



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO LAGUNA DE PATOS (0817), ESTADO
DE CHIHUAHUA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1 GENERALIDADES	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3 FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima	7
3.3 Hidrografía	8
3.4 Geomorfología.....	8
4 GEOLOGÍA.....	10
4.1 Estratigrafía	11
4.2 Geología estructural.....	16
4.3 Geología del subsuelo.....	18
5 HIDROGEOLOGÍA.....	19
5.1 Tipo de acuífero.....	19
5.2 Parámetros hidráulicos.....	19
5.3 Piezometría	20
5.4 Comportamiento hidráulico.....	20
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	22
5.4.3 Evolución del nivel estático	23
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	23
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	24
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	24
7.1 Entradas.....	25
7.1.1 Recarga vertical (Rv)	26
7.1.2 Retornos de riego (Rr).....	30
7.2 Salidas.....	31
7.2.1 Evapotranspiración (ETR)	31
7.2.2 Bombeo (B).....	31
7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	32
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	32
8 DISPONIBILIDAD.....	33
8.1 Recarga total media anual (R)	33
8.2 Descarga natural comprometida (DNC)	33
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	34
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)	34

1 GENERALIDADES

Antecedentes

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

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

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (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 Laguna de Patos, definido con la clave 0817 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Chihuahua, entre los paralelos 30° 12' y 31° 15' de latitud norte y entre los meridianos 105° 52' y 106° 47' de longitud Oeste, cubre una superficie aproximada de 4,083 km². Colinda al norte con el acuífero Samalayuca; al oriente con los acuíferos Valle de Juárez, El Cuarenta y Los Lamentos; al sur con Laguna de Tarabillas y Laguna Tres Castillos y al occidente con Conejos-Médanos, Laguna de Santa María y Flores Magón-Villa Ahumada, todos ellos pertenecientes al estado de Chihuahua (Figura 1).

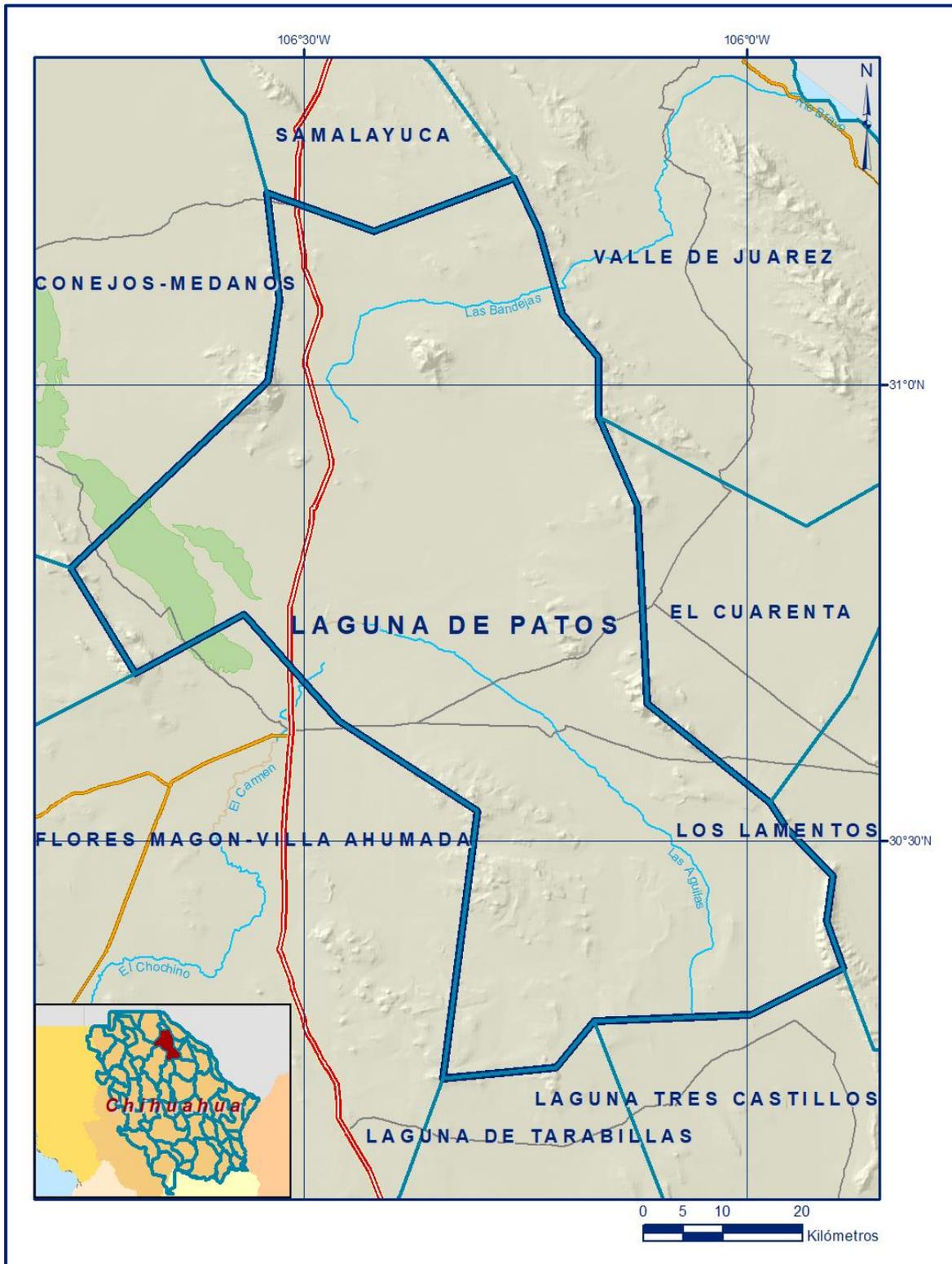


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios de Ahumada y en el extremo norte una pequeña porción de los municipios Guadalupe y Juárez.

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 0817 LAGUNA DE PATOS						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	106	27	418	30	37	57.2
2	106	34	4.2	30	44	56.3
3	106	41	28.6	30	41	2.4
4	106	45	49.3	30	48	0.3
5	106	32	27.7	31	0	17.8
6	106	31	413	31	5	37.0
7	106	32	32.3	31	12	416
8	106	25	15.2	31	10	8.5
9	106	15	45.7	31	13	39.7
10	106	14	2.8	31	10	10.3
11	106	12	318	31	4	43.3
12	106	10	3.9	31	1	517
13	106	10	5.1	30	57	56.8
14	106	7	24.2	30	52	2.4
15	106	6	47.6	30	39	4.3
16	105	58	24.5	30	32	317
17	105	57	12.5	30	30	45.6
18	105	54	9.8	30	27	44.4
19	105	54	37.2	30	24	46.3
20	105	53	27.9	30	21	36.6
21	105	59	44.5	30	18	35.0
22	106	10	20.6	30	18	9.5
23	106	12	55.3	30	15	5.3
24	106	20	34.9	30	14	214
25	106	18	15.0	30	31	58.9
1	106	27	418	30	37	57.2

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Laguna de Patos pertenece al Organismo de Cuenca Río Bravo y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Chihuahua. El acuífero se encuentra parcialmente vedado por el "Acuerdo que establece el Distrito de Riego de El Carmen, en San Buenaventura y Villa Ahumada, Chih., y declara de utilidad públicas la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos para alojarlas y operarlas". Publicado en el DOF el 30 de enero de 1957 y clasificado como tipo III, que permite 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 2.

El usuario principal del agua es el agrícola. En el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha 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:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE VILLA AHUMADA, elaborado por la empresa INGESA, para Secretaría de Recursos Hidráulicos (SARH), en 1970. El área cubierta por el estudio comprende una superficie aproximada de 9,000 km², desde el ejido Benito Juárez, en el llamado Valle Álamos de Peña-Juárez, hasta el Valle de Villa Ahumada, a unos 20 km al norte de la población que lleva este mismo nombre.

Se analizaron aspectos climatológicos, de aprovechamiento de los escurrimientos superficiales; un censo de aprovechamientos de agua subterránea y se describen de manera general las condiciones geológicas prevalecientes.

Se ejecutaron algunas pruebas de bombeo que junto con las configuraciones del nivel estático permitieron esbozar un balance de aguas subterráneas. Se identificó la presencia de un acuífero confinado en los alrededores de la Laguna de Patos.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL PROYECTO DE REHABILITACIÓN Y AMPLIACIÓN DEL DISTRITO DE RIEGO NO. 89, EL CARMEN, CHIHUAHUA, elaborado por la empresa, E.D.E.F.I., S.C. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), en 1981. Presenta resultados preliminares de los aspectos geohidrológicos generales de la zona de estudio.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE UNA PORCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO EL CARMEN, MUNICIPIO DE VILLA AHUMADA, ESTADO DE CHIHUAHUA, elaborado por el Ing. J. S. Manuel Martínez Inzunza, para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1982. El estudio geohidrológico abarcó una superficie aproximada de 10,000 km², comprendiendo las llanuras de Benito Juárez, Álamos de Peña, Lucio Blanco y Santa Cruz, que concurren hacia la zona de Villa Ahumada y Laguna de Patos.

Su objetivo principal consistió en analizar la posibilidad de integrar el área involucrada en un solo distrito de riego, mediante la construcción de otra presa de almacenamiento en el sitio conocido como Los Aviones. Sin embargo, también fue utilizado para fundamentar, en parte, otro estudio a nivel de factibilidad para el proyecto de rehabilitación y ampliación del Distrito de Riego 089 "El Carmen".

Actualizó el censo de pozos y la geoquímica de las aguas subterráneas; aportó mayor información geológica, piezométrica y pruebas de bombeo. Incluyó un balance de las aguas subterráneas en algunos de los valles antes citados.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO LAGUNA DE PATOS, ESTADO DE CHIHUAHUA, elaborado por la empresa Estudios y Proyectos en Agua Subterránea, S. A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2005. El objetivo fue conocer las condiciones geohidrológicas del acuífero para definir su potencial como fuente de abastecimiento de agua potable para Ciudad Juárez.

Se realizó un censo de aprovechamientos e hidrometría de agua subterránea, el cálculo del volumen de extracción, piezometría, muestreo del agua subterránea, definición del modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, ejecución e interpretación de pruebas de bombeo, realización de sondeos Transitorios Electromagnéticos (TEM's), nivelación de brocales, planteamiento del balance hidrometeorológico y de aguas subterráneas y determinación de la recarga media anual que recibe el acuífero.

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

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

El acuífero Laguna de Patos queda comprendido dentro de la provincia Sierras y Cuencas, subprovincia Llanuras y Médanos del Norte. La provincia Sierras y Cuencas es una provincia árida y semiárida que se extiende desde el suroeste de los Estados Unidos de América hasta cerca de Nazas en Durango y la Laguna de Mayrán en Coahuila. También muestra penetraciones digitadas desde ese país al extremo norte de Sonora. Dentro de territorio mexicano, al sur del río Bravo, colinda al oeste con la Sierra Madre Occidental, al este con la Sierra Madre Oriental y tiene un punto de contacto en el extremo sur con la Mesa Central. Se orienta más o menos en dirección NNW-SSE y abarca parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila y Durango.

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 endorreicas. 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. Los aluviones en general cubren los llanos que en ocasiones tienen acumulaciones salitrosas, conocidas localmente como “barriales”.

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 1,000 m sobre las llanuras y de 2,000 a 3,000 m respecto al nivel del mar; gran parte de las sierras están rodeadas de amplias bajadas que las semiseputan. Las llanuras que tienen menor altitud, 800 m, se localizan a orillas del río Bravo, casi todas las demás se encuentran a unos 1,000 m y sólo en el sur, Laguna de Mayrán, se alcanzan los 1,400 m.

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, de ahí corre 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 muy extremo. De acuerdo con la clasificación hecha por Köppen y adaptada por E. García para las condiciones de nuestro país, en las porciones occidental y suroccidental se presenta el clima BWkw que corresponde a muy seco, templado, con lluvias en verano, % de precipitación invernal entre 5 y 10 y verano cálido.

La temperatura media anual, obtenida mediante un registro de 18 años (1987-2004) en la estación climatológica ubicada en el poblado de Samalayuca, es de 18.6 ° C .

La precipitación media anual para el periodo 1957–2004, es de 249 mm. Las precipitaciones más altas se presentan en los meses de julio, agosto y septiembre, representando en tan sólo estos 3 meses el 56% de la precipitación media anual.

3.3 Hidrografía

La zona del acuífero se ubica dentro de la Región Hidrológica 34 Cuencas Cerradas del Norte y queda comprendido dentro de la cuenca del río del Carmen. Este río nace con el nombre de Santa Clara, aproximadamente 11 kilómetros aguas arriba del poblado de San Lorenzo, municipio de Buenaventura, Chihuahua, a una elevación de 2,200 msnm. A partir de la estación hidrométrica La Trasquila, cambia su nombre al río El Carmen. Aproximadamente 6 km aguas abajo del poblado San Lorenzo, se encuentra la presa Las Lajas. El área de la cuenca hasta el sitio donde se construyó esta presa, tiene una extensión de 4,470 km².

A partir de la cortina de la presa, el río sigue un rumbo noroeste hacia el poblado de Villa Ahumada, recorriendo una distancia de 110 km y su altitud varía de 1,500 a 1,200 msnm resultando una pendiente media de 0.0027. En este tramo el río recibe otros afluentes hasta su desembocadura en la laguna de Patos, localizada a 14 kilómetros aguas abajo del poblado Villa Ahumada. El régimen del río es torrencial, presentando las avenidas máximas en los meses de agosto y septiembre.

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, aunque hay importantes afloramientos dispersos de rocas volcánicas ácidas en las sierras y lomeríos y, en menor cantidad, rocas basálticas en el centro de la subprovincia; también afloran calizas en las sierras y lomeríos. Los médanos de Samalayuca constituyen un campo de dunas, el mayor del país, que se abre como abanico al oeste y sur de la cabecera del municipio Juárez y se extiende hasta Estados Unidos de América.

Las dunas o médanos son montículos móviles de arena, de tipo semilunar 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 dimensiones de 10 m de alto y 30 m de ancho.

Los sistemas de topofomas que integran esta zona dentro del estado son: sierra plegada, tal es el caso de las sierras Boca Grande, Las Lilas (al sureste de la primera) y Vado (al sur de Ahumada), entre otras; sierra escarpada, como las sierras El Fresnal, El Capulín, La Escondida, La Nariz (al oriente de la laguna Santa María) y La Mojina (al suroeste de Ejido Constitución); lomerío escarpado, al sureste de Juan Mata Ortíz, al este y sureste de El Berrendo, al noroeste de Janos y al occidente de Nuevo Casas Grandes; lomerío escarpado con bajadas, al este y sur de la población Guzmán, así como al sureste de Ahumada; bajada con lomeríos, del sur de la localidad Sierra Rica y de los alrededores de El Berrendo al sureste de Flores Magón y del sur de Samalayuca a Ejido San Lorencito; llanura aluvial salina, hacia el norte de Nuevo Casas Grandes, a lo largo del río Santa María, en los alrededores de Ascensión y al sur y suroeste de Ahumada, entre otros sitios; llanura aluvial salina con lomeríos, en entorno de Puerto Palomas al norte de las lagunas de Guzmán y El Barreal; llanura aluvial de piso rocoso o cementado con lomeríos, del suroeste de la laguna El Barreal al norte de Benito Juárez; llanura aluvial inundable y salina, en la laguna El Barreal y al oeste, este y sur de la laguna de Guzmán; llanura aluvial inundable, en el entorno y hacia el norte y sur de la población Hermenegildo Galeana; llanura aluvial, en las proximidades de Ejido Constitución; llanura aluvial de piso rocoso o cementado e inundable, al noreste de Hermenegildo Galeana; llanura aluvial de piso rocoso, al sureste de Puerto Palomas; campo de dunas, en el noreste de la subprovincia (hacia Juárez y los alrededores de Samalayuca) y al norte de laguna de Guzmán.

Los rasgos del relieve se repiten con poca variedad a través de la provincia: las llanuras se extienden por grandes distancias, son áridas y uniformes, sin otro cambio que su declive gradual hacia el oriente.

Son características de la provincia las dilatadas cuencas internas denominadas bolsones, cuya suave pendiente converge a una amplia zona central de constitución arcillosa y salina, conocida con el nombre de "barrial" o playa, sitio de lagunas y charcas bajas y efímeras.

Aisladas en la planicie, emergen numerosas serranías de forma angosta y alargada, y orientación preferente al noroeste; algunas se prolongan por más de 100 km, en tanto que su anchura rara vez excede los 15 km.

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 Jurásico hasta el Reciente (figura 2).

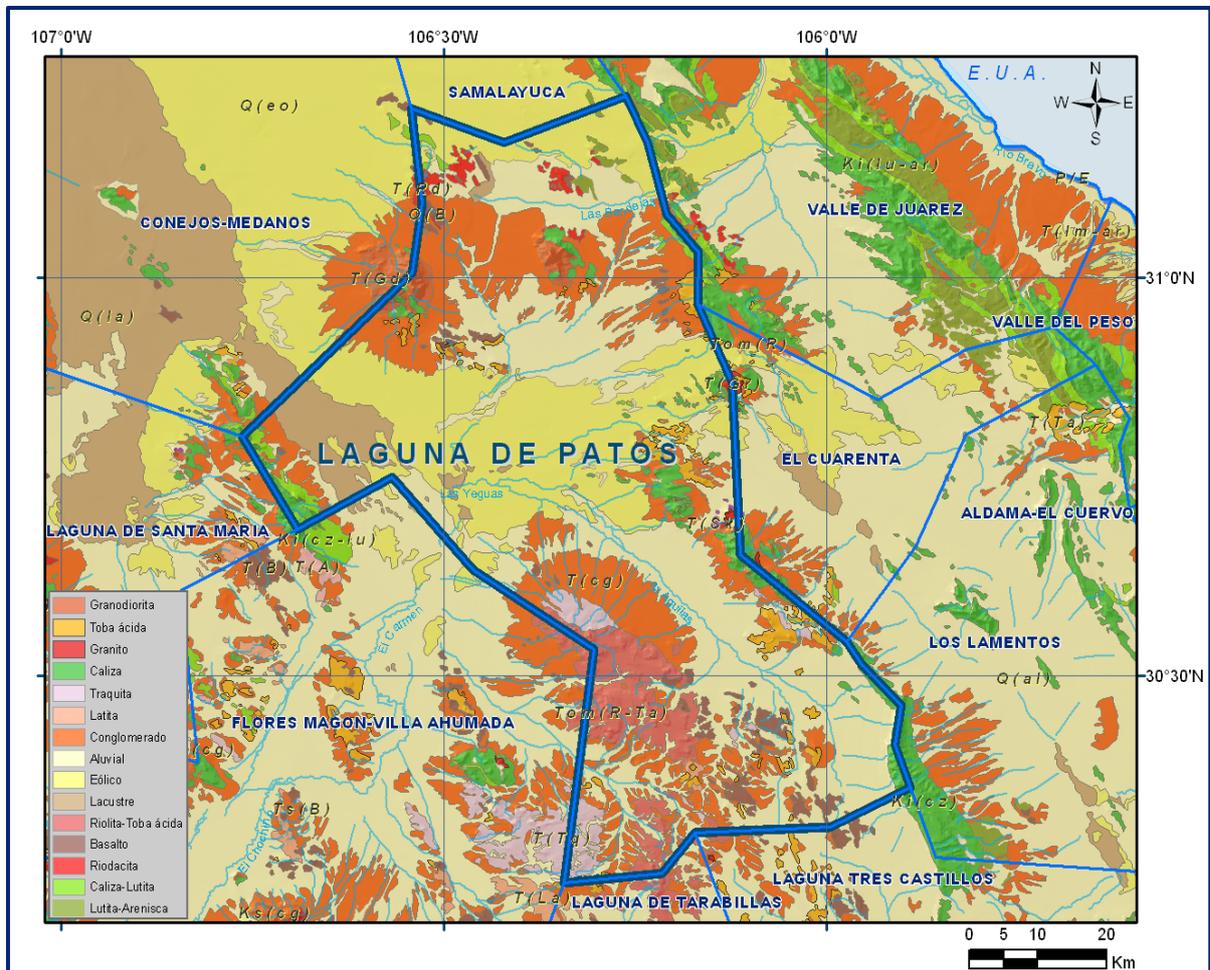


Figura 2. Geología general del acuífero

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 la 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.

4.1 Estratigrafía

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

Jurásico

La Formación Samalayuca (TRJm Ar-Cgp) consiste de una secuencia de areniscas y conglomerados formados por fragmentos subredondeados de cuarzo, pedernal y esporádicas calizas. Constituye principalmente la sierra de Samalayuca, fuera del área por el norte, y en el área que cubre el acuífero Laguna de Patos presenta un pequeño afloramiento en el extremo noreste, cerca de la sierra Presidio.

Cretácico

La Formación Navarrete (KbeCz-Y) tiene una pequeña exposición que se observa al oriente de la sierra de Alcaparra, se encuentra constituida por estratos delgados de areniscas y calizas; su parte media se encuentra interestratificada con yeso. Su espesor conocido es de alrededor de 200 m.

La Formación Las Vigas (KvbAr-Lm) está constituida por areniscas en estratos delgados, con limolitas arenosas, en ocasiones arcillosas. El contacto infrayacente es concordante con la Formación Navarrete. En la sierra de Alcaparra alcanza unos 100 m de espesor. La Caliza-Lutita (KbapCz-Lu) pertenece al Grupo Cuchillo, como se define a la secuencia sedimentaria de origen marino compuesta por calizas, lutitas, areniscas y yesos. Aflora en las porciones sur, suroeste de la sierra El Presidio, en la sierra San Ignacio, y al oriente de la sierra El Fierro. En el flanco noreste de la sierra San Ignacio, la Formación Cuchillo se presenta como una intercalación de calizas arcillosas, lutitas calcáreas y horizontes arenosos, mientras que hacia el sureste de esta misma sierra esta unidad contiene un cuerpo de 10 m de espesor de yeso. Esta formación tiene un espesor muy variable que en las áreas descritas varía desde 250 hasta 800 m.

La Formación Walnut (KaLu-Cz) está integrada por una secuencia de calizas y lutitas laminadas y coquinas, que se encuentran aflorando en las sierras de Alcaparra, Mosqueteros, Presidio, al oeste de las sierras La Esperanza, Chilicote, San Miguel y La Candelaria.

La Formación Edwards (KamCz) es un cuerpo potente de rocas carbonatadas de aguas someras y cálidas, que en términos generales está constituida de un mudstone, wackstone y packstone, en estratos medianos a gruesos; cuyo espesor promedio es de 100 m.

Está bien distribuida en el área con afloramientos en las sierras de Alcaparra, Mosqueteros, Chilicote, San Miguel, y al noreste de la sierra de Presidio.

Esta formación sobreyace concordantemente a la Formación Walnut y subyace de igual manera a la Formación Kiamichi.

La Formación Kiamichi (KaCz-Lu) aflora en la sierra San Miguel y al norte de la sierra Chilicote. Está constituida de mudstone ligeramente arcilloso de estratos delgados a medianos, alternando con lutitas calcáreas. 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.

El Grupo Aurora (KaimCz-Lu) es una secuencia gruesa de rocas sedimentarias carbonatadas de origen marino, compuesta por calizas masivas, lutitas y areniscas, que aflora en la sierra La Ranchería, porción sur de la sierra El Presidio y sierra La Candelaria, así como en la sierra El Fierro.

Las calizas y lutitas (KceCz-Lu) de las formaciones Del Río y Buda son una secuencia de rocas sedimentarias de origen marino, compuestas por calizas, lutitas y areniscas. Afloran en la porción suroeste de la carta, al norte de la sierra El Fierro y al suroeste de la sierra El Hacha.

La lutita-caliza (KcetLu-Cz) de la Formación Ojinaga, se define como la secuencia de rocas sedimentarias de origen marino compuestas por lutitas con intercalaciones de caliza que aflora en el flanco oeste de la sierra El Fierro.

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.

La 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 riodacitas. 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).

La 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.

La Andesita (ToA) es una roca volcánica extrusiva con afloramientos 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. La Traquita (ToTq) es una 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.

La Riolita (ToR) es una 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. El espesor estimado de la unidad riolítica, 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.

La Riolita-Riodacita (ToR-Rd) está definida 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.

La 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.

La unidad 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. El espesor promedio de esta unidad es de 100 m.

El 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.

La Arenisca-Conglomerado Polimíctico (TmAr-Cgp) está constituida por una alternancia de areniscas y conglomerados con elementos sedimentarios y volcánicos. La distribución de la unidad se identifica hacia el sureste de la sierra San Rafael. 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. El Conglomerado Polimíctico (TplCgp) se distribuye en las sierras San Miguel y Chilicote, y al sureste de la sierra San Rafael.

Los depósitos conglomeráticos 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 m 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.

El Basalto (TplQpt B) es una roca ígnea extrusiva que se distribuye al este de la sierra La Ranchería. Esta unidad se encuentra formada por derrames de composición, con intercalaciones de material tobáceo arenoso de color rojizo, de naturaleza piroclástica brechoide. El 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.

La Arenisca-limo (TplAr-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.

Cuaternario

El Conglomerado Polimíctico (QhoCgp) se define como 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, depositada en las 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.

La unidad de 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.

La unidad Lacustre (Qhola) queda definida como aquellos 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, la Laguna de Patos y el Presón Isela, 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.

La unidad denominada 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.

Finalmente, el 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

En la región oriental del acuífero Laguna de Patos es posible identificar lineamientos, N-S asociados a corrimientos transcurrentes, que han modificado, deformado y dislocado las estructuras laramídicas y los límites paleogeográficos mesozoicos como los lineamientos Santa María, Benito Juárez, Moctezuma y El Barreal. 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.

De lo anterior, se distinguen regionalmente tres tipos de elementos paleotectónicos, cada uno de los cuales presentan características de deformación propias que las diferencian entre sí.

El primero de ellos corresponde a la cuenca de Chihuahua, en donde los pliegues anticlinales y sinclinales son alargados y angostos, predominantemente asimétricos con orientación NW-SE y sus planos axiales recostados hacia el SW; ocasionalmente estas estructuras se encuentran afectadas por fallamiento inverso con planos de despegue de bajo ángulo. El segundo elemento paleotectónico comprende a las rocas depositadas y deformadas sobre la paleopenínsula de Aldama; este sector se caracteriza por representar a las facies tectónicas, en donde las estructuras desarrolladas constituyen plegamientos amplios, con sus ejes orientados en dirección NW-SE, morfológicamente semejantes a estructuras dómicas y con un sistema de fallamiento exclusivamente de tipo normal. El tercero se distingue de los dos anteriores por representar facies tectónicas intermedias, en donde las estructuras formadas son moderadamente amplias y con una expresión longitudinal considerable.

La porción paleogeográfica donde se depositaron las rocas que configuran estas estructuras, corresponde a la franja marginal ubicada entre la cuenca y la porción emergida, constituida por la paleopenínsula de Aldama. La mayoría de las sierras localizadas en este sector se distinguen por tener sus ejes orientados en forma sensiblemente paralela al borde norte del paleoelemento. En el acuífero de Laguna de Patos se citan las sierras de Alcaparra, San Miguel y Presidio.

Considerando que el origen de los esfuerzos compresivos que dieron lugar a la orogenia Laramide tienen una estrecha relación con el fenómeno de subducción desarrollado en la margen occidental de Norteamérica, al consumirse la placa oceánica y suscitar la interacción de la dorsal del Pacífico contra la trinchera continental, la dirección del sistema de esfuerzos cambió radicalmente, generándose una fase distensiva caracterizada por un intenso fallamiento de tipo normal.

Este esquema configuró un panorama topográfico consistente en sierras y valles subparalelos, cuyos límites presentan una orientación NW-SE que resultan sensiblemente subparalelos a los trenes estructurales regionales laramídicos.

Este periodo tafrogénico conocido como orogenia del Paleógeno-Neógeno estuvo acompañado por un vulcanismo generalizado de tipo ácido a intermedio, cuyos efectos cesaron durante el Mioceno.

En el área también se aprecia la falla San Ignacio que tiene una orientación NW-SE conformada a partir del sistema de sierras y cuencas. En el área se distingue la estructura Presidio-Alcaparra, que está constituida por rocas sedimentarias del Cretácico inferior, formando anticlinales y sinclinales con orientaciones NW-SE y fuertes plegamientos recumbentes en la sierra Presidio. En la sierra de Mosqueteros-Alcaparra se aprecia un intenso fracturamiento de rumbo E-W y fallas normales y fallamiento inverso lo que permite que afloren las formaciones más antiguas, como las formaciones Navarrete y Las Vigas.

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. 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 naturaleza de 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 de la zona 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. 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 más 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 al menor espesor estas porciones le restan transmisividad del 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 las zonas de El Barreal y la Laguna de Patos. 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; b) materiales granulares de finos a gruesos (arenas, gravas, arcillas y conglomerados), de permeabilidad media, que constituye 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

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2005, se ejecutaron 6 pruebas de bombeo, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, cuya duración varió de 12 a 25 horas, para la etapa de abatimiento y de 6 a 12 horas para la recuperación.

De acuerdo con los resultados de su interpretación, se observa que la transmisividad oscila entre 80 y 444 m²/día para el medio granular, es decir entre **9.45 x10⁻⁴ y 5.1x10⁻³ m²/s**. No existen actualmente pozos que exploten las rocas fracturadas. Los valores mayores corresponden a la porción centro del acuífero, los cuales disminuyen gradualmente hacia los flancos de las montañas debido a la disminución del espesor de los depósitos granulares. Los valores más bajos se asocian a la presencia de materiales arcillosos en la zona.

Debido a la falta de pozos de observación durante la realización de las pruebas de bombeo, no fue posible determinar el coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico del acuífero.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró la información disponible para 2005.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De la configuración de profundidad al nivel estático de 2005, se puede observar que los valores varían entre menos de 5 m, registrados en la zona de El Barreal y las inmediaciones de la Laguna de Patos, hasta poco más de 140 m, que se observan hacia la Sierra San Rafael y la porción sur y suroeste del acuífero (figura 3).

Hacia al centro del valle, donde la unidad de materiales granulares de finos a gruesos tiene un mayor espesor saturado, el valor promedio de profundidad al nivel estático se sitúa alrededor de los 30 m.

Hacia la porción sureste del acuífero, en dirección de las sierras El Hacha y El Fierro, se observan niveles freáticos someros.

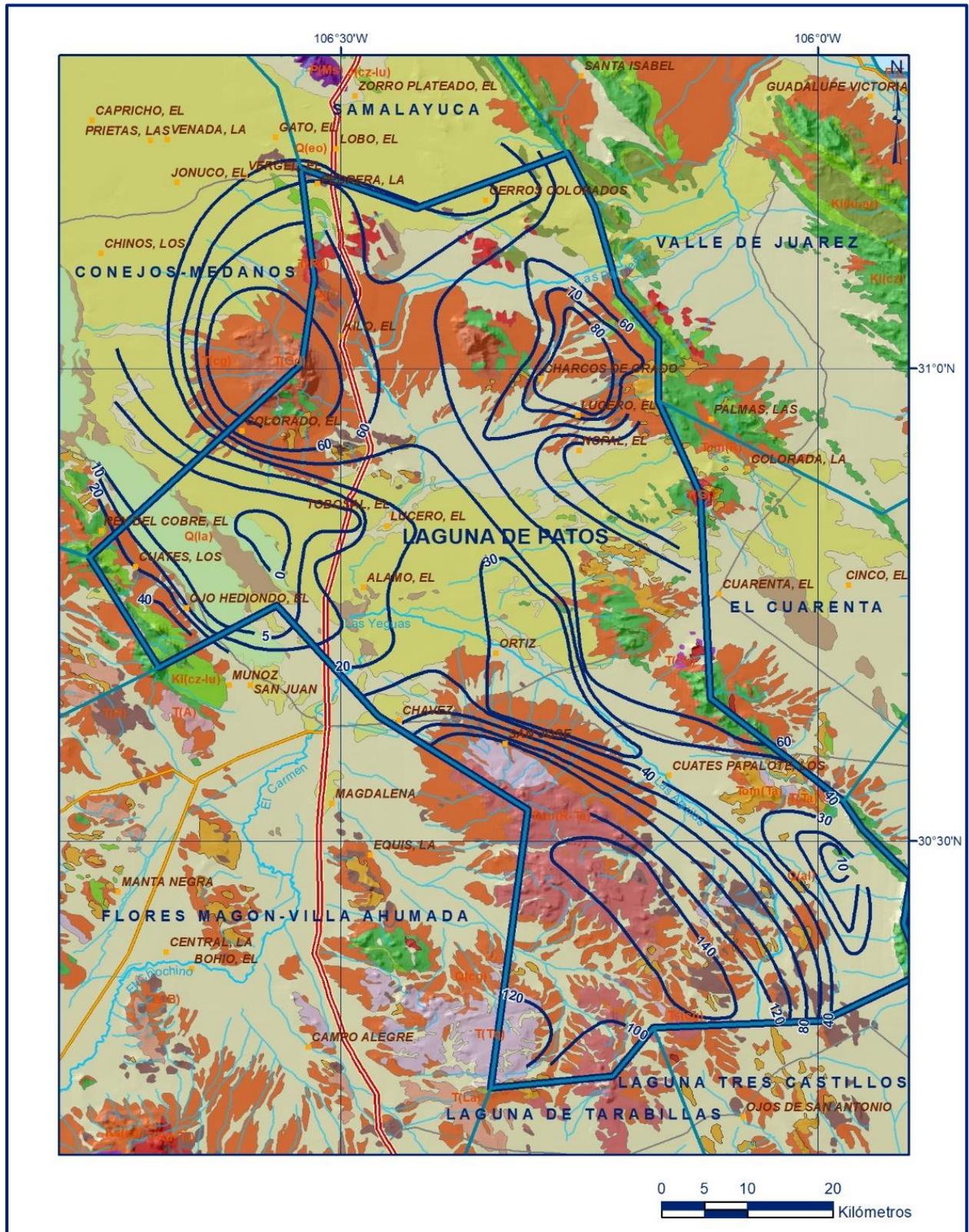


Figura. 3. Profundidad al nivel estático en m (2005)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita la 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 demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

El volumen de extracción se ha estimado en 7.5 hm³ anuales, valor que es muy inferior a la recarga más conservadora que pudiera estimarse.

Por lo anterior se deduce 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. Sin embargo, el cambio de almacenamiento será considerado como la incógnita a estimar.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

En 2005, se tomaron muestras de agua en 25 pozos para su análisis físicoquímicos correspondiente. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, Nitratos, dureza total y sólidos totales disueltos. Con respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta los resultados de los análisis físicoquímicos, los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) varían de 245 a 3800 mg/l.

De acuerdo con el contenido de STD, el 40% de las muestras (10) se clasifican como agua dulce, el 36% (9) como agua salada y las 6 muestras restantes (24%) se clasifican como de mediana salinidad.

Los valores más bajos de STD se registran en la zona norte y hacia los flancos de las montañas que delimitan el acuífero, identificando de esta manera las zonas de recarga al acuífero. Los valores más altos se presentan hacia El Barreal y la Laguna de Patos.

Los diagramas de origen de las salmueras elaborados indican que para la mayoría de las aguas recolectadas se presenta una firma hidrogeoquímica propia de lagos alcalinos, muy comunes en las zonas áridas, que contienen en solución grandes cantidades de carbonatos de sodio y potasio, así como cloruros.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), de las 25 muestras recolectadas 8 de ellas (pozos 20, 59, 76, 77, 86, 101, 118 y 120) se clasifican como C1-S1, es decir aguas de baja salinidad y bajo contenido de sodio, que no imponen restricción alguna ni para el riego de los cultivos ni para los suelos de la región. Cuatro muestras más (pozos 63, 70, 81 y 100) se clasifican como C2-S1, es decir, aguas de salinidad media y bajo contenido de sodio, que pueden utilizarse para el riego agrícola cuando se realicen lavados del suelo. Los pozos 67 y 105 se clasifican como C3-S1 que representan aguas de alta salinidad y bajo contenido de sodio. Conforme aumenta la concentración de sales y el contenido de sodio, se imponen mayores restricciones para el uso de las aguas en el riego, requiriéndose lavados del suelo, obras de drenaje y condiciones particulares de la granulometría del suelo.

En estos casos, sólo es posible el cultivo de especies tolerantes a las sales. Las muestras de los pozos 26, 51 y 52 se clasifican como C2-S2, las de los pozos 21 y 49 como C3-S2, las de los pozos 23 y 29 como C3-S3, la que proviene del pozo 114 como C1-S4, la muestra del pozo No 14 como C3-S4 y finalmente las que corresponden a los pozos 8 y 110 como C4-S4. Estas últimas representan la condición extrema con altas concentraciones de sales y de sodio, que no son aptas para su uso en el riego.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los resultados reportados del censo de 2005, se registraron un total de 120 obras en el acuífero que aprovechan las aguas subterráneas, de cuales 69 están activas y los 51 restantes inactivas.

De los 69 aprovechamientos activos, 22 de ellos (31.9%) se destinan al uso agrícola, 41 (59.4%) para uso agropecuario, 4 más (5.8%) para uso doméstico-abrevadero y los 2 restantes (2.9%) se utilizan para actividades recreativas.

El volumen de extracción conjunto estimado asciende a los **7.1 hm³ anuales**, de los cuales 6.2 hm³ (87.3%) se destinan a las actividades agrícolas, 0.7 (9.9%) al uso agropecuario, 0.15 más (2.1%) para las actividades recreativas y los 0.05 hm³ restantes (0.7%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

De esta manera la ecuación de balance propuesta para éste acuífero es la siguiente:

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

Dónde:

R_v: Recarga vertical;

R_r: Recarga por retorno de riego;

ETR: Evapotranspiración;

B: Bombeo;

S_h: Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ΔV(S): Cambio de almacenamiento;

Para este caso particular, debido a que no existe información derivada de pruebas de bombeo en la zona cercana a los canales de flujo identificados en la configuración de elevación del nivel estático que permita plantear un balance de aguas subterráneas en la forma "tradicional", se optó por calcular la recarga vertical por medio de métodos alternos, en lugar de considerarla como incógnita.

7.1 Entradas

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

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero Laguna de Patos, las entradas están integradas por la recarga vertical (R_v) 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 (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola constituye otra fuente de recarga al acuífero. Este volumen se integra en la componente de recarga inducida (R_i) como recargas por retornos de riego (R_r).

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

En la provincia fisiográfica de Sierras y Cuencas, la recarga de frente de montaña tiene dos componentes: el flujo subterráneo que proviene de las sierras que delimitan el valle, a través de fracturas y/o conductos de disolución, que se dirige hacia los sedimentos que rellenan la cuenca; y la infiltración en los cinturones de piedemonte. A su vez, en estos últimos la recarga se efectúa por medio de la infiltración que se produce a lo largo de los arroyos que drenan las sierras y también de manera difusa.

Aunque el valor de precipitación de 249 mm anuales invalida la aplicación de métodos empíricos (Turc, Coutagne) para estimar la evapotranspiración real, que permita a su vez el cálculo de la infiltración a través de un balance hidrometeorológico, en este tipo de condiciones climáticas la recarga difusa por infiltración y percolación de las escasas lluvias en la superficie del valle tiende a ser nula. En la zona no existen corrientes superficiales de importancia, por lo que la recarga del acuífero que se efectúa en los piedemonte ocurre principalmente a lo largo del cauce de los efímeros escurrimientos de los arroyos que drenan las sierras situadas por el límite oriental del acuífero, alrededor de la sierra La Candelaria, de las sierras San Ignacio y San Rafael, y en la zona intermontana situada entre ésta última sierra y los cerros situados al extremo suroeste del acuífero.

Para la estimación de la recarga vertical, se proponen dos métodos, en este cálculo se incluye la estimación de las entradas por flujos subterráneo horizontal, debido a que no existe información para realizar la estimación utilizando la Ley de Darcy en las zonas de pie de monte:

Para la estimación de la recarga en los cinturones de piedemonte que se presentan en el acuífero se plantea la ocurrencia de una recarga difusa (infiltración directa y percolación subsiguiente del agua de lluvia) y de una recarga por infiltración a lo largo de los arroyos que drenan las sierras. Para la provincia de Sierras y Cuencas la recarga difusa se estima en el 3% de la precipitación media anual, cuando ésta varía entre los 200 y 300 mm (Rantz & Eakin, 1971).

Por tanto, para una precipitación media anual de 249 mm, se obtiene un valor de recarga difusa de 7.5 mm como media anual, que ocurre solamente en los cinturones de piedemonte.

Por otra parte, suponiendo que toda el agua de escurrimiento que se genera en las partes altas de las sierras ingresa a los cinturones de piedemonte exclusivamente a través de los cauces superficiales, se usará la fórmula de Chávez et al. (1994), desarrollada para las condiciones típicas de la provincia de Sierras y Cuencas:

$$\frac{\bar{R}}{\bar{P}} = 2 \left(\frac{h_r}{h_s} \right)^{1/2} K_1 \left[2 \left(\frac{h_r}{h_s} \right)^{1/2} \right]$$

Donde: \bar{R} es el escurrimiento medio anual (o estacional), \bar{P} es la precipitación media anual (o estacional), h_r es la abstracción inicial efectiva (en espacio y tiempo), h_s es la altura promedio de los eventos de lluvia, y $K_1[]$ es la función de Bessel modificada de primer orden.

La gráfica de esta ecuación se presenta en la figura 6 para valores seleccionados de h_s . En la práctica, h_s se calcula a partir de los registros diarios de precipitación suponiendo que el valor diario reportado ocurrió en un solo evento de lluvia.

Para este caso, el valor de la abstracción inicial h_r que se consideró es de 20 mm, valor típico para las áreas con vegetación xerófila escasa de la provincia Sierras y Cuencas (Chávez, et al., 1994).

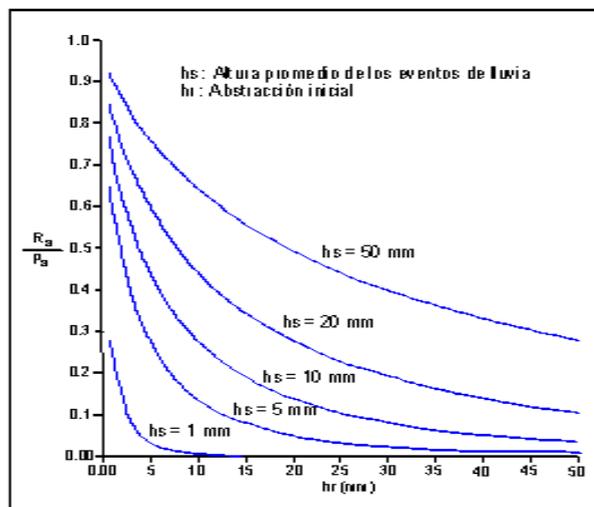


Figura 6. Relación escurrimiento-precipitación media en áreas de montaña

La altura promedio de los eventos de lluvia, \bar{h}_s , se calculó en 6.3 mm a partir del registro diario de precipitación de la estación Samalayuca (CNA) para el periodo 1957–2004. Aplicando la ecuación 3 se obtiene una relación de escorrentía de 0.074, es decir, que el 7.4% de la precipitación media anual (o estacional) en las sierras escurre (encauzada) hacia los cinturones de piedemonte.

En las partes altas de las sierras la precipitación pluvial debe ser mayor a la media anual de 249 mm de la estación Samalayuca, pero admitiendo este valor como una buena aproximación, se tiene entonces que escurren 18.4 mm por los arroyos hacia las zonas de piedemonte.

Para cuatro arroyos efímeros que drenan sierras en esta provincia fisiográfica, Burkham (1970) reportó 72, 45, 92 y 60 como porcentajes de infiltración del agua encauzada, lo que determina un promedio de 67%.

Aplicando este porcentaje a los 18.4 mm de agua que ingresa encauzada a las zonas de piedemonte de Laguna de Patos, se obtiene 12.3 mm de infiltración cuyo valor se tomará como recarga al acuífero. Esto corresponde virtualmente al 5% de la precipitación media anual. Si a este porcentaje se le añade el 3% de recarga difusa de Rantz & Eakin, se tiene entonces una recarga total del 8% de la precipitación pluvial en los cinturones de piedemonte. De esta manera, para un área de piedemonte de 403 km², una precipitación media anual de 249 mm y tomando el 8% de ésta como recarga del acuífero, se obtiene una recarga vertical de **8.0 hm³/año** en el acuífero Laguna de Patos.

Otro método para evaluar la recarga natural es reconociendo que en condiciones prístinas (anteriores a la explotación) el acuífero de Laguna de Patos se encontraba en estado estacionario, es decir que la recarga y la descarga eran de la misma magnitud. Bajo esta consideración, la descarga se producía casi en su totalidad en la zona lacustre de El Barreal.

Aceptando esto, la recarga natural actual del acuífero es igual en magnitud al volumen de extracción. Knuteson et al. (1989) documenta la posibilidad teórica de que la pérdida por evaporación mediante el fenómeno de capilaridad ocurra hasta los 5 m de profundidad en suelos limo–arcillosos. Para calcular la descarga prístina en la zona lacustre se consideró que el área evaporativa se pudo haber extendido en el pasado hasta la isolínea actual de 10 m de profundidad dentro de la poligonal del acuífero, en donde el bombeo a través de pozos ha abatido los niveles de agua subterránea, y hasta la isolínea de 5 m de profundidad fuera de la poligonal, en donde existen pozos cercanos a la zona lacustre.

Suponiendo que, dentro de la poligonal del acuífero, la isolínea actual de 10 m de profundidad corresponde a la isolínea de 5 m existente en condiciones prístinas, pero que fuera de la poligonal la traza de la isolínea de 5 m — inferida considerando la morfología de la zona lacustre— no ha variado en el tiempo. Con esto, se tiene un área evaporativa prístina de 322.1 km² dentro de la poligonal del acuífero de Laguna de Patos y de 439.4 km² fuera de ella.

Por otra parte, el valor promedio anual para el periodo 1992–1998 de evaporación en el tanque Tipo A de la estación Samalayuca es 2384 mm, que al multiplicarse por el factor 0.75 (Saxton & McGuinness, 1982, p. 235) proporciona una evaporación potencial (EP) de 1788 mm en la laguna.

Si consideramos una profundidad promedio del agua subterránea en el área evaporativa de 2.5 m, la evaporación a través del suelo se calcula multiplicando la evaporación registrada en el tanque por el factor de 0.01 (CNA, 1994), pero al considerar que la evaporación decrece no sólo con la profundidad al nivel freático sino también con la salinidad del suelo (Rantz & Eakin, 1971), cuya concentración es muy alta en El Barreal, el factor 0.01 se aplicará aquí a la EP (1788 mm) —que es un valor inferior a la evaporación en el tanque—, de donde se obtiene un volumen de 5.8 hm³/año en el área evaporativa prístina dentro de la poligonal del acuífero de Laguna de Patos, y de 7.9 hm³/año fuera de ella (figura 7).

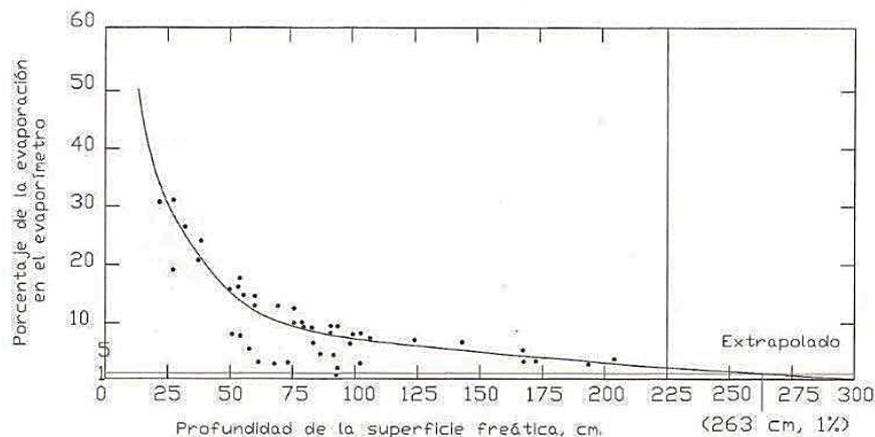


Figura 7. Porcentaje de evaporación en función de la profundidad de la superficie freática

De los 7.9 hm³/año, se supondrá que el 50% alcanza la zona evaporativa mediante flujo subterráneo proveniente del oriente, es decir, como salida subterránea lateral del acuífero de Laguna de Patos, y el otro 50% alcanza esta parte de El Barreal con agua del propio acuífero en donde se encuentra esta porción, es decir en el acuífero vecino Conejos–Médanos.

Con esto, la descarga prístina por evaporación en El Barreal dentro de la poligonal del acuífero de Laguna de Patos asciende a 5.8 hm³/año, y fuera de la poligonal, pero con agua procedente de este mismo acuífero como salida lateral, es 3.9 hm³/año. En consecuencia, la descarga prístina natural del acuífero de Laguna de Patos sería 9.7 hm³/año.

Este valor es igual en magnitud a la recarga natural del acuífero, que en su media anual la supondremos como invariante en el tiempo e independiente de la explotación por pozos.

Tomando el promedio de la recarga calculada por ambos métodos, el directo (8.0 hm³/año) y el indirecto (9.7 hm³/año), la **recarga vertical** del acuífero de Laguna de Patos asciende a **8.9 hm³/año**.

7.1.2 Retornos de riego (Rr)

En esta variable se incluyen los volúmenes de infiltración de agua que se producen exclusivamente por concepto de los excedentes del riego ya que en la región no existen asentamientos humanos importantes cuya infraestructura hidráulica pueda generar fugas en los sistemas de abastecimiento de agua potable y/o de alcantarillado.

En el acuífero Laguna de Patos existe una zona agrícola cuya superficie aproximada es de 600 ha, que se localiza entre Laguna de Patos y la sierra Ranchería por el oriente, y con rumbo a El Barreal por el poniente, hacia ambos lados de la Carretera Panamericana. Los cultivos principales son alfalfa (70 %), avena (20 %), y sorgo (10 %).

El uso consuntivo promedio (\overline{UC}) se calculó como:

$$\overline{UC} = \frac{\sum_1^3 A_i UC_i}{\sum_1^3 A_i} \quad (4)$$

Dónde: A_i y UC_i son el área y el uso consuntivo del cultivo i . La estimación del uso consuntivo por cultivo se realizó mediante la fórmula de Blaney–Criddle modificada por Phelan (Aguilera y Martínez, 1996). Si $i = 1, 2, 3$ para la alfalfa, avena y sorgo, respectivamente, se tiene:

$$\overline{UC} = \frac{(420 \text{ ha} \times 1008 \text{ mm}) + (120 \text{ ha} \times 753 \text{ mm}) + (60 \text{ ha} \times 703 \text{ mm})}{600 \text{ ha}} = 926 \text{ mm}$$

Por el método de balance hídrico, la recarga por retorno de riego (R_r), se calcula como:

$$R_r = P + L_r - \overline{UC} \quad (5)$$

Donde L_r es la lámina de riego aplicada, la cual se obtiene como el cociente de la extracción para uso agrícola (6.2 hm³/año) y la superficie regada (600 ha), arrojando un valor de 1,033 mm. De esta manera:

$$R_r = 249 + 1033 - 926 = 356 \text{ mm}$$

Esta recarga equivale al 27.6% de la suma de la precipitación pluvial y la lámina de riego aplicada, y asciende a **2.1 hm³/año**. Si se considera la lámina de riego únicamente, esta cantidad representa el 35%, que es un porcentaje cercano a los que reporta la Arizona Water Commission (1975) para muchas de las áreas agrícolas en ese estado.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), la evapotranspiración directa en las zonas de niveles freáticos someros (ETR) y las salidas por flujo subterráneo (Sh) hacia la zona de El Barreal, en el vecino acuífero Conejos-Médanos.

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Para la estimación de la descarga natural por efecto de la evaporación que se produce por la presencia de niveles freáticos someros en la zona de El Barreal, se supone que ésta ocurre dentro de la isolínea actual de 5 m de profundidad (figura 3) que define la zona evaporativa dentro del acuífero.

Suponiendo una profundidad promedio al nivel del agua subterránea de 2.5 m, a la cual, como se indicó anteriormente, se le asocia un factor de 0.01 de la evaporación potencial de 1,788 mm para calcular la evaporación real, y una superficie de 225.7 km² dentro de la poligonal del acuífero de Laguna de Patos, el valor de la evaporación real es de **4.0 hm³ año**.

7.2.2 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **7.1 hm³/año**.

7.2.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

El cálculo de las salidas, que por flujo subterráneo se presentan hacia el acuífero vecino Conejos-Médanos, se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático de diciembre del 2005 mostrada en la figura 4, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

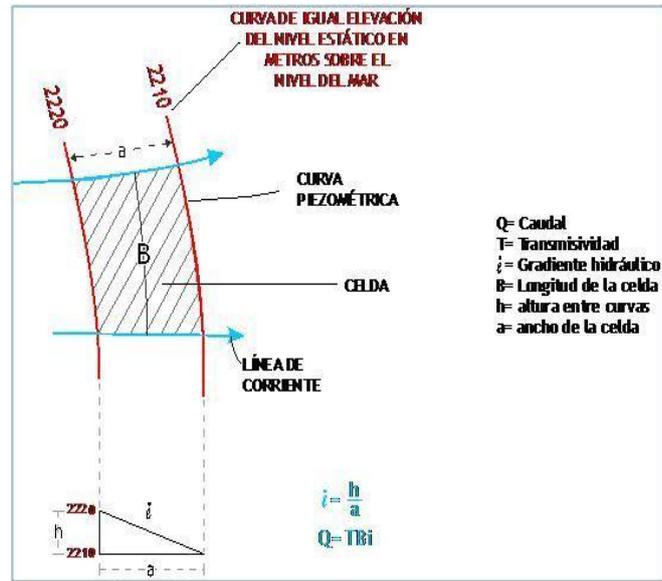
Dónde:

Q = Gasto [m^3/s];

T = Transmisividad [m^2/s];

B = Longitud de la celda [m];

i = Gradiente hidráulico;



El volumen estimado de las salidas subterráneas es de **7.3 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas subterráneas

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente hidráulico i	Trasmisividad (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN ($hm^3/año$)
S1	16859	5457	50	0.00916	0.0015	0.2317	7.3
TOTAL							7.3

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

Los registros existentes de estudios previos se encuentran dispersos en tiempo y espacio, no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero y el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero; 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.

Como se evaluaron las otras componentes del balance de aguas subterráneas el valor de cambio de almacenamiento se despejará de la ecuación de balance.

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 el cambio de almacenamiento, despejando este término de la ecuación de balance (1), se tiene:

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

$$\Delta V(S) = 8.9 + 2.1 - 4 - 7.1 - 7.3$$

$$\Delta V(S) = - 7.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8 DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural (8.9 hm³/año), más la recarga inducida (2.1 hm³/año).

Por lo tanto, para el caso de este acuífero es de **R = 11.0 hm³/año.**

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

Para el caso del acuífero Laguna de Patos no se consideran descargas naturales comprometidas ya que las salidas subterráneas son hacia la zona de evaporación localizada en la zona El Barreal, dentro del acuífero Conejos-Médanos y en la zona de evaporación localizada en el acuífero Laguna de Patos el agua subterránea contiene altas concentraciones de sales que hacen que sean consideradas inadecuadas para su aprovechamiento.

Por lo tanto, **DNC = 0.0**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **64,918,933 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DAS} &= 11.0 - 0.0 - 64.918933 \\ \text{DMA} &= -53.918933 \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **53,918,933 m³ anuales.**