

***Actualización de la disponibilidad media anual
de agua en el acuífero Conejos-Médanos
(0823), Estado de Chihuahua***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación
20 de abril de 2015*

Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CCXCVIII REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "RÍO BRAVO"

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					

ESTADO DE CHIHUAHUA

0823	CONEJOS-MÉDANOS	18.8	0.0	5.805650	18.9	12.994350	0.000000
------	-----------------	------	-----	----------	------	-----------	----------

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



Comisión Nacional del Agua
Subdirección General Técnica
Gerencia de Aguas Subterráneas
Subgerencia de Evaluación y
Ordenamiento de Acuíferos

**DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA
EN EL ACUÍFERO 0823 CONEJOS-MÉDANOS, ESTADO
DE CHIHUAHUA**

México D.F., Octubre de 2009

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.....	7
3.3. Hidrografía	7
3.4. Geomorfología	8
4. GEOLOGÍA.....	9
4.1. Estratigrafía.....	10
4.2. Geología Estructural.....	14
4.3. Geología del Subsuelo	15
5. HIDROGEOLOGÍA	17
5.1. Tipo de Acuífero.....	17
5.2. Parámetros hidráulicos.....	17
5.3. Piezometría	18
5.4. Comportamiento hidráulico.....	18
5.4.1. Profundidad al nivel estático	18
5.4.2. Elevación del nivel estático	18
5.4.3. Evolución del nivel estático	20
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	21
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRANEAS	21
7.1. Entradas.....	21
7.1.1. Recarga vertical por lluvia (Rv)	22
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	22
7.2. Salidas	23
7.2.1. Evapotranspiración (ETR).....	23
7.2.2. Bombeo (B)	25
7.2.3. Salidas subterráneas (Sh)	25
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	26
8. DISPONIBILIDAD	26
8.1. Recarga total media anual (Rt).....	27
8.2. Descarga natural comprometida (DNCOM)	27
8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)	27
8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)	27
9. BIBLIOGRAFIA.....	29

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

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

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

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

1.1. Localización

El acuífero Conejos-Médanos, definido con la clave 0823 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción norte del estado de Chihuahua, cubriendo una superficie de 6138 km². Geográficamente, la zona se encuentra ubicada entre los paralelos 30° 49' y 31° 48' de latitud norte y entre los meridianos 106° 27' y 107° 18' de longitud Oeste.

Colinda al norte con la frontera con Estados Unidos de América, al oriente con los acuíferos Valle de Juárez y Samalayuca, al sur con Laguna de Patos y Laguna de Santa María y al occidente con Las Palmas, todos ellos pertenecientes al estado de Chihuahua (Figura 1).

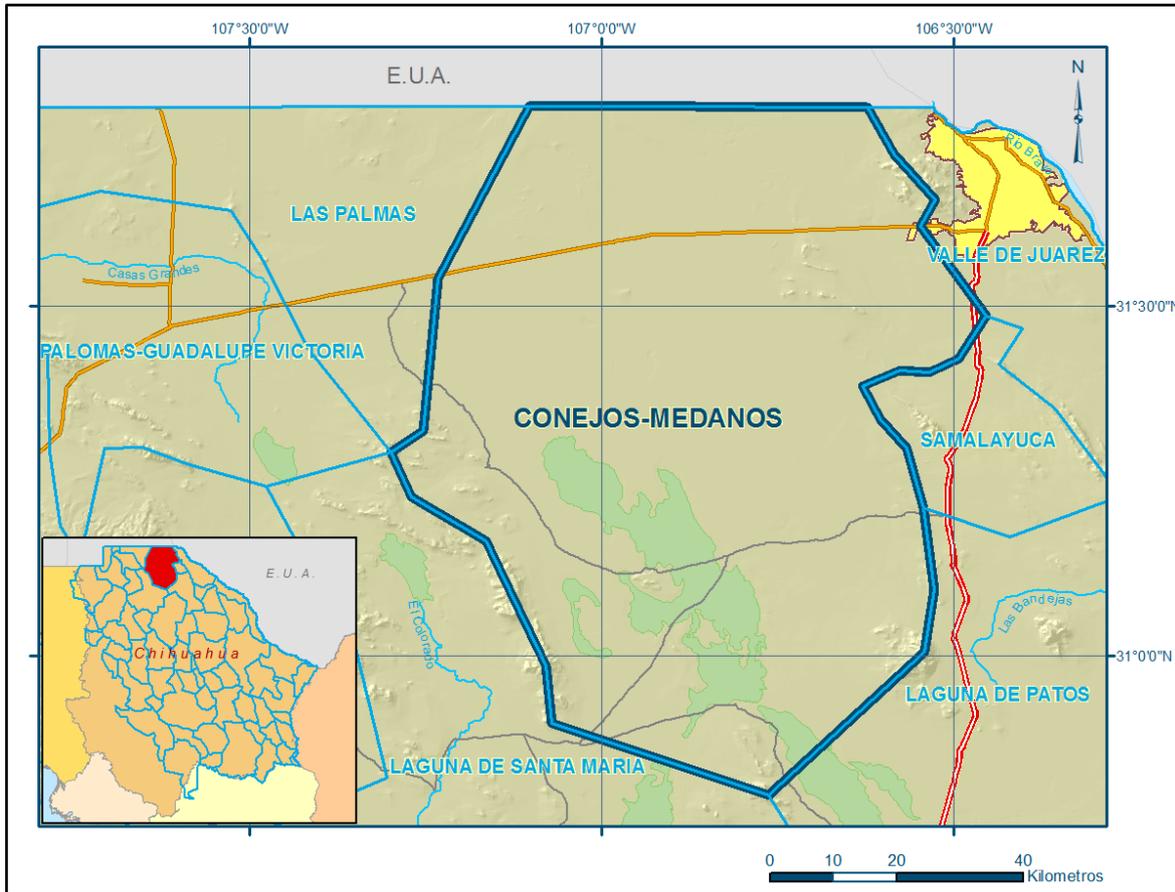


Figura 1. Localización del acuífero Conejos Médanos

Geopolíticamente el acuífero comprende parcialmente los municipios de Ascensión, Juárez y Ahumada. 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 0823 CONEJOS-MEDANOS

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	106	29	32.2	31	25	27.8	
2	106	32	6.3	31	24	19.2	
3	106	34	37.3	31	24	28.3	
4	106	37	44.1	31	23	5.8	
5	106	36	16.5	31	20	14.0	
6	106	34	0.6	31	17	47.6	
7	106	32	32.3	31	12	41.6	
8	106	31	41.3	31	5	37.0	
9	106	32	27.7	31	0	17.8	
10	106	45	49.3	30	48	0.3	
11	107	4	16.2	30	54	11.9	
12	107	4	47.9	30	59	4.5	
13	107	7	26.2	31	4	41.9	
14	107	9	53.9	31	9	49.9	
15	107	16	13.2	31	13	37.2	
16	107	18	1.1	31	17	25.0	
17	107	15	17.0	31	19	14.3	
18	107	13	58.8	31	32	17.8	
19	107	6	14.9	31	47	6.8	DEL 19 AL 20 POR EL LIMITE
20	106	37	21.3	31	47	2.3	
21	106	35	3.0	31	43	1.7	
22	106	31	33.1	31	39	5.4	
23	106	32	49.7	31	36	48.6	
24	106	27	11.4	31	29	6.6	
1	106	29	32.2	31	25	27.8	

1.2. Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero Conejos-Médanos pertenece al Organismo de Cuenca Río Bravo, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Chihuahua. Las porciones noroccidental y occidental de su territorio se encuentran sujetas a las disposiciones del *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en una superficie comprendida en los límites geopolíticos de los Municipios de Ascensión y Janos, Chih., y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento del subsuelo en la región mencionada”*, publicado en el DOF el 25 de abril de 1979. Este decreto es tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Su extremo nororiental, se encuentra sujeto a disposiciones del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas subterráneas al Sureste de Ciudad Juárez, Chih.”* publicado en el DOF el 18 de marzo de 1952. Este decreto es de tipo III, que es la zona de veda en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Por otra parte, toda su porción central no se encuentra sujeta a ningún decreto de veda.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2009), los municipios de Ascensión y Ahumada se localizan en la zona de disponibilidad 4 y el municipio de Juárez en la zona 3.

El uso principal del agua extraída es el sector doméstico/pecuario. Sin embargo con la entrada en operación de la batería de pozos que abastecerá de agua a Ciudad Juárez, el usuario mayor será el Organismo Operador Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).

El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Río Bravo. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo varios estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

SERVICIOS DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA ESTACIÓN CONEJOS-MÉDANOS, EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA (1982). ESTUDIO REALIZADO POR LA EMPRESA SERVICIOS GEOLÓGICOS, S. A PARA LA SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (SARH), cuyo objetivo fue evaluar las características hidrogeológicas de las rocas calcáreas, volcánicas y sedimentos continentales de edad Paleógeno-Neógeno y Reciente, para proponer sitios favorables para la perforación de pozos exploratorios. Incluyó la realización de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's), toma muestra de agua subterránea para análisis químicos y descripción petrográfica de muestras de roca.

Concluye que las unidades geológicas que presentan propiedades más favorables son las Formaciones Benigno y Finlay, así como los depósitos de bolsón y sedimentos aluviales.

ESTUDIO COMPLEMENTARIO DE PROSPECCIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA ZONA CONEJOS-MÉDANOS, CHIHUAHUA (1985). REALIZADO POR LA EMPRESA LESSER Y ASOCIADOS, S.A. PARA SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (SARH). Los resultados de sus sondeos eléctricos y su correlación geológica permiten identificar tres unidades. Una superior de baja permeabilidad, hasta los 40 m; de 40 a 150 m se presenta la unidad intermedia y contiene agua con concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) hasta de 1500 ppm. El horizonte profundo corresponde a un acuífero saturado que presenta altas concentraciones de STD, hasta de 5000 ppm, posiblemente asociadas a la presencia de evaporitas.

ESTUDIO DE GEOFÍSICA EN LA CUENCA DE CONEJOS-MÉDANOS, PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA EN BLOQUE A CIUDAD JUÁREZ, CHIHUAHUA (1988). REALIZADO POR LA EMPRESA TÉCNICAS GEOLÓGICAS Y MINERAS, S. A. DE C. V., con el propósito de evaluar el potencial de una zona próxima a Ciudad Juárez para su abastecimiento de agua potable.

PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA Y PERFORACIÓN EXPLORATORIA DE LA ZONA CONEJOS-MÉDANOS COMO UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE CIUDAD JUÁREZ, CHIH. (1989). REALIZADO POR LA EXTINTA SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (SARH). En este trabajo se analizaron e interpretaron los resultados de estudios de prospección y calidad de agua efectuados anteriormente, así como los resultados del programa de perforaciones exploratorias efectuado por la misma S.A.R.H.

CALIDAD DEL AGUA EN LA ZONA SUR DEL ACUÍFERO CONEJOS MÉDANOS (1999). REALIZADO PARA LA JUNTA MUNICIPAL DE AGUA Y SANEAMIENTO. Entre sus conclusiones más importantes destaca que, de acuerdo con los cortes litológicos de pozos y las secciones geológicas, es posible identificar variaciones horizontales y verticales que conforman 3 grandes paquetes. La granulometría tiene una tendencia general a disminuir su tamaño con la profundidad hasta los 300 m. El flujo subterráneo presenta dos direcciones preferenciales: oeste-este y suroeste-noreste. Define la presencia de dos familias del agua dominantes: clorurada en la porción occidental y sulfatada en la región oriental.

MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE TRANSPORTE DE SOLUTOS DEL ACUÍFERO BOLSÓN DE LA MESILLA (ZONA CONEJOS-MÉDANOS), 2000. JUNTA MUNICIPAL DE AGUA Y SANEAMIENTO. REPORTE TÉCNICO NO. DSGEO-012/00. Analiza la posibilidad de abastecimiento de agua potable a Ciudad Juárez, mediante la operación de 23 pozos perforados en el acuífero. Concluye que con la extracción de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 20 años se ocasionarían abatimientos máximos de 18 metros en la batería de pozos del proyecto de la segunda etapa, mientras que en la línea fronteriza serían del orden de 8 m. Con respecto a la calidad química del agua, el modelo de transporte concluye que al final de los 20 años de operación el frente salino no impacta significativamente el área donde se ubica la batería de

pozos, tendiendo a homogenizar la distribución del agua, debido al aporte de agua proveniente de las porciones norte y noroeste.

DIAGNÓSTICO DE CALIDAD DEL AGUA EN 23 POZOS DEL ACUÍFERO DE CONEJOS-MÉDANOS Y DEFINICIÓN DE LA NECESIDAD DE UNA PLANTA POTABILIZADORA PARA EL PROYECTO CONEJOS-MÉDANOS, JUÁREZ, CHIH. (2000). REALIZADO PARA LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Concluye que algunos pozos presentan concentraciones por arriba de la norma en algunos parámetros como flúor, sodio, fierro, cloruros y sulfatos. Los resultados del modelo de simulación establecen que la capacidad del acuífero permitirá su explotación al menos durante 20 años con abatimientos promedio del orden de 0.70 m por año.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA-SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO (2007). CONVENIO DE COLABORACIÓN PARA REALIZAR ACTIVIDADES HIDROGEOLÓGICAS EN EL ACUÍFERO CONEJOS- MÉDANOS, ESTADO DE CHIHUAHUA. Mediante actividades que incluyeron el censo de aprovechamientos, nivelación de brocales y pruebas de bombeo se plantea el balance de aguas subterráneas. Establece además, una red de monitoreo piezométrico.

Es trabajo constituye la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia Fisiográfica

El acuífero Conejos-Médanos se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte (Basin and Ranges), (Edwin Raisz, 1964), dentro de dos subprovincias: Llanuras y Médanos del Norte, en su mayor parte, y Sierras Plegadas del Norte, en una pequeña área de su porción nororiental.

Fisiográficamente el área se caracteriza por la presencia de largas sierras paralelas, orientadas generalmente en sentido noroeste-sureste, separadas por grandes depresiones llamadas comúnmente “bolsones”, rellenas por sedimentos continentales.

Su expresión morfológica es la de los “bolsones”, es decir, de cuencas con drenaje interno, rodeadas de sierras de las que se extienden las amplias bajadas aluviales sobre las llanuras centrales. En ella alternan llanuras y sierras, más espaciadas en el sureste que en el noroeste. Las sierras son abruptas y se levantan de 500 a 1000 m sobre las llanuras y de 2000 a 3000 m respecto al nivel del mar; gran parte de las sierras están rodeadas de amplias bajadas que las semisepultan. Entre ellas destacan las sierras de Juárez, Sapelló, Samalayuca, Los Muertos, Los Amargosos, entre otras. Las llanuras tienen una altitud de 800 a 100 msnm, dependiendo de su cercanía con el río Bravo. Los aluviones en general cubren los llanos que en ocasiones tienen acumulaciones salitrosas, conocidas localmente como “barriales”.

El origen de la provincia está relacionado, entre otros eventos, con el plegamiento de las secuencias marinas del mesozoico que se desarrollaron sobre un basamento paleozoico y precámbrico, así como con el relleno de fosas tectónicas con sedimentos continentales y algunos

derrames lávicos, que dieron origen a la formación de cuencas endorréicas. Esta provincia se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas ácidas en el oeste (zona próxima a la Sierra Madre Occidental), calizas en el este y norte con dos grandes unidades al noroeste y oeste de Ojinaga. En la parte montañosa de la sierra Agua de Mayo y sus alrededores, ubicada al noreste de Camargo, dominan rocas volcánicas basálticas.

La parte occidental de la provincia queda integrada a la vertiente oriental del continente a través del río Conchos. Este río, procedente de la Sierra Madre Occidental, recibe al noroeste de Parral las aguas del río Balleza, entra a la presa La Boquilla al suroeste de Camargo y de ahí escurre hacia el norte pasando cerca de Delicias, donde recibe nuevos afluentes de la Sierra Madre Occidental. A partir de aquí cambia su dirección hacia el noreste para aportar sus aguas al Río Bravo, cerca de Ojinaga. En el este y sureste de su cuenca imperan condiciones endorreicas; además, carece de redes organizadas y coherentes.

3.2. Clima

El clima de la zona se caracteriza por ser árido y extremo. De acuerdo con la clasificación hecha por Köppen y adaptada por E. García para las condiciones de nuestro país, el clima de la región corresponde al tipo seco o estepario extremo (BWkw), con lluvias en verano que se presentan comúnmente en los meses de julio, agosto y septiembre.

Con base en el análisis climatológico de las estaciones climatológicas ubicadas en Ciudad Juárez, Palomas, Samalayuca y Villa Ahumada, para un periodo de análisis de 1971 a 2000, se determinó que la precipitación media anual es de 167 mm.

La temperatura media anual es de 17.4° C y presenta una variación con tendencia parabólica, que se manifiesta con mayor intensidad durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, decreciendo durante el resto del año. Los valores menores registrados corresponden a los meses de diciembre, enero y febrero.

En cuanto a la evaporación potencial, su valor promedio es del orden de 2400 mm/año.

3.3. Hidrografía

La zona se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrológica No. 34 "Cuencas Cerradas del Norte", dentro de la cuenca del Río Santa María.

Debido a su naturaleza arenosa, que tiende a formar dunas, la permeabilidad alta y la demanda de humedad en la superficie del terreno, las escasas precipitaciones pluviales no originan cauces naturales en la morfología actual. En su caso, existen corrientes superficiales intermitentes cuyo patrón pertenece a pequeñas cuencas cerradas, mismas que escurren cuando se presentan eventos torrenciales durante la época de lluvias, las cuales ocurren de manera aislada en la zona.

3.4. Geomorfología

Desde su colindancia en el noroeste con la Sierra Madre Occidental, hasta unos cuantos kilómetros antes del inicio del río Bravo como límite internacional, la subprovincia Llanuras y Médanos del Norte penetra en territorio chihuahuense con dirección hacia el sureste. Así, se extiende desde la localidad El Berrendo y el occidente de la cabecera municipal de Juárez hasta San Buenaventura y el suroeste de la sierra El Fierro.

Las llanuras, las amplias bajadas, las sierras escarpadas pequeñas y los campos de dunas (médanos) que caracterizan a la región, se extienden hacia el vecino país del norte, de donde la subprovincia en forma digitada se introduce también en el estado de Sonora.

Los ríos Casas Grandes y Santa María penetran por el sur a la subprovincia, para extinguirse en ella. Los aluviones recientes y algunos antiguos conglomerados cubren gran parte de las bajadas y de las llanuras; se presentan importantes afloramientos dispersos de rocas volcánicas ácidas en las sierras y lomeríos y, en menor cantidad, rocas basálticas en el centro de la subprovincia; también afloran calizas en las sierras y lomeríos.

Los médanos de Samalayuca constituyen un gran campo de dunas, el mayor del país, que se abre como abanico al oeste y sur de la cabecera del municipio de Juárez y se extiende hasta territorio de Estados Unidos de América. Las dunas o médanos son montículos móviles de arena, de tipo semilunar (barján), con la convexidad y la pendiente suave hacia la dirección de donde viene el viento (barlovento) y la concavidad y la pendiente más pronunciada del lado opuesto al rumbo de donde viene el viento (sotavento). Las dunas mayores presentan dimensión de unos 10 m de alto y unos 30 m de ancho.

Regionalmente la geomorfología está representada por cinco unidades: Sierras plegadas, Sierras Volcánicas, Planicie Aluvial, Planicie Ondulada y Planicie Lacustre.:

Sierras Plegadas corresponden a las mayores elevaciones representadas por las sierras de Juárez, Sapelló, Presidio y Samalayuca, ubicadas al este-noreste; y las sierras del Máurico, La Nariz y San Blas al oeste-suroeste, todas ellas conformadas por calizas, lutitas y areniscas de edad cretácica, que presentan elevaciones de 1300 a 1880 msnm

Sierras Volcánicas están representadas por las Potrillo Mountains, formadas por basaltos de edad cuaternaria, ubicadas inmediatamente al norte de la línea fronteriza, en la porción noroeste del acuífero. En la porción mexicana sólo se localizan algunos cerros de baja elevación, como los cerros El Venado y El Volcán, cuyas elevaciones varían de 1250 a 1820 msnm

Valle aluvial del Río Bravo se ubica la noreste del acuífero, es una planicie poco inclinada que se extiende hacia el norte, ubicada totalmente en Nuevo México, EUA. Está constituida por gravas, arenas y arcillas de edad cuaternaria y su elevación varía de 1190 a 1250 msnm.

Planicie ondulada está conformada por médanos móviles y fijos de arenas eólicas, que le imprimen una característica muy especial al paisaje. Cubre la mayor parte de la superficie del acuífero y se extiende tanto al norte, hacia los EUA, como hacia el sur-sureste, cubriendo prácticamente la mayor parte del Bolsón de la Mesilla. Su elevación varía de 1185 a 1260 msnm.

Planicie lacustre se ubica hacia el poniente y surponiente. Es una superficie plana con elevación de 1185 msnm que corresponde al lecho de la Laguna El Barreal, representa la zona topográficamente más baja de la región.

4. GEOLOGÍA

Las rocas que afloran en el área son de origen sedimentario, ígneo y metamórfico, y tienen una amplia distribución estratigráfica con edades que varían desde el Triásico-Jurásico hasta el Reciente (Figura 2). La secuencia estratigráfica comprende un potente paquete sedimentario principalmente marino, de miles de metros de espesor, que incluye estratos del Cámbrico al Cretácico Superior; rocas volcánicas cenozoicas, expuestas comúnmente como remanentes de poco espesor; y lechos rojos continentales en la cima de la secuencia (Mioceno Reciente). Los cuerpos intrusivos más abundantes se emplazaron durante el Oligoceno en forma de stocks granitoides.

Los sedimentos marinos fueron plegados y emergidos durante al orogenia Laramide; y desde el Mioceno al Reciente han sido afectados por fallas normales asociadas al episodio extensional de Cuencas y Sierras que le han impreso sus rasgos morfológicos distintivos a esta provincia fisiográfica.

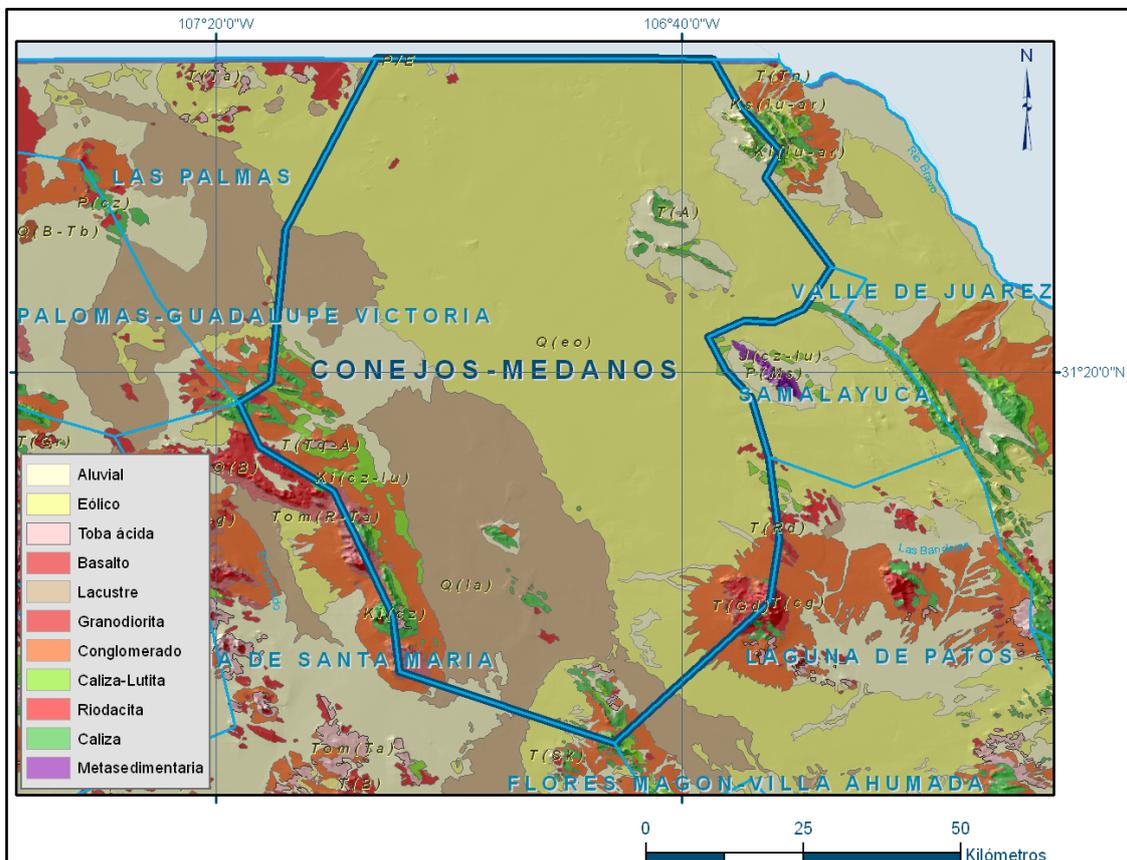


Figura 2. Mapa geológico

4.1. Estratigrafía

El rango estratigráfico de la columna geológica del área, abarca desde el Triásico-Jurásico hasta el Reciente, las unidades litoestratigráficas serán descritas a continuación, de la más antigua a la más reciente.

Triásico-Jurásico Medio

Formación Samalayuca (TRJm Ar-Cgp). Sedimentos constituidos por una secuencia de areniscas y conglomerados formados por fragmentos subredondeados de cuarzo, pedernal y esporádicas calizas. Aflora únicamente en la Sierra de Samalayuca, fuera del área del acuífero. El espesor medido en la Sierra de Samalayuca es de 1,184 m (Valencia R. J. 1968).

Jurásico Superior

Formación La Casita (Jkpo Ar-Lu). Secuencia carbonatada con variaciones litológicas a sedimentos arcillo-arenosos y horizontes arenosos con estratificación cruzada y estratos conglomeráticos. Se distribuye en afloramientos en forma de lomeríos que rodean a la Sierra de Samalayuca. Considerando la litología y la fauna, esta unidad representa un ambiente de depósito marino de plataforma; litoral en zonas de intermarea y submarea (Cuevas L. 1985).

Cretácico Inferior

Formación Navarrete-Las Vigas (Kbeh Ar-Lu). Secuencia calcáreo arcillosa, con anhidritas y yesos en su base. Aflora al noroeste del acuífero, en el cerro El Águila. Esta unidad se encuentra constituida por una secuencia de areniscas y lutitas alternando con horizontes carbonatados y anhidritas hacia la base, mientras que hacia la cima se compone por areniscas de cuarzo de grano fino a medio en estratos de espesor medio de coloración rojiza. Presenta estratificación cruzada, intercalaciones de calizas ligeramente arenosas y lutitas con madera fósil. Su espesor conocido es de alrededor de 200 m.

Formación Cuchillo (Kbap Cz-Lu). Secuencia de calizas arcillosas con intercalaciones de lutitas, areniscas calcáreas, evaporitas y calizas biógenas, cuyo contenido arenoso aumenta hacia el nororiente del área, en las sierras Juárez y San Ignacio, donde se conoce con el nombre de Formación Porvenir. Aflora en la sierra de Juárez, suroeste de la sierra de Presidio, este de la sierra La Nariz y noroeste de la sierra Los Muertos.

Grupo Aurora (Kaim Cz-Lu). Está constituido por las formaciones Coyame, Benigno, Walnut y Edwards. Se trata de una unidad carbonatada de facies de plataforma, intercalada con secuencias arcillosas. Sus principales afloramientos se concentran en las sierras Juárez, La Candelaria y Presidio, además de los ranchos La Pedrera, Los Muertos, La Nariz, y San Blas. El grupo está constituido en su base por calizas color café, en ocasiones arcillosa, dispuestos en estratos gruesos de 20 cm a 2 m de espesor. En la parte media está compuesta de calizas color café de Orbitolinas, ligeramente arcillosa en capas estratificadas de 20 cm a 1.50 m de espesor, así como calizas arcillosas gris oscuro a negro, intercaladas con lutitas calcáreas negras, con ocasionales horizontes arenosos de grano fino, de color gris. En la cima se presenta un potente cuerpo de rocas carbonatadas, en estratos gruesos a masivos con caprínidos y toucasias.

Formación Kiamichi (Kams Cz-Lu). Se define como una secuencia rítmica de rocas calcáreo-arcillosas, de estratos delgados que se distribuye únicamente al norte de la sierra de Juárez. Litológicamente está constituida hacia la base por estratos delgados de lutita calcárea que intemperiza a color amarillo ocre, con interestratificaciones de arenisca de grano fino y calizas nodulares de color gris con horizontes de lutita amarillo ocre. La parte superior consiste de una alternancia de lutita de color gris olivo claro, con lutitas calcáreo-limolíticas en estratos delgados y esporádicos horizontes de caliza nodular y estratos delgados de arenisca con óxidos de fierro. El espesor de esta unidad es aproximadamente de 100 m. El contacto inferior es concordante y transicional con la Formación Edwards y de igual forma con la Formación Loma de Plata, que le sobreyace.

Grupo Washita (Kasce Cz-Lu). Este Grupo está constituido por las Formaciones Loma de Plata, Del Río y Buda. Es una secuencia calcáreo-arcillosa, de estratos delgados, plegados en ocasiones y fuertemente intemperizados. Se distribuye únicamente hacia el noreste de la sierra de Juárez. En la parte basal está constituida por lutitas margosas de color amarillo claro, con estratos de calizas fosilíferas; hacia la parte media lutitas de color pardo rojizo-oscuro. La parte superior de este grupo consiste litológicamente en una alternancia de lutitas amarillentas y calizas nodulares en estratos delgados y caliza densa a masiva, fosilífera de color gris azulado

Paleógeno-Neógeno

En cuanto a rocas del Paleógeno-Neógeno, en el área se presenta la Andesita (TeA), que es una unidad ígnea efusiva compacta, de estructura masiva que se distribuye al norte de la sierra Chilicote, al noreste de la sierra San Rafael, en sierra San Miguel, y al oriente en la sierra Alcaparra.

Toba Riolítica-Ignimbrítica (ToTR-Ig) consiste de tobas vitrocrystalinas, ignimbritas, tobas vítreas y tobas soldadas. Esta unidad constituye el elemento litológico principal de la región dentro de las que se intercalan andesitas, traquitas, latitas y riocacitas. Aflora al sureste de la sierra San Rafael, al sur de la sierra Alcaparra, al norte de la sierra El Hacha, al norte de la sierra Mosqueteros, en la sierra San Ignacio, al oeste de la sierra El Presidio, al norte de la sierra Chilicote y en la sierra La Candelaria. Estratigráficamente se encuentra sobreyacida por rocas volcánicas de composición basáltica, mientras que hacia su base se interdigita con rocas volcánicas de la misma composición. Se presenta cubriendo de manera discordante a rocas calcáreas del Grupo Aurora, y a su vez es cubierta discordantemente por depósitos recientes (QhoCgp y Qholm-ar).

Arenisca-Conglomerado Polimíctico (TpaAr-Cgp). Se define como la secuencia de rocas sedimentarias de origen continental, compuesta por areniscas con intercalaciones de conglomerados polimícticos. Aflora en el extremo oeste de la sierra El Fierro. De acuerdo con observaciones de campo, se le estima un espesor aproximado de 20 a 25 m. Sobreyace discordantemente a rocas del Grupo Aurora e infrayace a riolitas.

Andesita (ToA) es una roca volcánica extrusiva que aflora al norte de la sierra Las Conchas, norte y noroeste de La Candelaria, norte de la sierra Ranchería y al sur de la sierra San Ignacio.

Su espesor, determinado con base en las observaciones y mediciones de campo, es de 400 m. Su contacto inferior es discordante con rocas sedimentarias del Paleógeno-Neógeno, así mismo se encuentra cubierta de manera concordante por brechas volcánicas andesíticas.

Traquita (ToTq). Roca de origen ígneo extrusivo que se observa fracturada y con pseudoestratificación, presenta una expresión morfológica de cerros de gran elevación y pendientes escarpadas. Aflora al oriente de la sierra de San Ignacio. La unidad se observa intercalada en la secuencia y el contacto superior es concordante con tobas latíticas (ToLa).

La Latita (ToLa) es una roca ígnea de origen extrusivo que presenta pseudoestratificación. Se distribuye al sur de la sierra Alcaparra, sur y sureste de la sierra San Rafael, en la porción sur y suroeste de la sierra San Miguel, en la sierra San Ignacio y al sur de la misma. Guarda intercalación estratigráfica con la unidad de tobas riolíticas-ignimbríticas y las traquitas.

Riolita (ToR). Roca ígnea volcánica de origen fisural, de composición riolítica y de estructura fluidal que mantiene relaciones de intrusión con la secuencia de tobas riolíticas e ignimbríticas. Sus afloramientos están definidos al norte de la sierra San Ignacio, oeste de la sierra San Rafael y en el extremo noreste en la sierra El Presidio. Su espesor estimado, de acuerdo con observaciones de campo, fue de 40 m a 50 m. Generalmente sus afloramientos se encuentran alineados en dirección NW-SE. Cabe destacar que esta unidad, en el extremo suroeste, se encuentra desplazada por fallas normales que producen bloques escalonados de saltos mayores de 50 m, con orientación del basculamiento de NW-SE y con echados al NE y SW. Infrayace concordantemente a rocas basálticas y sobreyace, también concordantemente, a la unidad de Brechas andesíticas.

Riolita-Riodacita (ToR-Rd) está representada por emplazamientos riolíticos y riodacíticos con texturas y estructuras muy variables, desde porfídicas hasta fluidales. Se distribuye al este de la sierra La Ranchería y en la sierra La Candelaria. Tiene un espesor promedio de 300 metros. Esta unidad se encuentra cubierta por andesitas (To-A), mientras que su contacto inferior no está bien definido.

Toba Riolítica (ToTR). Se define como un conjunto de tobas riolíticas, tobas cristalovítreas, riolíticas y tobas cristalinas. Se distribuye al suroeste de La Candelaria y al norte de las sierras Las Conchas y Ranchería. Presenta un espesor de 150 metros; el contacto inferior es discordante con las andesitas del Oligoceno como se observa en la sierra La Candelaria y Las Conchas. Se observa subyaciendo a basaltos del Oligoceno.

Basalto (ToB) está integrada por los derrames que coronan a la secuencia de tobas riolíticas e ignimbríticas. Aflora al suroeste de la sierra San Miguel, al noroeste de la sierra San Ignacio y en la sierra San Rafael. Su espesor promedio es de 100 m.

Granito-Granodiorita (ToGr-Gd). Corresponde petrográficamente a una roca granítica con estructura masiva y compacta que aflora en la sierra La Candelaria, al noroeste de la sierra Mosqueteros, en sierra La Ranchería y en la parte norte-oriental de la sierra de Alcaparra.

Arenisca-Conglomerado Polimíctico (TmAr-Cgp) está constituida por una alternancia de areniscas y conglomerados con elementos sedimentarios y volcánicos. Aflora al sureste de la sierra San Rafael y su espesor se estima aproximadamente en 350 m. Sobreyace discordantemente a la secuencia ToTR-Ig y en ocasiones a la unidad ToBvR y su contacto superior se encuentra cubierto por conglomerados polimícticos del Holoceno (QhoCgp); sin embargo, estratigráficamente se asume que es cubierta por basaltos TmB.

Conglomerado Polimíctico (TpiCgp) se distribuye en las sierras San Miguel y Chilicote, y al sureste de la sierra San Rafael. Están compuestos principalmente de fragmentos de rocas ígneas extrusivas como latitas, andesitas, tobas riolíticas y en menor proporción de calizas. Su espesor varía desde unos cuantos metros a 200 en las partes bajas. Se encuentra sobreyaciendo de manera indistinta a diversas unidades entre las que se encuentran la TeA, ToTR-Ig, ToR, ToTq, TmB y KmCgo, y KceLu-Cz; el contacto superior es discordante con el conglomerado polimíctico (QhoCgp) del Holoceno.

Basalto (TpiQpt B) es una roca ígnea extrusiva que se distribuye al este de la sierra La Ranchería. Presenta intercalaciones de material tobáceo arenoso de color rojizo, de naturaleza piroclástica brechoide. Su espesor se estima entre 30 y 60 m. Se encuentra cubriendo a areniscas y limolitas del Plioceno y es sobreyacida por los depósitos aluviales y conglomeráticos del Cuaternario.

Arenisca-limolita (TpiAr-lm). Está constituida por areniscas y limolitas semiconsolidadas a consolidadas con horizontes de calizas lacustres. Se distribuye al noroeste de la sierra Las Conchas formando franjas continuas y escarpes de poca elevación, además de presentarse en forma de mesetas aisladas.

Conglomerado Polimíctico (QhoCgp) está representado por los depósitos coluviales compuestos por conglomerados polimícticos no consolidados. Esta unidad se distribuye ampliamente constituyendo amplias planicies. Litológicamente está formada por conglomerados derivados de rocas ígneas, sedimentarias y en menor proporción metamórficas. De naturaleza semicompacta, depositados en la partes bajas de sierras, cerros y lomeríos. Su espesor varía desde unos cuantos centímetros hasta varias decenas de metros. Su posición estratigráfica con relación a las unidades ígneas y sedimentarias que lo subyacen es discordante, mientras que su contacto superior está constituido por suelo residual y aluviones recientes depositados discordantemente sobre la unidad. El origen está relacionado a abanicos aluviales que han rellenado las partes bajas.

Limo-Arena (Qholm-ar) se define como aquellos depósitos no consolidados compuestos por limos y arenas de origen fluvial que se localizan en planicies o valles. Hacia las zonas lacustres estos sedimentos gradúan hacia una granulometría más fina, hasta llegar a conformar la unidad lacustre (Qhola). Su distribución es amplia, reflejándose en las partes bajas con pendientes suaves y en los grandes valles intermontanos. Su espesor varía de unos cuantos centímetros hasta algunos metros en las partes topográficamente más bajas. Se encuentra cubriendo de forma discordante a los depósitos conglomeráticos recientes (QhoCgp), y a su vez es cubierto por la unidad Qhoal.

Lacustre (Qhola). Definida por depósitos lacustres de edad reciente, compuestos principalmente por limos y arcillas. Constituye los sedimentos de los lagos que se han desecado por evaporación, alternando con intercalaciones de arenas finas, limos y arcillas, en horizontes de unos cuantos centímetros de espesor. Su distribución se localiza en El Barreal y su espesor alcanza varios metros en las áreas de más aporte de sedimentos. Contiene diversos minerales producidos por precipitación química debido a la evaporación, como yeso y sal. Gradúa horizontalmente a depósitos aluviales contemporáneos de mayor granulometría, que forman la unidad Qholm-ar.

Eólico (Qhoeo) está constituida por sedimentos de grano fino, arenas, limos y arcillas. Sus clastos se observan bien redondeados y homogéneos; los componentes principales son limos y arenas, originadas a partir de la desintegración de las rocas preexistentes. Cubre discordantemente a basaltos del Mioceno y a conglomerados del Holoceno. Los afloramientos localizados al este, norte y oeste de la sierra La Candelaria, están compuestos por sedimentos de grano fino transportados por acción del viento, formando dunas.

Aluvión (Qhoal) es una unidad constituida por depósitos de origen fluvial, derivados de la erosión de rocas preexistentes. Sus afloramientos principales se localizan en los cauces de ríos y arroyos. Su espesor varía desde unos cuantos centímetros a varios metros. A esta unidad le subyacen indistintamente rocas del Paleógeno-Neógeno y carbonatadas del Cretácico.

4.2. Geología Estructural

El acuífero está alojado en fosa tectónica rodeada por pilares estructurales, en los que se presentan además plegamientos y cuerpos intrusivos de diferente composición. La estructura de mayor dimensión corresponde a una gran fosa tectónica endorréica rellena por depósitos de bolsón, que se caracteriza por una topografía plana y con poca variación de la pendiente, en la que no se aprecia hidrografía. Los pilares están representados por las sierras de Juárez, Sapelló, Samalayuca, Los Muertos, Los Amargosos, La Candelaria, Las Conchas, La Pedrera, El Sancho, El Presidio, San Blas, La Nariz, China y el Chilicote.

Otro tipo de estructuras que predominan en la zona corresponden a anticlinales y sinclinales con rumbo preferente noroeste-sureste, donde los más sobresalientes corresponden a las sierras Presidio, Juárez y San Blas. Respecto a las fallas, sus orientaciones preferentes son noroeste sureste y en menor proporción noreste suroeste.

Según el Servicio Geológico Mexicano (2003), con el desarrollo de la orogenia Laramide el paquete sedimentario se deposita en cuencas y plataformas, siendo intensamente plegado y formando una serie de estructuras anticlinales y sinclinales afectadas por un sistema de fallas inversas, características de esfuerzos compresionales. La orientación regional NW-SE de estas deformaciones sugiere que los esfuerzos principales provenían del SW. La magnitud y dimensión de las estructuras, así como el estilo de deformación que presentan, es diferente de un elemento paleotectónico a otro, ya que guardan estrecha relación con la posición que tuvieron los sedimentos durante su depósito y posterior plegamiento, con respecto a los elementos configurados durante el Jurásico.

4.3. Geología del Subsuelo

Con base en los resultados de la geología del subsuelo: sondeos electromagnéticos y eléctricos, descripción de cortes litológicos; la interpretación hidrogeomorfológica, hidrología superficial y la interpretación de pruebas de bombeo, entre otros, fue posible definir un sistema acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento, conformado por un medio granular, hacia la parte superior, y otro fracturado subyacente. Con el apoyo de sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TEM's), realizados en el 20 07, se establece la presencia de una serie de fosas con profundidades mayores a los 500 m (figura 3).

El medio granular está constituido por materiales granulares finos a gruesos. Los de menor granulometría, se localizan en la zona aledaña a El Barreal y Laguna de Patos, que por su baja permeabilidad favorece las condiciones de confinamiento y semiconfinamiento del agua subterránea contenida en los materiales granulares subyacentes. Los materiales granulares de mayor granulometría, principalmente arenas, arcillas, gravas y conglomerados, constituyen el acuífero regional que actualmente se explota. Esta unidad aflora ampliamente, presenta permeabilidad media y puede alcanzar espesores de varios cientos de metros en el centro del valle.

El medio fracturado está formado principalmente rocas ígneas del Paleógeno-Neógeno como basaltos, tobas riolíticas, andesitas y en menor proporción rocas graníticas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. También se presentan rocas sedimentarias del Cretácico como areniscas, lutitas y calizas. El conjunto de rocas aflora ampliamente al suroeste del acuífero, conformando las sierras que lo delimitan. Excepto las rocas graníticas, la permeabilidad que presentan estas rocas es de media a baja.

El espesor de la unidad puede alcanzar los 600 m en el centro del valle, disminuyendo gradualmente hacia el norte, oriente y sur donde están subyacidos por rocas consolidadas ígneas o calcáreas de permeabilidad baja a media que debido a su menor espesor le restan transmisividad al acuífero.

Verticalmente la frontera superior es la posición del nivel freático y las fronteras inferiores y laterales están constituidas por las rocas ígneas y sedimentarias cuando su permeabilidad por fracturamiento desaparece.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de Acuífero

El sistema acuífero es de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de depósitos de origen lacustre hacia la zona de El Barreal. Está constituido, en su parte superior, por un medio granular caracterizado por la presencia de depósitos clásticos no consolidados y poco consolidados del Cenozoico al Cuaternario que se encuentran rellenando el valle. La parte inferior del acuífero está alojada en un medio fracturado, desarrollado tanto en rocas ígneas como sedimentarias.

En el subsuelo es posible identificar la presencia de tres unidades hidroestratigráficas principales: a) materiales granulares finos (limos y arcillas) que por su naturaleza de permeabilidad baja constituye un acuitardo que semiconfina a los depósitos granulares; b) materiales granulares de finos a gruesos (arenas, gravas, arcillas y conglomerados), de permeabilidad media, que constituyen el acuífero regional actualmente en explotación, y c) rocas volcánicas y sedimentarias fracturadas, de permeabilidad baja a media, que presentan continuidad hidráulica con los materiales granulares y permiten el emplazamiento de pozos que aportan gastos moderados.

5.2. Parámetros hidráulicos

De acuerdo con los resultados de la interpretación de las pruebas de bombeo, aforos y caudales específicos, realizados en estudios previos, especialmente en los pozos de la batería que abastecerá de agua Ciudad Juárez, se obtuvieron valores de conductividad hidráulica que varían de 2 a 5 m/d (**2.3×10^{-5} a 5.8×10^{-5} m/s**), que muestran una distribución espacial aleatoria (JMAS,2000). Su valor promedio es de 3 m/d. Los valores de conductividad hidráulica vertical son menores en un orden de magnitud. Hacia el sur del acuífero, donde la litología muestra un dominio de granulometría fina, su valor es de 2 m/d.

Considerando los aforos de los pozos que conforman la batería de pozos y de los valores obtenidos en el acuífero vecino Valle de Juárez, extrapolados por correlación hidrogeológica, es posible establecer que los valores de transmisividad varían de **0.5 a 6.2×10^{-3} m²/s**, con valor promedio de **2.8×10^{-3} m²/s** (242 m²/día).

De los resultados de la interpretación de algunas pruebas de bombeo, se obtuvieron valores de almacenamiento específico (S_s) que varían de 1×10^{-7} a 2.8×10^{-5} . Su valor promedio es de 1×10^{-6} , en tanto que para el rendimiento específico se considera un valor promedio de 0.15. Estos valores son muy parecidos a los utilizados en estudios y modelos de simulación numérica realizados en la porción Estadounidense del acuífero.

5.3. Piezometría

La definición de áreas de recarga y descarga, y consecuentemente trayectorias de flujo de agua subterránea, puede ser lograda mediante diversos indicadores siendo uno de ellos la medición de los niveles piezométricos, mediante los cuales no solo es posible identificar estas zonas sino también componentes verticales de flujo subterráneo, ascendentes y descendentes.

Aunque existe información piezométrica dispersa en tiempo y espacio, no es suficiente para elaborar configuraciones del nivel estático. Únicamente se describirán las que corresponden al estudio realizado en el 2007.

5.4. Comportamiento hidráulico

El acuífero presenta un comportamiento hidráulico dinámico, el agua subterránea se infiltra en las porciones altas del acuífero, constituidas por rocas fracturadas que favorecen la infiltración proveniente de la lluvia, hacia la zona de valle.

La recarga del acuífero se lleva a cabo a través de flujos subterráneos horizontales de los flancos montañosos donde el agua se infiltra en rocas volcánicas y calcáreas. La descarga natural del acuífero ocurre en forma horizontal al norte del acuífero, en dirección SW-NE, y por evaporación en las zonas donde el nivel piezométrico es somero.

5.4.1. Profundidad al nivel estático

De acuerdo a la configuración de profundidad de nivel estático para el año 2007, mostrada en la figura 4, los valores registrados varían desde algunos metros, en la zona de la Laguna El Barreal, hasta los 90 en la porción nororiental del acuífero, conforme se asciende topográficamente. De El Barreal hacia las sierras que conforman el límite suroriental los valores se incrementan hasta los 30 m.

5.4.2. Elevación del nivel estático

Con respecto a la configuración de la elevación del nivel estático, al igual que la profundidad, muestra claramente el reflejo de la topografía. Los valores varían de 1240 a 1150 msnm (figura 5). El esquema general del flujo subterráneo muestra una trayectoria preferencial hacia al noroeste, identificándose tres zonas de recarga ubicadas al suroeste, sur y sureste del acuífero. De la porción noroccidental del acuífero existen entradas por flujo subterráneo, que por falta de apoyo piezométrico no fue posible estimar. Su valor está implícito en la recarga vertical.

Los valores de transmisividad utilizados en las celdas de entradas y salidas horizontales del acuífero, fueron establecidos con base en las características litológicas, permeabilidad y espesor saturado.

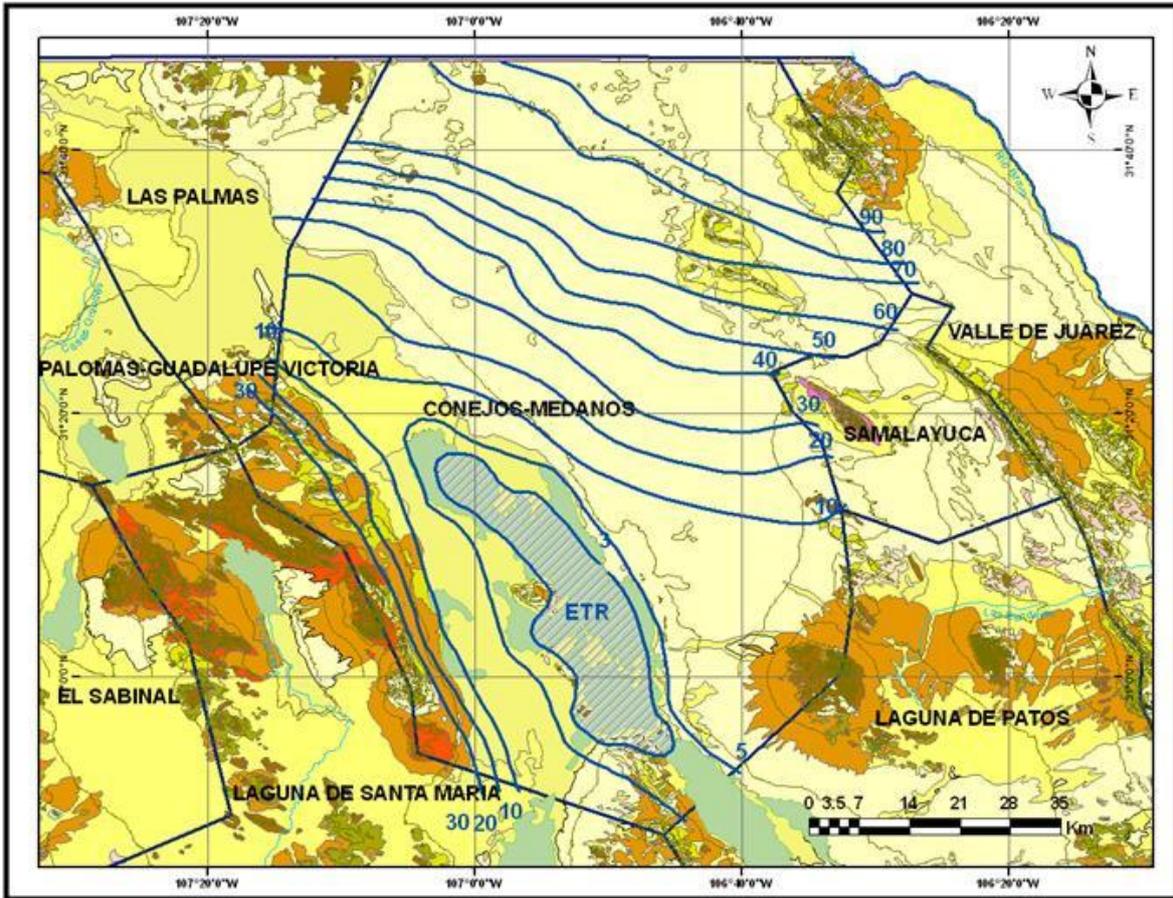


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2007)

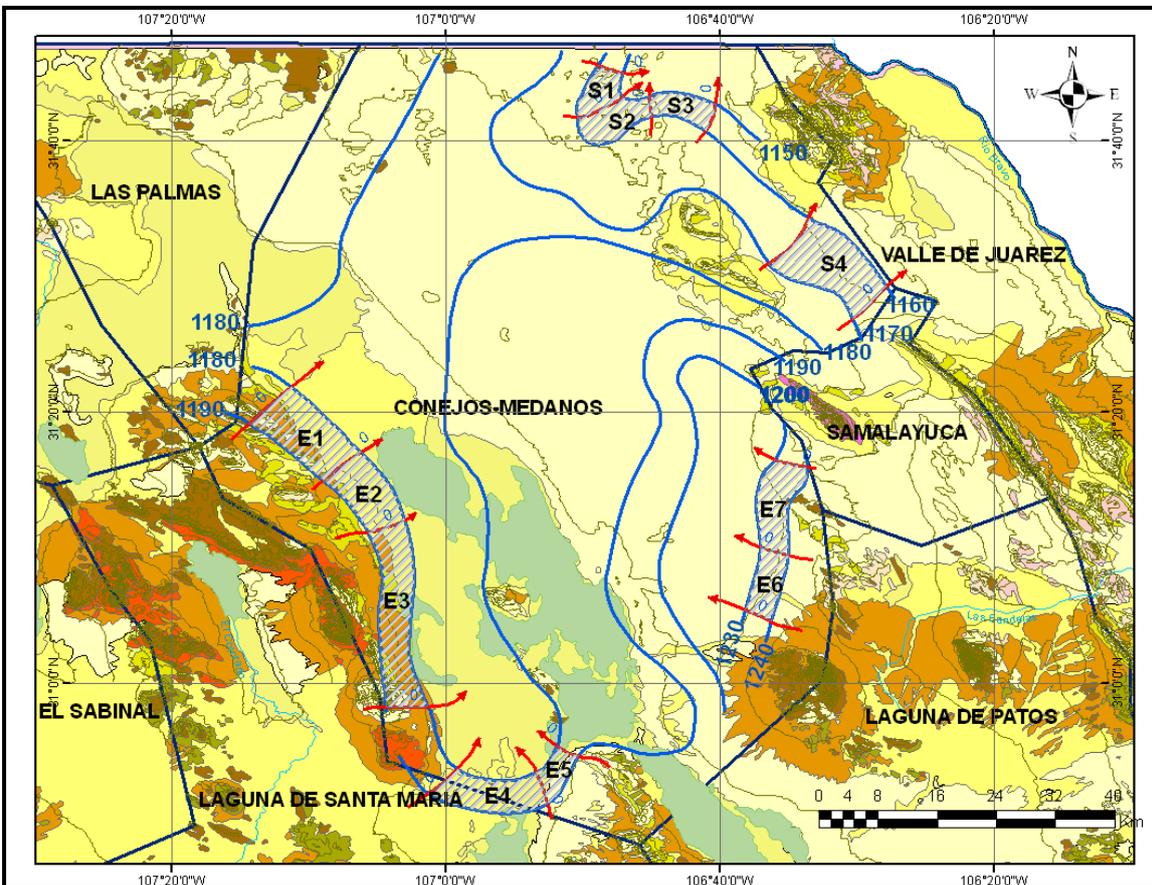


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2007)

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se contó con información piezométrica histórica que permita su configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en estudios previos se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Aunado a esto, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos y/o del bombeo de volúmenes de agua superiores a la recarga natural.

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

De acuerdo con los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados por la JMAS y CONAGUA se establece que, de manera general, el agua subterránea cumple con los requisitos establecidos por la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano ya que las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos (STD) son menores a 1000 ppm en los primeros 100 metros. De norte a sur las concentraciones se incrementan de 250 ppm, en la zona cercana a la frontera internacional, hasta 3340 ppm, registrados al suroeste de la Laguna El Barreal. En sentido este-oeste el incremento se produce desde la carretera federal Juárez-Casas Grandes, con valores mínimos de STD de 400 ppm, incrementándose hacia el suroeste y con la profundidad en dirección hacia la laguna El Barreal, donde las concentraciones superan las 8500 ppm a 300 m de profundidad, favorecido por la presencia de manifestaciones de niveles freáticos someros y la presencia de suelos salinos, que indican que esta es una zona de descarga de flujo regional.

Durante 1999 y 2000 se analizaron 200 muestras de agua obtenidas de 23 pozos exploratorios ubicados al norte del acuífero. De los resultados de los análisis se concluye que la mayor parte de agua de la zona presenta salinidad aceptable hasta una profundidad media de 200 m, con excepción de dos pozos que presentan alta salinidad en toda su profundidad, asociada a un incremento local en el contenido de estratos arcillosos. Sin embargo, aún en pozos de salinidad aceptable existen algunos parámetros con concentraciones superiores a la norma, que se incrementan hacia la Laguna El Barreal, como el sodio y fluoruro.

El acuífero presenta termalismo de baja temperatura, al menos en la zona norte, ya que de acuerdo a los registros de temperatura se presentan gradientes geotérmicos que varían de 3 a 7° C por cada 100 m de profundidad, asociado probablemente a la presencia de rocas volcánicas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

En 2007 se llevó a cabo un censo completo de aprovechamientos hidráulicos, identificando los principales usos: agrícola, pecuario y público urbano, entre otros. De acuerdo con los resultados se registró la existencia de un total de 132 aprovechamientos, de los cuales 126 son pozos y 6 norias. Del total de obras, 58 pozos (44%) están activos y los 74 restantes (56%) se encuentran inactivos, incluidos los 31 pozos que integran una batería de pozos ubicada en el extremo norte del acuífero, la cual a la fecha del censo no estaba en funcionamiento.

Debido a que la mayoría de aprovechamientos activos extraen agua de manera esporádica mediante energía eólica y otros no se encontraban operando, no fue posible estimar de manera real el volumen de extracción. Por esta razón, para fines de balance, se considera el valor de 0.6 hm³ anuales del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), a la fecha de corte correspondiente al 31 de marzo de 2009. Tanto los pozos como el agua subterránea extraída se destinan casi en su totalidad a satisfacer las necesidades del uso doméstico-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, en el periodo de tiempo establecido. El balance de aguas subterráneas se definió en una superficie de 4,800 km², que corresponde a la zona de valle donde se localizan dispersos los aprovechamientos del agua subterránea.

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

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

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

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero Las entradas están integradas por la recarga natural (Rv) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita directamente sobre 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).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, el riego agrícola es incipiente, no existe recarga inducida.

7.1.1. Recarga vertical por lluvia (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que el cambio de almacenamiento (ΔV) tiende a ser nulo y existe información para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical por lluvia

Eh: Entradas subterráneas por flujo horizontal

ETR: Descarga natural por evapotranspiración

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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 se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2007 (figura 5). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de (Δh). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

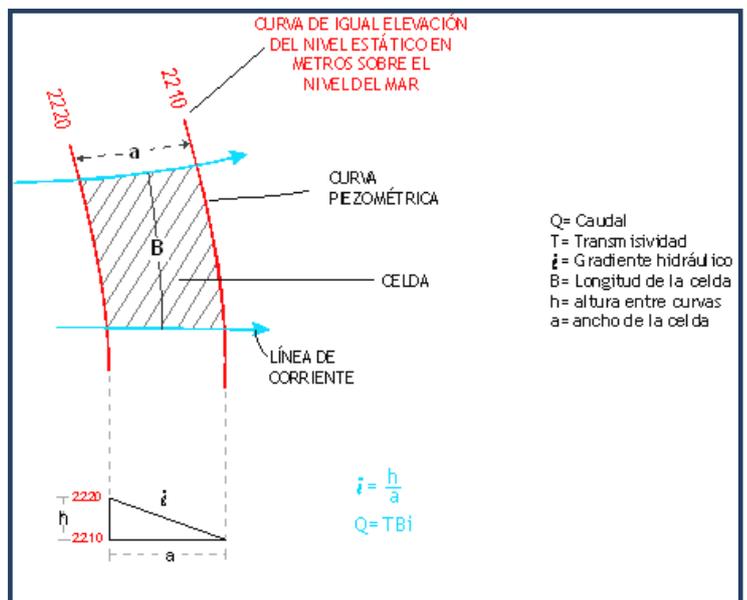
Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

K= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta h / \Delta L$) Δh y ΔL son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.



Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad $T = K \cdot a$, la ecuación queda reducida a:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

T = Transmisividad en m^2 / s .

B= Longitud de la celda en m.

i = Gradiente Hidráulico, en m.

Tabla 2. Cálculo de las entradas subterráneas (2007)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
			(m)		(m^2/s)		
E1	12750	4050	10	0.0025	0.0015	0.0472	1.5
E2	8700	5200	10	0.0019	0.0015	0.0251	0.8
E3	21450	3480	10	0.0029	0.0015	0.0925	2.9
E4	15100	2900	10	0.0034	0.0030	0.1562	4.9
E5	9850	2900	10	0.0034	0.0030	0.1019	3.2
E6	11600	2300	10	0.0043	0.0010	0.0504	1.6
E7	8100	2900	10	0.0034	0.0010	0.0279	0.9
Total entradas							15.8

El cálculo de la entradas subterráneas se presenta en la tabla 2, en la que se observa que el valor total es de **15.8 hm^3 anuales**. En el valor de 4.9 $hm^3/año$ de la celda E4 de la figura 5, están contemplados los 3.2 $hm^3/año$ que se consideran comprometidos como salida natural del acuífero laguna de Santa María, la diferencia entre estos dos valores se genera dentro del acuífero Conejos-Médanos.

El valor de transmisividad utilizado fue estimado con base en los aforos de los pozos que conforman la batería de pozos y de los valores obtenidos en el acuífero vecino Valle de Juárez, extrapolados por correlación hidrogeológica, y adaptados al espesor saturado de cada zona.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), la evaporación directa en las zonas de niveles freáticos someros (ETR) y las salidas por flujo subterráneo (Sh).

7.2.1. Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) son parámetros utilizados para estimar la recarga potencial por infiltración

Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

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

T (°C) =	17.4		
P(mm) =	167	P ² =	27889
L =	998.4012	L ² =	996804.956
ETR (mm)	173.4		

Sin embargo, debido a que el valor de la precipitación media anual es muy bajo (167 mm), no se pueden aplicar los métodos empíricos para la estimación de ETR, como los métodos de Turc o el de Smith, ya que en ambos métodos para considerar confiable la estimación del volumen evapotranspirado, deben presentarse precipitaciones mayores a 320 y 300 mm, respectivamente, dependiendo del valor de la temperatura promedio anual.

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L. Entonces debido a que la precipitación resultó menor que la relación 0.31L = 309.5, el valor de la evapotranspiración real debe despreciarse, ya que su valor resulta mayor de la precipitación.

El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la ausencia de cobertura vegetal. Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos < 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith (1973) figura 6.

De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno (profundidad al NE menor a 2 m, dentro del área de balance) por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial media en las estaciones climatológicas (2400 mm anuales, CONAGUA Dirección Local Chihuahua). El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores a la altura de la franja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático. De la figura 6 se deduce que para una profundidad promedio al nivel del agua subterránea de 2 m (80 pulgadas) el % de evaporación es del 2%. Considerando una superficie de 325 km² donde la PNE es menor a los 2 m (figura 4) y un 2% de la evaporación potencial, se obtiene que la evaporación es del orden de los **15.6 hm³** anuales.

Evaporación potencial media anual (m)	Área (km ²)	% de la Evaporación Potencial	Volumen Evaporación (hm ³ /año)
2.4	325	0.02	15.6

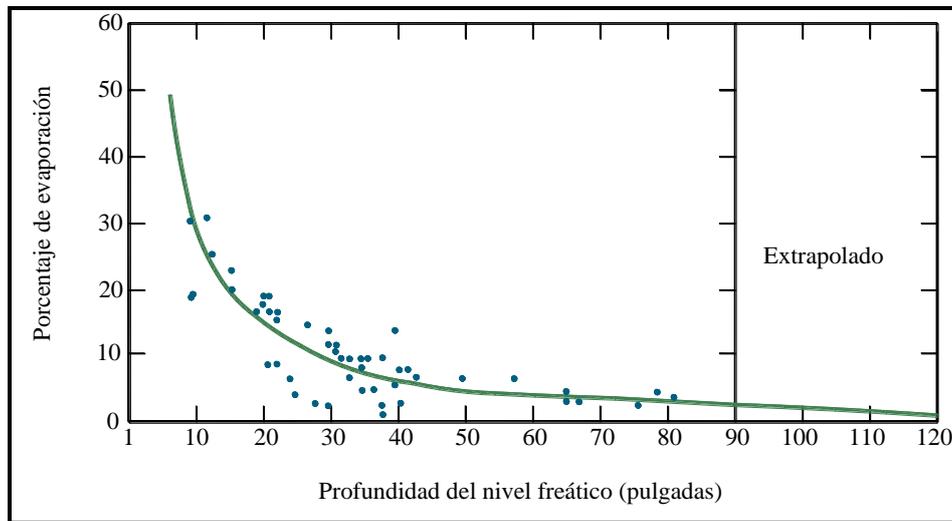


Figura 6. Evaporación del agua freática en función de la profundidad al nivel estático

7.2.2. Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo y piezometría, no fue posible estimar la extracción de los escasos aprovechamientos del agua subterránea que operan principalmente mediante energía eólica. Por esta razón se adoptó el valor de **0.6 hm³ anuales** que reporta del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), a la fecha de corte correspondiente al 31 de marzo de 2009.

7.2.3. Salidas subterráneas (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del NE presentada en la figura 5. El valor estimado es de **2.6 hm³ anuales**, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de las salidas subterráneas (2007)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1	Gradiente i	T	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
			(m)		(m ² /s)		
S1	5800	3500	10	0.0029	0.0010	0.0166	0.5
S2	5800	5000	10	0.0020	0.0010	0.0116	0.4
S3	11600	2600	10	0.0038	0.0010	0.0446	1.4
S4	12150	11000	10	0.0009	0.0010	0.0110	0.3
Total salidas							2.6

7.3. Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

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

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical; despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

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

Sustituyendo valores:

$$R_v = 2.6 + 0.6 + 15.6 + 0.0 - 15.8 = 3.0$$

$$R_v = 3.0 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Este valor representa una lámina de 0.625 mm anuales sobre la superficie de 4800 km² del área de balance, en la que además se incluyen las entradas subterráneas procedentes de la porción occidental que por falta de apoyo piezométrico no fue posible calcular.

Por lo tanto la recarga total es la suma de las componentes de entrada

$$R_t = E_h + R_v = 18.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida.

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

8.1. Recarga total media anual (Rt)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (Rt), 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 (DNCOM)

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 Conejos-Médanos no se consideran descargas naturales comprometidas ya que, por una parte, aunque las salidas subterráneas son hacia la frontera con los EUA, en la zona donde se evaluaron existen aprovechamientos con derechos vigentes (excepto los 0.4 hm³ de la celda S4 que se dirigen hacia el acuífero Valle de Juárez); y por otra, en la zona de evaporación localizada en la Laguna El Barreal el agua subterránea contiene altas concentraciones de sales que impiden su aprovechamiento. Por lo tanto la descarga comprometida es 0.

8.3. Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al 31 de marzo de 2009, es de **596,735 m³/año**.

8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)

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 Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor

de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA.

Por lo tanto la disponibilidad de aguas subterráneas, de acuerdo a la expresión (3), es:

$$DAS = R_t - DNCOM - VCAS$$

$$DAS = 18.8 - 0.0 - 0.596735$$

$$DAS = 18.203265 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El resultado indica que existe actualmente un volumen de **18'203,265** m³ anuales disponibles para otorgar nuevas concesiones.

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 su 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 fracturadas que subyacen a los depósitos granulares. Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo hacia los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior

9. BIBLIOGRAFIA

Comisión Nacional del Agua, 2000. Diagnóstico de calidad del agua en 23 pozos del acuífero de Conejos-Médanos y definición de la necesidad de una planta potabilizadora para el proyecto Conejos-Médanos, Juárez, Chih.

Comisión Nacional del Agua-Servicio Geológico Mexicano. 2007. Convenio de colaboración para realizar Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Conejos-Médanos, Estado de Chihuahua.

Junta Municipal de agua y Saneamiento, 1999. Calidad del agua en la zona sur del acuífero Conejos Médanos (1999).

Junta Municipal de agua y Saneamiento, 2000. Modelo Matemático de Simulación Hidrodinámica y de Transporte de Solutos del Acuífero Bolsón de la Mesilla (Zona Conejos-Médanos). Reporte técnico No. DSGEO-012/00.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1982. Servicios de Prospección Geohidrológica en la Zona Estación Conejos-Médanos, en el Estado de Chihuahua (1982). Realizado por la empresa Servicios Geológicos, S. A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1985. Estudio Complementario de Prospección Hidrogeológica en la zona Conejos-Médanos, Chihuahua. Realizado por la empresa Lesser y Asociados, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1988. Estudio de Geofísica en la Cuenca de Conejos-Médanos, para Abastecimiento de Agua en Bloque a Ciudad Juárez, Chihuahua. Realizado por la empresa Técnicas Geológicas y Mineras, S. A. de C. V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1989. Prospección Geohidrológica y Perforación Exploratoria de la Zona Conejos-Médanos como una Alternativa para el Abastecimiento de Agua Potable de Ciudad Juárez, Chih.