Los valores promedio anual de los escurrimientos en Las Burras y en el Chuviscar, antes de la confluencia con el Conchos, son de 705 y 66 hm³, respectivamente, sumando un total de 771 hm³ anuales. Estos volúmenes constituyen las entradas superficiales a la cuenca por concepto de escurrimiento.

3.4 Geomorfología

En el área de El Potrero y sus alrededores, se expresan claramente los rasgos geomorfológicos de origen tectónico, como son las serranías afalladas y las estructuras plegadas tanto anticlinales como sinclinales. El relieve que muestra estos rasgos se acentúa por el tipo de intemperismo y erosión diferencial, producto del contraste litológico y estructural presente en las diferentes unidades orográficas- debido a la escasa cobertura vegetal, típica de las zonas desérticas, se aprecia fácilmente la morfología del terreno y su constitución litológica expuesta en excelentes afloramientos.

Las serranías se levantan abruptamente sobre el piso de los valles, sin mediar una transición paulatina del cambio de pendiente, revelando de una manera clara su génesis tectónica. La altitud máxima, de 2,240 msnm, se presenta en la sierra de Chorreras; en tanto que la sierra Roque y la sierra Amargosa tienen 2,140 y 2,120 msnm respectivamente. Las sierras restantes dentro del área muestran una altitud variable entre 1,700 y 2,000 msnm aproximadamente. En cuanto a la altitud promedio de los valles, se estima en unos 1,250 msnm, lo que da una idea de la fuerte diferencia de elevación con algunas de las sierras mencionadas.

Las serranías presentan una orientación preferencial NNO-SSE, sin embargo, en el tramo surcado por el río Conchos, las sierras muestran una flexión casi E-O, como es el caso de la sierra La Gloria y algunas estribaciones occidentales de la sierra Roque, cercanas a la localidad El Potrero. De hecho, el flanco sur de la sierra La Gloria y el extremo noroeste de la sierra Roque conforman un notable rasgo morfológico semicircular de unos 7 km de diámetro, abierto hacia El Potrero.

En general las sierras están desarrolladas sobre rocas sedimentarias calcáreas del Cretácico Inferior, tal es el caso de las sierras: Gómez, El Morrión, El Soldado, La Gloria, Chorreras, Roque, y la Amargosa; pero en algunas zonas bajas de sus flancos y en los valles se encuentran lutitas, calizas y areniscas de Cretácico Superior que constituyen un relieve formado por suaves lomeríos, que contrastan con el relieve abrupto, masivo y escarpado de las sierras. Desde luego hay que señalar, que las rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno, aunque en menor proporción conforman el relieve principal de algunas sierras, siendo más notables en las sierras Cuesta del Infierno y Palmares, situadas al oeste de El Potrero. Estas últimas presentan una serie de pequeñas mesetas eslabonadas, con relieve escalonado en sus laderas, debido a la erosión diferencial desarrollada sobre ignimbritas y tobas.

4.1 Estratigrafía

En el área que cubre el acuífero, se encuentran expuestas secuencias litológicas que comprenden edades cuyo registro estratigráfico abarca desde el Paleozoico hasta el Reciente. Del Paleozoico están expuestas rocas carbonatadas y rocas arcillo-arenosas. El Mesozoico se inicia con una secuencia calcáreo-arcillosa del Jurásico Superior, sobre la que se deposita una secuencia cretácica que incluye rocas evaporíticas, hacia su base, un paquete grueso de rocas carbonatadas en su parte media, y culmina con una depositación clástica.

El Cenozoico está representado, principalmente, por rocas continentales, del Paleógeno-Neógeno, están expuestas rocas clásticas continentales, rocas piroclásticas y lávicas de composición silícica y rocas intrusivas emplazadas, tanto en las rocas sedimentarias como en las volcánicas. El Cuaternario está representado por depósitos recientes no consolidados.

Rocas sedimentarias

PALEOZOICO

Caliza P (Cz). Unidad de paquetes calcáreos que se intercalan y en ocasiones cambian lateralmente a secuencia calcáreo-arcillosa. Corresponden a la Caliza Solís y a parte de la Formación Monillas; o bien, a la Caliza Pastor y parte de la Formación Plomosas.

El paquete que corresponde a la Caliza Solís, del Ordovícico al Devónico medio, consiste de calizas y dolomías de colores gris y anaranjado con pedernal e intercalaciones de calizas clásticas, con braquiópodos, conodontos y corales. Sobre estas calizas se encuentra la porción calcárea de la Formación Monillas (Devónico-Mississípico), que consiste principalmente de calizas y margas.

El paquete que corresponde a la Caliza Pastor, o Formación Horquillas, cuya edad corresponde al periodo Pensilvánico-Pérmico, consiste de calizas dolomíticas masivas de estratificación gruesa, cuya base es de tipo transicional con caliza arcillosa y pedernal de color oscuro. Cambia de facies lateralmente a sedimentos tipo flysh hacia el occidente del área (Formación Villa Aldama).

La parte más alta de esta unidad corresponde a las porciones calcáreas de la Formación Plomosas, y consiste de caliza arrecifal que se encuentra junto con depósitos tipo flysh y “rocas verdes” y que se correlacionan con la Formación Villa Aldama. Aflora en el cerro de En Medio.

Arenisca-Conglomerado P (Ar-cg). Secuencia que consiste, en su parte inferior, de una alternancia de areniscas, conglomerados, limolitas, metasedimentos y desarrollos arrecifales calcáreos, pertenecientes a un paquete pequeño de la Formación Plomosas; la porción superior de la secuencia consiste de depósitos continentales de tobas y limolitas asignados a la “Formación Verde” de edad indeterminada.

Los conglomerados son de color violáceo, densos, con matriz arenosa constituida por cuarzo y plagioclasas, con líticos de rocas tobáceas y riolíticas. Las areniscas presentan color gris oscuro que intemperizan a café claro, son de grano fino a medio, con cementante silíceo y están dispuestas en capas delgadas, medianas y gruesas; en algunos sitios constituye un depósito flysch al alternar con las limolitas.

Lutita-Arenisca P (Lu-ar). Esta secuencia aflora en la porción norte de la sierra de Chorreras y está constituida por pizarras carbonosas, de coloración variable entre negro a amarillo, físilas, muy deleznable y con un fracturamiento intenso. En algunos lugares se observan lutitas de color gris oscuro y gris claro que alternan con areniscas de grano fino de color gris claro, con algunos lentes de brecha, constituidos por fragmentos de las mismas rocas; la secuencia presenta metamorfismo incipiente y mineralización de sulfuros.

El contacto inferior de esta unidad no está expuesto en el área; en algunos lugares la secuencia subyace a un conglomerado masivo constituido por clastos redondeados de caliza, areniscas y lutitas de color gris verdoso, con tamaño menor a 15 cm, en una matriz arenosa y cementados por carbonatos. Burrows (1910) denominó a estos sedimentos con el nombre de Formación Plomosas y posteriormente Bridges (1962) los asignó al Pérmico. En 1964 le asigna el nombre de Formación Verde y la separa de la subyacente Formación Plomosas.

MESOZOICO

Lutita-Arenisca Js (Lu-ar). Secuencia sedimentaria constituida por lutitas, areniscas y calizas depositadas en ambiente lagunar. Las areniscas son de grano fino, de color rojo y café en roca fresca y color café oscuro al intemperismo. Se presentan en estratos delgados que alternan, en ocasiones, con lutitas carbonosas físilas, con fracturas en lajas circulares veteadas de calcita en rejilla y con amonitas mal conservadas y con horizontes delgados de caliza nodular color negro en roca fresca y color gris al intemperismo, con pequeños cristales de pirita diseminados e impresiones de amonita. Por su contenido faunístico de amonitas, se le asigna una edad que va del Kimmerdígiano Inferior al Portlandiano Superior.

Esta unidad corresponde a la Formación La Casita que subyace discordantemente a los sedimentos pérmicos. El límite superior de esta unidad está marcado abruptamente por las areniscas rojizas de la Formación Las Vigas del Cretácico Inferior. Aflora al norte de la sierra de Chorreras con una morfología de montañas con pendientes suaves.

Lutita-Arenisca Ki (lu-ar). Unidad constituida por la alternancia de calizas, lutitas, limolitas y areniscas principalmente, aunque también se encuentran algunos horizontes de yeso y de conglomerados. La secuencia fue depositada en un ambiente de plataforma somera a lagunar.

Esta unidad corresponde a la Formación Navarrete, la cual está cubierta de manera concordante por una alternancia de lutitas y areniscas de la Formación Las Vigas. Aflora en las sierras El Soldado, Chorreras, La Amargosa y Roque.

Las areniscas varían de ortocuarcitas a arcosas, son de grano medio a grueso, de color rosa y rojo; presentan estratificación cruzada y contienen fragmentos de troncos petrificados. Los estratos varían de delgados a medianos. La unidad incluye algunos horizontes de calizas arcillosas fosilíferas con amonitas, ostreas, gasterópodos y troncos petrificados.

Se observan calizas arenosas de color gris, negro, verde y amarillo, en estratos que varían de delgados a medianos, con huellas de desecación en concreciones arcillosas.

Esta unidad corresponde a la Formación Las Vigas, por su posición estratigráfica se le asigna una edad que corresponde al periodo Valanginiano Superior-Barremaniano y se correlaciona con las formaciones Taraises y Cupido del estado de Coahuila. Su contacto inferior es concordante con los sedimentos arcillo-arenosos del grupo La Casita del Jurásico Superior. Su contacto superior es transicional con la Formación Cuchillo y se define por la presencia de caliza biógena que caracteriza a la base de esta última.

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 con ostras, pelecípodos y gasterópodos.

En algunos afloramientos las calizas son arenosas, de color ocre, y contienen nódulos de pedernal, óxidos de hierro diseminado y en vetillas, dispuestas en estratos gruesos que alternan con lutitas de color café claro y gris. 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 de color amarillo claro.

Esta unidad corresponde a la Formación Cuchillo del Aptiano-Albiano Inferior. El contacto inferior de esta formación es transicional con la Formación 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.

Caliza-Lutita Ki (cz-lu). La descripción de esta unidad incluye a las formaciones Calizas, Lutitas Sin Nombre y Benavides que presentan características litológicas semejantes y están separadas por una unidad de calizas masivas ya descrita dentro de la unidad calcárea del Cretácico Inferior: Formación Finlay. La formación Calizas y Lutitas Sin Nombre están constituidas por una alternancia de calizas y lutitas que se depositaron en un ambiente nerítico, interno a medio.

Las calizas son del tipo mudstone, nodulares y arcillosas, de color gris y en estratos que van de delgados a medianos con pelecípodos, miliólidos, gasterópodos y equinodermos; intercaladas con estratos medianos de lutitas calcáreas de color gris verdoso. Los contactos de la formación son nítidos y concordantes, delimitados por las capas potentes y masivas de caliza de la cima de la Formación Benigno y de la base de la Formación Finlay. Por su posición estratigráfica se le ubicó en el Albiano Medio; se correlaciona con parte de la Formación Aurora del estado de Coahuila.

La Formación Benavides está constituida por una secuencia de lutitas y calcarenitas que se depositaron en un ambiente nerítico, interno a medio. La caliza es del tipo mudstone, color gris claro, con textura sacaroide; dispuesta en estratos gruesos, con nódulos de pedernal, fragmentos fósiles y aparece intercalada con calizas arenosas, lutitas y limolitas. La secuencia presenta colores que varían de amarillo claro a verde y contiene pseudomorfo y concreciones de pirita hematizados.

Su edad es Albiano Medio-Albiano Superior determinada por la presencia del amonita Oxitropidóceras. Forma generalmente valles erosionales limitados por capas de caliza masiva de las formaciones adyacentes.

Caliza Ki (cz). La descripción de esta unidad comprende a tres formaciones que presentan características litológicas semejantes y que se encuentran separadas entre sí por dos formaciones calcáreas-arcillosas: Calizas y Lutitas Sin Nombre y Benavides.

La primera es la Formación Benigno, constituida por caliza masiva que lateralmente cambia a caliza nodular, de color gris claro, en estratos que varían de gruesos a masivos, presenta rasgos de disolución y contiene nódulos de pedernal y de óxidos, y fósiles miliólidos, gasterópodos, orbitolinas, tuocasias y caprínidos. Esta formación está asignada por su posición stratigráfica al Albiano Inferior- Medio y es correlacionable con parte de la Formación Aurora del estado de Coahuila. Sobreyace concordantemente a la Formación Cuchillo y subyace de igual forma a la Formación Calizas y Lutitas Sin Nombre.

La segunda es la Formación Finlay, constituida por caliza masiva con capas esporádicas de areniscas, depositada en un ambiente nerítico interno a medio con presencia de rudistas que indican el desarrollo de bancos arrecifales.

La caliza es del tipo mudstone, arcillosa, de color gris oscuro, en estratos que van de medianos a gruesos, contiene espículas de esponja, tuocasias y caprínidos.

Se presenta una caliza del tipo wackestone de color gris oscuro, con bandas y nódulos de pedernal, algas, miliólidos, gasterópodos, equinodermos, espículas de esponja, tuocasias y caprínidos, situada por posición stratigráfica dentro del Albiano Medio y es correlacionable con parte de la Formación Aurora del estado de Coahuila. Sus contactos inferior y superior son nítidos y concordantes con las formaciones Calizas y Lutitas Sin Nombre y Benavides, respectivamente.

La tercera es la Formación Loma de Plata, constituida por caliza masiva nodular que se depositó en un ambiente nerítico interno a medio con presencia de toucasias y caprínidos que reflejan el desarrollo de arrecifes. La caliza es de 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 de color gris oscuro, en estratos gruesos, a masivos, con bioclásticos de gasterópodos, toucasias y esprínidos. Sus contactos inferior y superior son concordantes. Su edad Albiano Superior está determinada por su posición.

Caliza-Lutita Ks (cz-lu). La descripción de esta unidad comprende 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 calizas 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 con gasterópodos y amonitas hematizadas; está intercalada con calcilutitas y lutitas laminares en colores verde amarillo y café y con esporádicos horizontes de yeso.

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.

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 intercalados 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 la caliza compacta que pertenece a la Formación Buda.

El contacto superior es concordante también y se marca con la aparición de las primeras capas de areniscas de la Formación San Carlos. Su edad es del Cenomaniano Superior-Turoniano.

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, dispuesta en estratos que varían de medianos a gruesos y contiene pelecípodos, gasterópodos, globigerínidos, amonitas y espículas de esponja.

Esta unidad corresponde a la Formación Buda y sus contactos inferior y superior son nítidos y concordantes con la Formación Del Río y Formación Ojinaga, respectivamente. 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.

Arenisca Ks (ar). Unidad constituida por areniscas intercaladas con lutitas y evaporitas que se acumularon en ambiente litoral a continental.

Las areniscas son de grano medio, de color amarillo y café, en estratos que van de medianos a delgados, con abundantes ostras y turritelas, que alternan con capas delgadas de lutitas color café oscuro y delgados horizontes de yeso. En ocasiones las areniscas son calcáreas de color amarillo pardo, en estratos delgados, que contienen ostras, gasterópodos, concreciones de óxidos y pseudomorfos de pirita.

Esta unidad corresponde a la Formación San Carlos y su contacto inferior es concordante con las últimas capas de caliza arcillosa pertenecientes a la Formación Ojinaga. Se le asigna una edad comprendida entre el Coniaciano y el Campaniano Inferior, que conforman lomeríos de pendientes suaves.

CENOZOICO

Conglomerado Ts (cg). Esta unidad está constituida por conglomerados polimícticos de clastos de rocas volcánicas y sedimentarias, que presentan un grado de redondez que varía de subredondeado a bien redondeado y un rango granulométrico amplio. Los conglomerados tienen en ocasiones matriz areno-arcillosa, están medianamente compactados y pobremente cementados por carbonatos, arcillas y óxidos.

La unidad se presenta en ocasiones intercalada con delgados horizontes de arenisca conglomerática. El color predominante de esta unidad es el ocre. Forma lomeríos medianamente disectados.

Aluvial Q(al). Unidad que incluye a los depósitos recientes de origen aluvial y proluvial. Estos depósitos están constituidos por fragmentos líticos y de minerales.

Entre los líticos destacan los de rocas volcánicas y de rocas sedimentarias, mientras que entre los de minerales, los fragmentos de feldespato y los de cuarzo. La unidad forma los abanicos aluviales y las planicies de la zona.

Rocas Ígneas

CENOZOICO

Granito T (Gr). Esta unidad está constituida por granito de muscovita, de textura holocristalina equigranular. El granito es de color gris claro, con tono verde en superficie fresca, mientras que en superficie intemperizada presenta color café. La unidad se presenta poco fracturada. Se encuentra emplazada en las rocas paleozoicas al oeste de Aldama y se presenta como un gran promontorio de peñascos redondeados que contrasta con las rocas circundantes.

Granodiorita T (Gd). Esta unidad consiste en granodioritas de texturas cristalinas equigranular, generalmente de grano grueso y de color gris claro, que presentan frecuentemente intemperismo esferoidal. Estas granodioritas están emplazadas en las unidades calcáreas del Cretácico Inferior.

Toba Ácida T (Ta). Unidad constituida principalmente por tobas riolíticas de color gris con tonalidades rojizas y moradas que intemperizan a un color ocre. Las tobas presentan fenocristales de cuarzo y líticos en una matriz vítreo-cristalina con biotita, generalmente como mineral accesorio. Presenta además diversos ferromagnesianos; su estructura se observa vesicular y en ocasiones brechoide y con pseudoestratificación. La mayor parte de esta unidad es de tobas ignimbríticas en las que los constituyentes se encuentran arqueados y aplanados, y con una textura pseudofluidal.

Riolita Toba Ácida T (R-Ta). En esta unidad comprende una intercalación de riolitas y tobas ácidas. Las riolitas son de texturas eutaxíticas, de colores gris y café rojizo e intemperizan en tonos amarillos y café oscuro; sus minerales son fenocristales de cuarzo y plagioclasa; las tobas ácidas son de color gris con tonos rosa y aparecen pseudoestratificadas, fracturadas y afectadas por diques riolíticos, en ocasiones incluyen pequeños cuerpos de brecha volcánica y riolacitas.

Esta unidad se encuentra cubriendo a las rocas cretácicas. Tiene una morfología de lomeríos, cerros alargados y de montañas altas.

Riolita T(R). Riolita de textura eutaxítica, con fenocristales de cuarzo y plagioclasa de color gris y café rojizo que al intemperismo adquiere tonos amarillos y café rojizo; en ocasiones contiene esferulitas y presenta pseudoestratificación. Sobreyace a las unidades piroclásticas terciarias.

Toba Acida-Brecha Volcanica Acida T (Ta-Bva). Secuencia de tobas ignimbríticas de color gris claro, gris oscuro, rosa y café; dispuestas en pseudocapas de espesor variable entre 3 y 5 metros, intercaladas con brechas de fragmentos angulosos de 10 a 30 cm aproximadamente y con muy esporádicos derrames de andesita. Aflora en las partes bajas con una morfología de lomas y en las partes topográficamente más altas corona las rocas marinas cretácicas, a las que cubre en forma discordante.

Basalto Ts (B). Unidad constituida por derrames de basalto de olivino, de textura intergranular porfídica con fenocristales de olivino y de plagioclasa; en ocasiones presenta amígdalas de sílice y el aspecto de una roca vítrea. Aflora esporádicamente en el área, formando mesetas muy disectadas.

4.2 Geología estructural

El marco estructural es producto de los esfuerzos compresivos de la orogenia Laramide seguidos de una tectónica transcurrente y finalmente un evento extensional que como resultado ocasionó la morfología actual de la región. Las rocas precámbricas y paleozoicas fueron afectadas por la orogenia Ouachitana que les produjo un metamorfismo térmico de bajo grado (Denison, 1971) y un intenso plegamiento (Handschy, 1987; Ross, 1979).

Las rocas mesozoicas tienen un plegamiento asimétrico en las sierras Gómez, El Morrión y El Soldado, ubicadas al noroccidente, el cual sufre una brusca inflexión hacia el suroriente, donde es atravesado por el río Conchos y cambia de dirección.

Este cambio brusco en la dirección del plegamiento laramídico aparentemente refleja una discontinuidad en el tipo de basamento de la región y está relacionado con la localización en el subsuelo del cinturón estructural Ouachitano (James y Henry, 1993).

Las rocas volcánicas de más de 30 Ma de edad presentan un plegamiento simétrico muy suave y un radio de curvatura muy amplio. Las rocas volcánicas más jóvenes solo están afectadas por el fallamiento normal de Cuencas y Sierras que cortan a toda la columna geológica.

Los rasgos estructurales más notables son un sistema de fallas que limitan bloques levantados y fosas tectónicas con longitudes a rumbo de varios kilómetros y desplazamientos normales de 300 m (Gunderson, 1986).

En la parte oriental, una serie de fallas normales define a la falla de Juárez, con un componente de movimiento sinistral, de 400 km de longitud, que cruza todo el estado de Chihuahua (Eguiluz, 1984). La traza de esta falla está definida por una serie de valles alargados, lagunas secas y por la desviación del curso del río Conchos; constituye el límite oriental de la plataforma de Aldama.

El principal desplazamiento del fallamiento de Cuencas y Sierras fue normal con un componente menor de deslizamiento lateral derecho sobre fallas preexistentes. Otros rasgos notables son las estructuras de caldera asociadas al vulcanismo oligocénico, como las de Pastorías y Santo Domingo, esta última al parecer controla estructuralmente la mineralización de Santa Eulalia (Megaw, 1990).

4.3 Geología del subsuelo

La información geofísica del subsuelo (2006) permite identificar que las unidades litológicas presentan variaciones en el sentido tanto horizontal como vertical.

Debajo del material que rellena los valles, constituido por conglomerados y depósitos aluviales, los cuales en algunos en ocasiones alternan lateralmente con riolitas y tobas ácidas, se aloja la secuencia sedimentaria de edad terciaria constituida por arenisca y lutitas.

Las figuras 3 y 4 presentan perfiles geológicos, en los que se observa la disposición de las unidades en el subsuelo, así como las estructuras geológicas, la profundidad al basamento y las fronteras laterales, lo que ayuda a comprender el modelo hidrogeológico del acuífero.

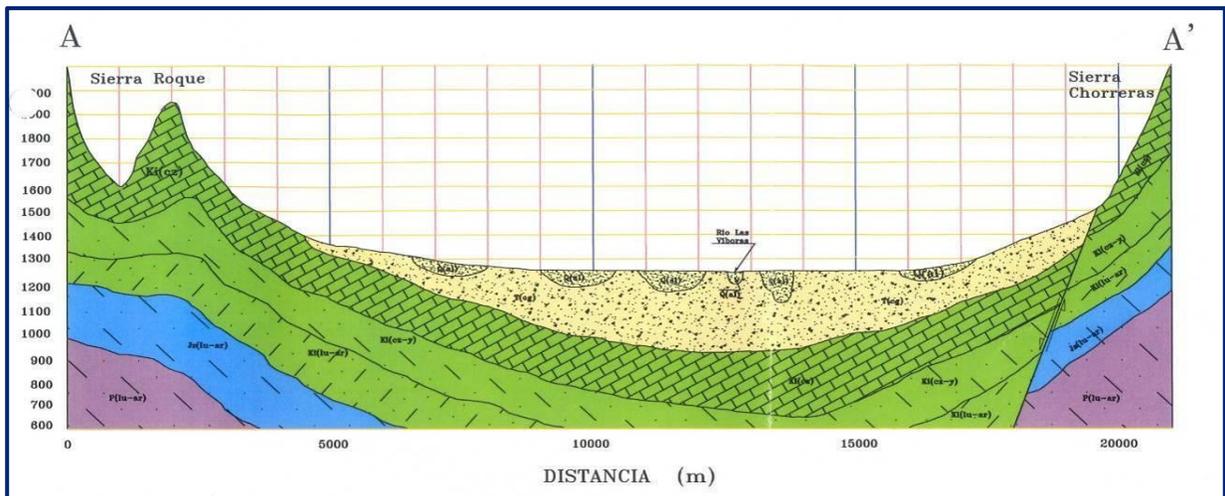


Figura 3. Sección geológica esquemática A-A'

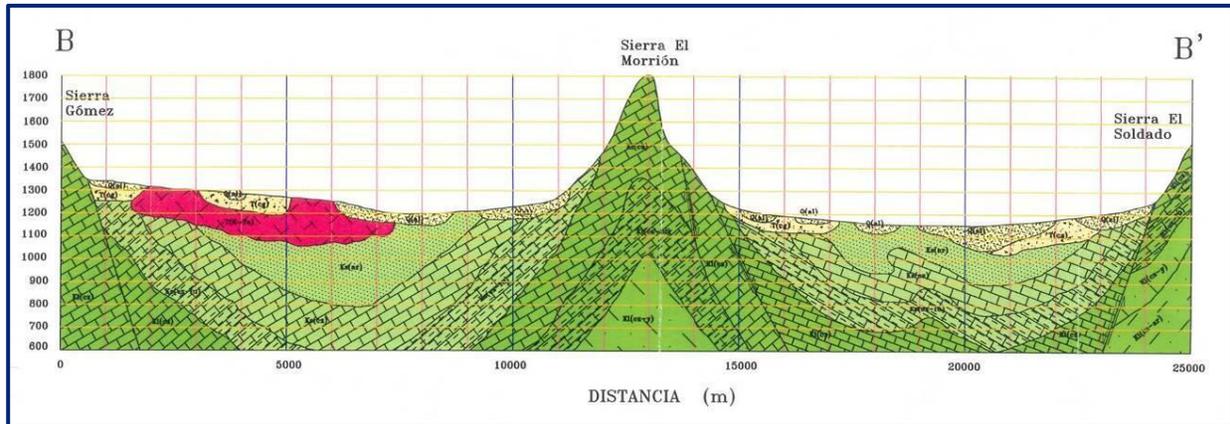


Figura 4. Sección geológica esquemática B-B'

5. HIDROGEOLOGIA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero se encuentra alojando en depósitos aluviales y conglomerados que rellenan los valles, y la secuencia de rocas de baja permeabilidad constituida por areniscas y lutitas. Las dimensiones del acuífero no son evidentes, como sería el caso de un acuífero alojado en una fosa tectónica.

Para este caso, existe una sobreposición errática de diferentes unidades litológicas, con diferente grado de permeabilidad y saturación. El acuífero, por lo tanto, se puede clasificar como **libre**, con condiciones locales de semiconfinamiento.

La secuencia de rocas sedimentarias constituidas por areniscas y lutitas, constituye el acuífero actualmente en explotación. Estas rocas se encuentran parcialmente cubiertas por delgadas capas de aluvión y conglomerado.

La recarga al acuífero proviene de la infiltración directa de la precipitación y a través de los arroyos y corrientes superficiales; en tanto que su descarga natural ocurre por flujo subterráneo hacia el río Conchos y por evapotranspiración en las proximidades de esta corriente efluente.

De acuerdo con sus propiedades físicas, las unidades litológicas presentes en el subsuelo pueden ser agrupadas en las cuatro unidades hidrogeológicas que se describen a continuación:

UH1. Esta unidad está constituida por una secuencia de lutitas y areniscas; calizas y lutitas, de características semejantes a las formaciones Del Río y Ojinaga, alojada en los valles.

Este paquete sedimentario del Cretácico Superior, está cubierto parcialmente por conglomerados de edad terciaria que presentan una matriz arcillosa, y ocasionalmente por depósitos aluviales del Cuaternario. El espesor de esta unidad es superior a los 200 m, llegando a alcanzar hasta los 500 m. La permeabilidad de esta unidad es muy baja.

UH2. Unidad formada por rocas volcánicas terciarias, de origen ígneo, que presentan permeabilidad secundaria por efecto del fracturamiento. En el suelo se encuentra saturada y en superficie constituye zonas de recarga.

UH3. Esta unidad está constituida por calizas del Cretácico Inferior que presentan porosidad secundaria debido a la disolución. Agrupa a las formaciones Benigno, Finlay y Loma de Plata. Hacia las estribaciones de las sierras, su contacto con rocas menos permeables origina manantiales, siendo el más importante el de Chorreras. En el subsuelo constituye un acuífero.

UH4. Constituida por las rocas más antiguas presentes en el área, pertenecientes al Jurásico y Paleozoico. Está conformada por una secuencia de areniscas, lutitas y calizas, con horizontes de yeso; que en conjunto presentan baja permeabilidad y se consideran el basamento de la región.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2006, se ejecutaron 3 pruebas de bombeo, en etapa de abatimiento, cuya duración varió de 3 a 8 horas, dado el bajo rendimiento de los aprovechamientos.

Los pozos ubicados en los ranchos de San Ignacio y El Rayo, penetran el paquete sedimentario, donde se identifican areniscas, lutitas y calizas, correspondiente a la unidad hidrogeológica UH1. Si consideramos un espesor medio de 250 m para este depósito, se obtienen valores de transmisividad de 3.17×10^{-7} y 0.46×10^{-7} m/s respectivamente.

La transmisividad es baja y corresponde a areniscas con disolución y lutitas con fracturamiento, que presentan baja porosidad (aproximadamente de 0.5 %). De esta manera es posible asignar a la unidad hidrogeológica UH1 un valor medio de transmisividad de 1.5×10^{-7} m/s y una porosidad de 0.5%.

El pozo ubicado en el rancho Tres Marías fue perforado en el paquete de rocas volcánicas, identificado como la unidad UH2.

Si para esta unidad se considera un espesor de 100 m, se obtiene un valor de transmisividad de 8.24×10^{-7} m/s, que corresponde al rango de las rocas volcánicas fracturadas, con baja porosidad (del orden de 1%).

Estos parámetros se asignan a la unidad UH2. Debido a que las pruebas de bombeo no contaron con pozo de observación, no se pudo estimar el valor del coeficiente de almacenamiento, pero éste debe variar entre los valores asignados a los acuíferos libres y semiconfinados.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible para 2006.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Por el comportamiento piezométrico se pueden identificar tres zonas en el acuífero (figura 5). En la primera zona, las profundidades de los niveles del agua en el acuífero varían entre 90 y 2 m; las profundidades mayores se ubican en la porción norte, donde la carretera Chihuahua – Ojinaga intercepta esta área. Conforme se avanza hacia el sur y sureste los niveles son cada vez menos profundos, hasta alcanzar los 2 m en la porción sur de este valle, en las captaciones situadas en las proximidades de los arroyos Grande y Bajío La Mota, cerca de su confluencia con el río Conchos.

En la segunda zona, los niveles de la profundidad al nivel del agua subterránea varían entre 5 y 12 m, correspondiendo las profundidades mayores a la porción norte y las menores a la sur, hacia la comunidad El Potrero, próxima a la margen izquierda del río Conchos.

En la tercera zona, ubicada al sureste, la profundidad varía entre 2 y 40 m; las mayores profundidades corresponden a captaciones próximas a las estribaciones orientales de la sierra La Amargosa y las menores al norte del valle, en la región próxima al arroyo Chorreras o Las Víboras.

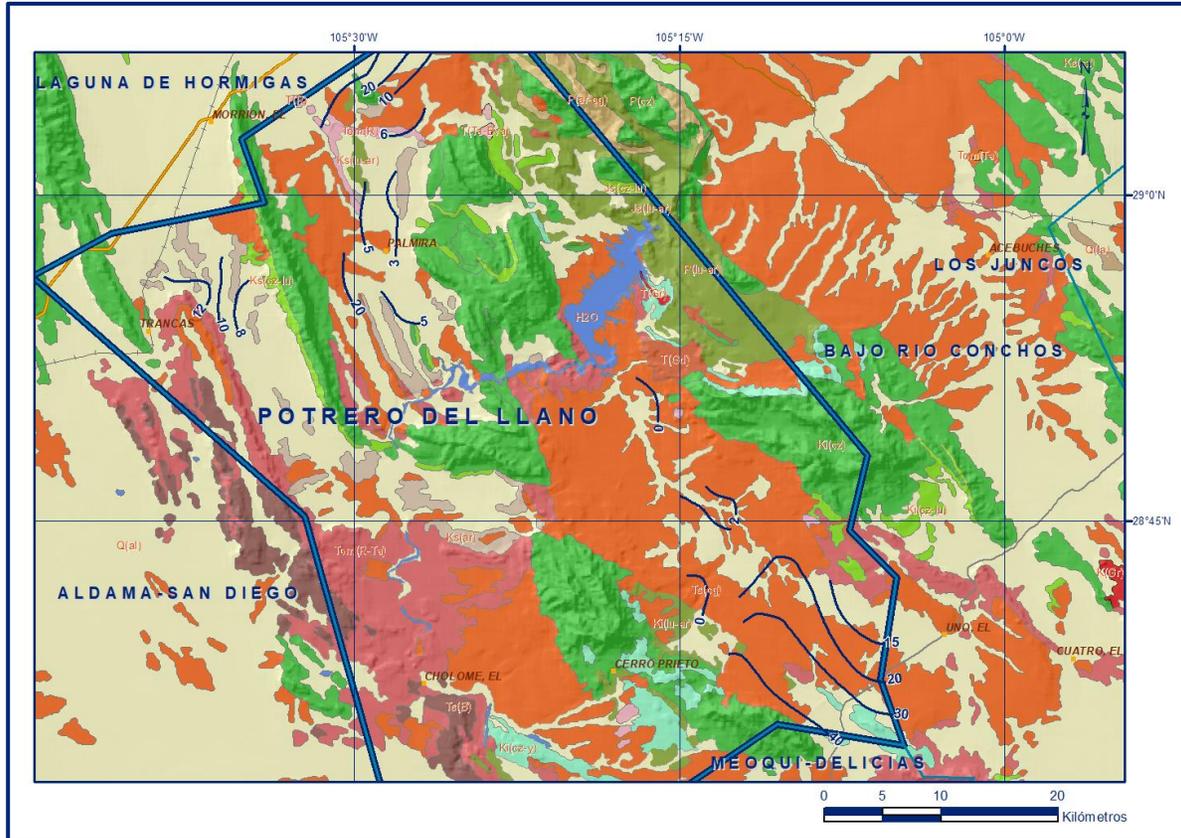


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2006)

5.4.2 Elevación del nivel estático

Haciendo referencia a las zonas del acuífero mencionadas anteriormente, es posible observar que en la primera de ellas la elevación piezométrica del acuífero es mayor en la porción nororiental, cerca del cerro El Placer, donde se tienen valores de 1,400 msnm, las cuales descienden gradualmente hacia el suroeste y sur, hasta alcanzar niveles de 1,050 msnm, cerca del río Conchos.

De esta manera se establece en este valle un flujo subterráneo con dos direcciones predominantes una noreste-suroeste y otra norte-sur; los ligeros cambios en el gradiente piezométrico parecen obedecer a cambios en la permeabilidad de los materiales que forman el acuífero en esta área (figura 6).

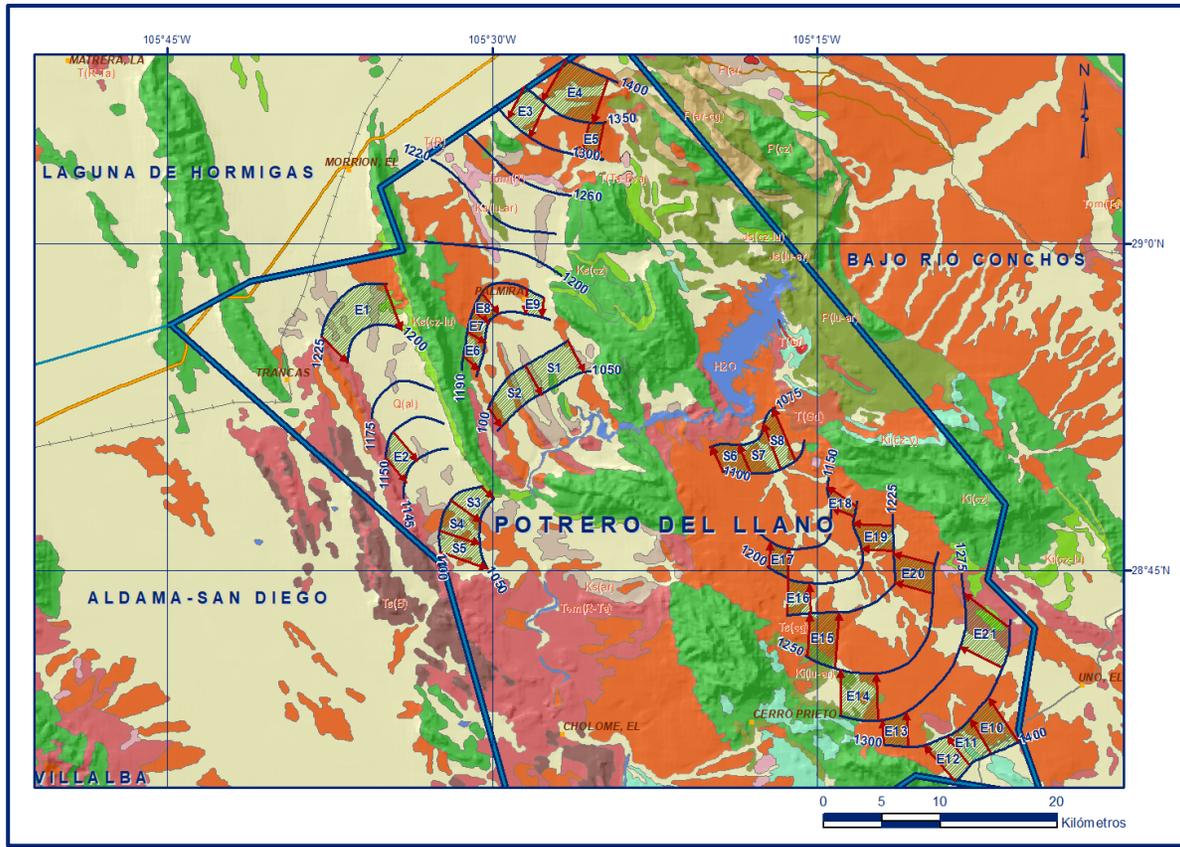


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2006)

En la segunda área las elevaciones de la superficie piezométrica varían entre 1,250 y 1,050 msnm correspondiendo los valores mayores a la porción norte y los menores a la porción sur, reflejando una dirección del flujo subterráneo de norte a sur, hacia el río Conchos. Por lo que respecta a la tercera área, las elevaciones de la superficie piezométrica varían entre 1,400 y 1,075 msnm, correspondiendo los valores mayores a la porción suroriental y las menores a la porción noroccidental de este valle, cerca del lugar conocido como El Atascadero.

De esta manera el flujo de agua subterránea de esta porción del acuífero tiene una dirección preferente sureste–noroeste, descargando con un gradiente piezométrico del orden de 0.0102 hacia el almacenamiento superficial que constituye la presa El Granero.

En la zona de los manantiales de Babisas la elevación piezométrica es de 1,100 msnm. En general el flujo es convergente hacia el tramo del río Conchos que pasa por el área del acuífero. En el valle que se encuentra en la porción noroccidental y que está delimitado por las sierras de El Morrión, Gómez y Cuesta El Infierno, el flujo tiene una dirección preferencial de noroeste-sureste con gradiente promedio de 6.25 al millar.

En el valle ubicado en la porción centro-norte, el flujo tiene dos direcciones preferenciales, la primera es noreste-suroeste, y la segunda es noroeste-sureste, esto es en el valle donde se encuentra la Colonia Allende, los gradientes de estas dos componentes de flujo, son de 12.8 y 13.6 al millar respectivamente. En el valle del arroyo de Chorreras o Las Víboras, el flujo del agua subterránea tiene una dirección sureste-noroeste con una pendiente de 10.6 al millar. El flujo de agua subterránea en estos valles es de las partes topográficamente más altas hacia la corriente del río Conchos, constituyendo esta corriente el dren del acuífero.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos (1980 y 2000) se encuentran dispersas en tiempo y espacio, no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero y no manifiestan cambios significativos.

Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos, debido a que el volumen de extracción es incipiente aún. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser **nulo**.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2006, se analizaron 15 muestras de agua subterránea en pozos distribuidos a lo largo del acuífero para su análisis físicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total, alcalinidad y sólidos totales disueltos.

Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis físicoquímicos, se puede observar que los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 380 a 3,286 mg/l. De las muestras analizadas, en 9 de ellas la concentración de STD supera las 1,000 ppm que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Las concentraciones que superan la norma, además de los STD, se refieren al sodio, sulfatos, y dureza.

De los 15 sitios muestreados, solamente dos se encuentran en condiciones óptimas para uso doméstico y/o potable. Los valores más altos se ubican hacia la parte alta de los valles, por lo que podemos afirmar que la calidad química del agua está más influenciada por la litología de medio poroso que por la distancia recorrida. Las aguas con bajo contenido de sales, confirman su circulación a través de rocas calizas y volcánicas; y las de alto contenido de sales reflejan su circulación por areniscas y lutitas, de ambiente lacustre.

De lo anterior se puede afirmar que las familias del agua que predominan en las muestras analizadas son la sódica-sulfatada y cálcica-sulfatada.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados reportados en el censo realizado en 2006, se registraron un total de 70 obras que aprovechan las aguas subterráneas, de las cuales 37 son pozos, 19 norias y 14 manantiales. La mayoría de los pozos son someros con profundidades no mayores de 30 m y diámetro de perforación pequeño, aunque existen algunos que alcanzan los 150 m. Las norias son poco profundas, excavadas a mano y de diámetros del orden de 1.20 m. Del total de obras 54 se consideran activas y las 16 restantes inactivas.

De los aprovechamientos activos se extrae por bombeo un volumen anual de **0.2 hm³**, más 6.6 hm³ que se descargan a través de manantiales. Del volumen total, 0.8 hm³ (11.8%) se destinan al uso doméstico-abrevadero, 0.4 (5.9%) para abastecimiento de agua potable y los 5.6 hm³ restantes (82.3%) para usos múltiples (agua potable, agrícola, pecuario).

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS

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 para 2006. 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 de un acuífero:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de **550** km², que corresponde a la zona donde se localizan gran parte de los aprovechamientos de agua subterránea. De esta manera la ecuación de balance propuesta es la siguiente:

$$Eh + Rv - B - Sh - Dm - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Dónde:

Rv: Recarga vertical;

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal;

B: Bombeo;

Dm: Descarga por manantiales;

Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ETR: Evapotranspiración;

$\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

La recarga total que recibe un acuífero está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida que se origina por la infiltración del agua que se destina a las actividades agrícolas, principalmente, ya que es esta región no existen centros de población importantes, que estén ocasionando fugas en las redes de abastecimiento de agua potable o del drenaje.

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga vertical (Rv) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para estimar el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance (1) definida anteriormente:

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

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 área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, 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.

El cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2007 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

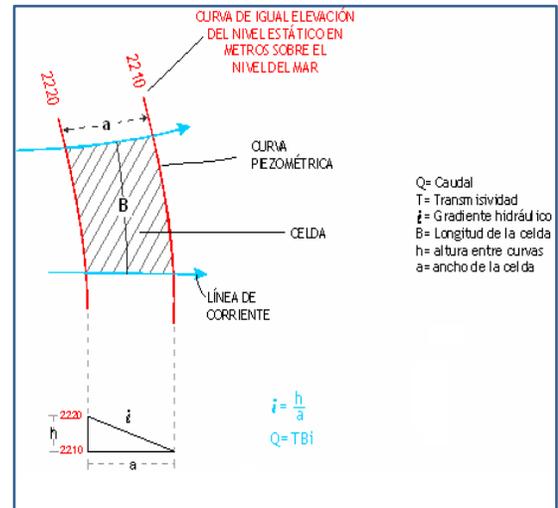
Donde:

Q = Gasto [m^3/s];

T = Transmisividad [m^2 /s];

B = Longitud de la celda [m];

i = Gradiente Hidráulico;



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

El valor estimado de las entradas por flujo subterráneo asciende a **18.9 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal (2006).

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	5700	3200	25	0.00781	0.0010	0.0445	1.4
E2	1500	3000	25	0.00833	0.0010	0.0125	0.4
E3	1600	3700	50	0.01351	0.0010	0.0216	0.7
E4	6700	3800	50	0.01316	0.0010	0.0882	2.8
E5	1400	4400	50	0.01136	0.0010	0.0159	0.5
E6	2000	1100	40	0.03636	0.0007	0.0509	1.6
E7	1500	1400	40	0.02857	0.0007	0.0300	0.9
E8	1600	2500	40	0.01600	0.0007	0.0179	0.6
E9	1200	3400	40	0.01176	0.0007	0.0099	0.3
E10	3200	4400	100	0.02273	0.0008	0.0582	1.8
E11	2500	3600	100	0.02778	0.0008	0.0556	1.8
E12	2500	3800	100	0.02632	0.0008	0.0526	1.7
E13	2500	3500	25	0.00714	0.0006	0.0107	0.3
E14	3200	2400	25	0.01042	0.0006	0.0200	0.6
E15	1900	2800	25	0.00893	0.0006	0.0102	0.3
E16	2400	2800	25	0.00893	0.0006	0.0129	0.4
E17	3400	2700	50	0.01852	0.0006	0.0378	1.2
E18	1200	3500	50	0.01429	0.0006	0.0103	0.3
E19	2900	3200	25	0.00781	0.0006	0.0136	0.4
E20	2000	3700	25	0.00676	0.0006	0.0081	0.3
E21	3500	3600	25	0.00694	0.0008	0.0194	0.6
TOTAL							18.9

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), las salidas subterráneas hacia el vaso de la presa (Sh), la evapotranspiración (ETR) y la descarga a través de manantiales (Dm).

7.2.1 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **0.2 hm³/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas por flujo subterráneo se realizó de la misma manera que la estimación de las entradas subterráneas (tabla 3), con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático de diciembre del 2006 (figura 6).

El valor estimado de las salidas subterráneas es de **10. hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas subterráneas por flujo horizontal (2006).

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	2400	3700	50	0.01351	0.0010	0.0324	1.0
S2	2000	4400	50	0.01136	0.0010	0.0227	0.7
S3	2800	2300	50	0.02174	0.0008	0.0487	1.5
S4	3600	1600	50	0.03125	0.0008	0.0900	2.8
S5	3400	1200	50	0.04167	0.0008	0.1133	3.6
S6	2800	2000	25	0.01250	0.0002	0.0070	0.2
S7	2900	2300	25	0.01087	0.0002	0.0063	0.2
S8	2800	2700	25	0.00926	0.0002	0.0052	0.2
TOTAL							10.2

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Es otro de los mecanismos por los que se descarga agua subterránea de un sistema. Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que toma en cuenta la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR).

El fenómeno de la evapotranspiración se presenta únicamente en lugares donde existen niveles freáticos someros.

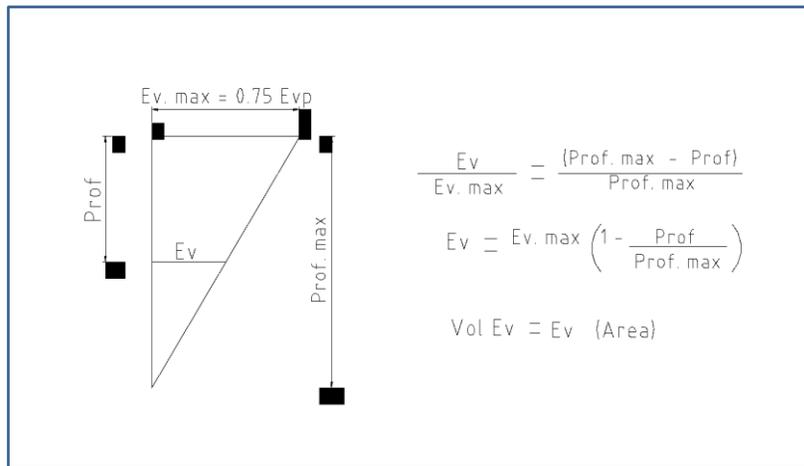
Para el caso particular del acuífero Potrero del Llano, donde existe corrientes superficiales, en algunos tramos con manifestaciones de flujo base, la evapotranspiración se presenta en las proximidades de los arroyos Grande y Las Víboras, en su proximidad a la confluencia con el río Conchos, donde existen niveles freáticos someros y vegetación nativa.

De los datos reportados por evaporímetros en la zona se determina que la evaporación potencial promedio es de 2,188 mm anuales. Si tomamos en cuenta que su valor se determina en un almacenamiento pequeño, usaremos un factor de corrección de 0.75 (Saxton & McGuinness, 1982, p. 235). Únicamente en una superficie 16.0 km² se presentan niveles freáticos someros (6 en la zona de balance 1 y 10 en la zona 2), con un valor máximo de 4 m de profundidad, que corresponde a la profundidad de las raíces de la vegetación nativa de la zona representada por álamos y sauce llorón.

Al considerar la variación que tiene la evaporación con respecto a la profundidad, la evapotranspiración es calculada de la siguiente manera:

$$\text{ETR} = \frac{0.75 (\text{Evaporación Prom.}) (\text{Área})}{\text{Prof. Máxima}}$$

$$\text{ETR} [(0.75) (2.188 \text{ m}) (16.0 \text{ km}^2)]/4 = \mathbf{6.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$



De esta manera el valor estimado de evapotranspiración es de **6.6 hm³/año**.

7.2.4 Descarga por manantiales (Dm)

De acuerdo con los resultados de la hidrometría llevada a cabo durante la realización del estudio de 2006, la descarga de los manantiales ha sido estimada en **6.6 hm³ anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Como se mencionó en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica histórica que comprenda la superficie del acuífero, los escasos registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio.

Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es muy inferior a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de abatimiento. Bajo estas consideraciones, la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes, por lo que para fines del balance de aguas subterráneas el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo; es decir **ΔV(S) = 0 hm³/año**.

Solución de 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) que por efecto de la lluvia se produce en los valles.

Despejando este término de la ecuación (2) definida, se tiene:

$$Rv = Sh + B + Dm + ETR - \Delta V(S) - Eh \text{ ---- (2)}$$

$$Rv = 10.3 + 0.2 + 6.6 + 6.6 - 0 - 18.9$$

$$\mathbf{Rv = 4.8 \text{ hm}^3/\text{año.}}$$

De esta manera la recarga total media anual (R) es igual a la suma de las entradas:

$$R = Rv + Eh$$

$$R = 4.8 + 18.9 = 23.7$$

$$\mathbf{R = 23.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

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:

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

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_t), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida.

Para este caso, su valor es de **23.7 hm³**, de los cuales 4.8 pertenecen a la recarga vertical y 18.9 a las entradas horizontales.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso, se consideró una descarga natural comprometida de **8.5 hm³ anuales**, de los cuales 6.6 corresponden a la descarga por medio de manantiales, 0.6 a la salida subterránea que tiende a descargar en la Presa “El Granero” y los 1.3 hm³ restantes al 20% de la evapotranspiración.

8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (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 **9,810,760 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 23.7 - 8.5 - 9.810760 \\ \text{DMA} &= 5.389240 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **5,389,240 m³ anuales**.

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