



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ALTO RÍO SAN PEDRO (0838)
ESTADO DE CHIHUAHUA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. Fisiografía.....	5
3.1 Clima	5
3.2 Hidrografía.....	6
3.4 Geomorfología.....	7
4. Geología.....	8
4.1 Estratigrafía	8
5. HIDROGEOLOGÍA.....	12
5.1 Geología estructural.....	13
5.2 Hidrología subterránea	15
5.3 Tipo de acuífero.....	16
5.4 Comportamiento hidráulico.....	16
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	16
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3 Evolución del nivel estático	19
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	20
7.1 Entradas.....	20
7.2 Salidas	21
7.2.1 Descarga	21
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	22
8. DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	24
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	24
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	24
8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)	25

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

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

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

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

1.1 Localización

El acuífero Alto Río San Pedro, definido con la clave 0838 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la parte central del estado de Chihuahua; está limitado al norte por la sierra Azul, al noroeste por la sierra Bernabé, al oeste por las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, al sureste por la sierra La Cieneguilla, y al este por la presa Francisco I. Madero (Figura 1).

El valle cubre una superficie aproximada de **11,088 km²**. La poligonal simplificada que delimita el acuífero, se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 1.

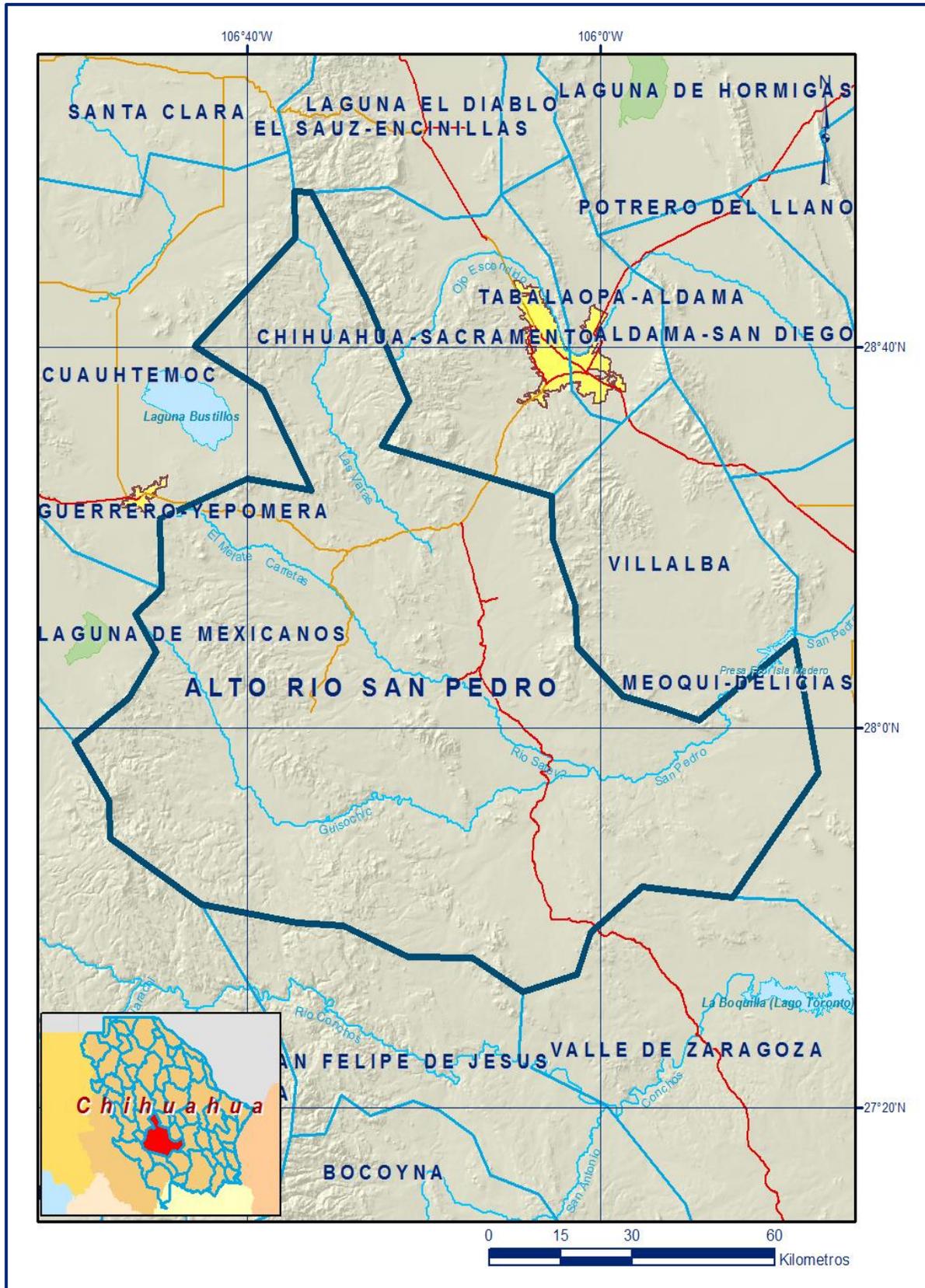


Figura 1. Localización del acuífero

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0838 ALTO RIO SAN PEDRO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	105	45	18	27	42	7.4
2	105	55	18.2	27	43	15.2
3	106	1	5.3	27	38	30.3
4	106	2	41.5	27	34	11
5	106	8	46.0	27	32	12.2
6	106	14	30.8	27	35	45.4
7	106	21	49.1	27	35	55.7
8	106	29	9.2	27	39	13.7
9	106	34	23.5	27	39	29.4
10	106	45	17.3	27	41	25.9
11	106	55	38.8	27	48	210
12	106	55	44.6	27	52	19.5
13	106	59	35.4	27	58	23.0
14	106	53	28.0	28	3	5.8
15	106	50	21.6	28	7	57.9
16	106	52	42.2	28	11	59.2
17	106	49	48.3	28	14	37.1
18	106	49	58.6	28	21	57.9
19	106	40	0.1	28	26	8.1
20	106	32	48.9	28	24	59.0
21	106	38	11.4	28	35	29.2
22	106	46	2.1	28	40	7.3
23	106	34	39.0	28	51	32.4
24	106	34	42.0	28	56	22.2
25	106	32	48.5	28	56	19.5
26	106	26	34.8	28	45	18
27	106	21	41.5	28	34	211
28	106	24	45.4	28	29	39.4
29	106	5	34.5	28	24	19.7
30	106	5	24.2	28	19	52.3
31	106	2	49.7	28	12	53.9
32	106	2	40.0	28	8	34.1
33	105	57	34.6	28	3	19.2
34	105	52	17.7	28	1	51.9
35	105	48	49.0	28	0	46.7
36	105	37	58.2	28	9	9.6
37	105	35	20.9	27	55	13.6
1	105	45	18	27	42	7.4

1.2 Situación administrativa del acuífero

La zona del acuífero está integrada por la totalidad de los municipios Dr. Belisario Domínguez, Gran Morelos y General Trías, y en forma parcial por los municipios de Cuzihuirachi, Chihuahua, Riva Palacio, San Francisco de Borja, Rosales y Satevó; así como de una pequeña parte de los municipios de Cuauhtémoc, Delicias, Saucillo y Valle Zaragoza.

El acceso a la zona es por medio de las carreteras federales No.16 y No. 24: la primera atraviesa la zona de oriente a poniente y comunica la población de Chihuahua con Cd. Cuauhtémoc, en su recorrido se puede tener acceso a poblados como Rancho de Rosas, Santa Isabel, Santa Rosa, San Juan de Abajo y Los Ojos; la carretera federal 24 atraviesa la zona de estudio de sur a norte; partiendo de Hidalgo del Parral hacia Chihuahua se tiene comunicación con diversos poblados como Ranchería Valeria, San Francisco Javier Satevó y Soliceño, hasta entroncar con la carretera No. 16, la que tiene comunicación con la capital de Chihuahua. Asimismo, la zona cuenta con diversos caminos pavimentados y otros de terracería que permiten la comunicación con otros poblados de la localidad, entre ellos se tiene el camino que parte del entronque de la carretera No.16, a la altura del poblado de Santa Rosa, y que llega a San Francisco de Borja, pasando por varias localidades. Por la parte norte de la zona, el ferrocarril que comunica a Chihuahua y Cd. Cuauhtémoc atraviesa el valle de General Trías.

Entre las poblaciones más importante que se ubican dentro del área, destacan: San Francisco Javier Satevó, General Trías, Riva Palacio, San Francisco de Borja, Santa Rosalía de Cuevas, Tutuaca y Gran Morelos, sí como poblaciones menores y rancherías como: Guadalupe, Dr. Belisario Domínguez, Vicente Guerrero, La Paz, Santa Ana de Arriba, San Cayetano, Lago de Jacales, San Andrés y Santa Cruz de Mayo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el año de 1985 se realizó un **estudio geohidrológico para la cuenca alta del Río San Pedro, Chih**, único del que se tiene información.

3. Fisiografía

3.1 Clima

De acuerdo con los criterios propuestos por Köppen y modificados por E. García, en la porción occidental, donde predominan las serranías, el clima se identifica con las siglas BS₁ Kw (w), que significan semiseco, templado, con lluvias en verano y un por ciento de precipitación invernal menor de 5.

En la porción central se advierte una estrecha franja orientada de norte a sur con clima BS₀ kw(w), que significa seco templado, con lluvias en verano y un por ciento de precipitación invernal menor de 5. En la porción oriental, el clima varía a BS₀ hw(w), o sea seco, semicálido con lluvias en verano y un por ciento de precipitación invernal menor de 5.

La temperatura media anual para esta zona es del orden de 15° a 16° C. La precipitación media anual para la zona de estudio es del orden de 450 a 500 mm. Para esta área se ha considerado una evaporación potencial media anual de 2 400 mm.

3.2 Hidrografía

El acuífero Alto Río San Pedro pertenece a la Región Hidrológica No. 24, Bravo-Conchos, Subregión Hidrológica 24a Cuenca Río Conchos, Subcuenca Río San Pedro. Desde el punto de vista administrativo pertenece a la región VI Río Bravo.

La red hidrográfica está constituida por el río San Pedro y su sistema de afluentes, entre los que destacan los ríos Satevó, Santa Isabel, Teporachic, San Javier, Tres Hermanos y Cieneguilla.

El río Satevó nace cerca de Cd. Cuauhtémoc, donde se originan los arroyos Carretas y Santa Cruz, que cruzan los poblados de Gran Morelos y Belisario Domínguez, respectivamente, en el valle Gran Morelos, con dirección general NW-SE. A partir de la confluencia de estos dos arroyos la corriente recibe el nombre de río Satevó, escurriendo con la misma dirección general hasta su confluencia con el río Santa Isabel a la altura de la población de Satevó.

El río Santa Isabel nace en la porción nor-central del área de estudio, escurriendo primeramente con dirección general NW-SE. Después de pasar por la población de General Trías, cambia rumbo al oriente para entrar al valle Santa Isabel, donde recibe aportaciones del Arroyo Grande.

En este valle escurre con dirección general norte a sur hasta su entronque con el río Satevó. El río San Pedro nace cerca de la Laguna de los Mexicanos, donde tienen origen sus afluentes formadores Guisoichic, Sauz y Agua Caliente; después de su confluencia a la altura de San Francisco de Borja recibe el nombre de San Pedro, que prosigue tocando al poblado de Santa Ana y cruza la sierra con dirección oriente, arribando a San Rafael. Poco después recibe aportaciones de los arroyos San Javier, Tres Hermanos y Cieneguilla, antes de que se controlen sus escurrimientos en la presa Francisco I. Madero.

En la cuenca de la zona de estudio el patrón de drenaje establecido es de tipo dendrítico y paralelo, mostrando la región una disminución general de la pendiente hacia el oriente, concurriendo las corrientes hacia el río San Pedro.

Este finalmente desemboca en la presa Francisco I. Madero; el almacenamiento de esta presa se utiliza en el Distrito de Riego No. 05, de Delicias, Chih.

La capacidad total de la presa Francisco I. Madero es de 544 Mm³. De la información hidrométrica existente, sólo se pueden estudiar los escurrimientos del Río San Pedro en su tramo final, mediante las estaciones Las Vírgenes y Villalba.

La estación Las Vírgenes se instaló con la finalidad de conocer el régimen del río San Pedro para el proyecto de la presa actualmente en operación. Estuvo ubicada en la boquilla Las Vírgenes, precisamente en el sitio en que fue construida la presa Francisco I. Madero; funcionó de 1934 a 1939. La estación hidrométrica Villalba se instaló en sustitución de la anterior, aproximadamente 30 km aguas arriba de la presa y tiene por objeto medir las aportaciones del río. De acuerdo con el análisis de la estación, el volumen drenado del acuífero resulta en promedio de 25.11 hm³/año, para el período 1938-1981.

3.4 Geomorfología

El acuífero del Alto Río San Pedro, de acuerdo con la clasificación de las provincias fisiográficas realizada por INEGI, se ubica dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, Subprovincia Sierras y Llanuras de Durango, así como de una pequeña parte de la subprovincia Gran Meseta y Cañones Chihuahuenses.

La geomorfología de la región presenta un relieve en forma general volcánico piroclástico de mesetas, originado durante el Terciario y cubriendo parcialmente a un relieve de montañas cretácicas.

Actualmente se presentan modificadas en bloques escalonados y separados por valles de origen tectónico, en donde se depositaron posteriormente grandes volúmenes de material aluvial, encontrándose en su mayor parte disectados y con presencia de sedimentos lacustres.

Las montañas y mesetas dentro del área se caracterizan por numerosos escarpes y profundos cañones labrados por los agentes erosivos, evidenciado por la ruptura de pendiente en los sedimentos clásticos, lo cual le da un aspecto de etapa de rejuvenecimiento desde el punto de vista geomorfológico; sin embargo, en algunas zonas del área, sobre todo en los valles y regiones áridas, se encuentra en una etapa de madurez.

4. Geología

4.1 Estratigrafía

De acuerdo a la estratigrafía, en el área de estudio quedan comprendidas desde rocas sedimentarias marinas del Cretácico Inferior, rocas ígneas y clásticas continentales del Terciario, hasta materiales de acarreo del Cuaternario, que a continuación se describen de las más antiguas a las más recientes (Figura 2).

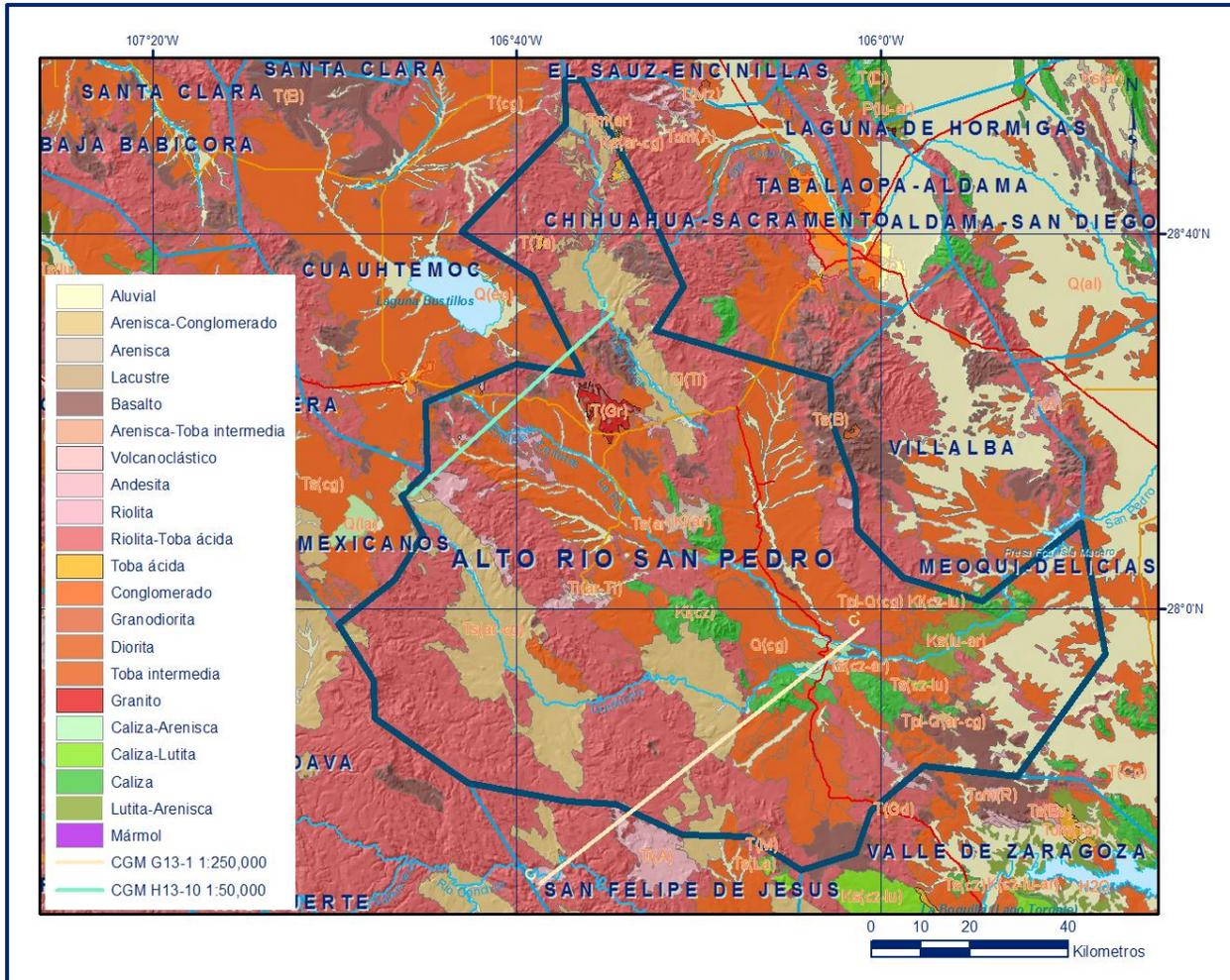


Figura 2. Geología general del acuífero

Rocas sedimentarias calizas

Las rocas calizas del Cretácico Inferior comprenden a un conjunto de rocas marinas calcáreas que afloran en la sierra Magistral, al centro del área, en la sierra La Chaconeña, y en la sierra Savonarola en la porción oriental. Este paquete de rocas calizas corresponde a la Formación Aurora, depositada durante el Albiano Inferior y Medio en un ambiente marino de plataforma.

Presentan un color gris y pardo rojizo, de textura micrítica y gramocrítica, de estratificación gruesa a masiva, con algunas capas de lutitas calcáreas. Asimismo, se observa un segundo paquete de calizas grises y café rojizas de textura calcidurítica, con estratificación gruesa a masiva; se infiere que se depositó en un ambiente de plataforma, posiblemente en el Barremiano, cuyos fósiles indican que se trata de la formación Cupido.

Otro paquete de rocas se localiza estratigráficamente entre las Formaciones Aurora y Cupido, consistente de una alternancia de margas y calizas.

En el área de estudio se identifican también unidades que presentan características litológicas semejantes al grupo Washita indiferenciado y a la Formación Ojinaga. El primer grupo está constituido por una alternancia de calizas y lutitas que se depositaron en ambiente nerítico. Por su posición estratigráfica con respecto a las Formaciones Aurora y Ojinaga se le asigna al grupo Washita una edad de Albiano Superior al Cenomaniano, además de ser correlacionable con las formaciones del Río y Buda. La formación Ojinaga está constituida por calizas arcillosas, lutitas y areniscas que se depositaron en ambiente nerítico, y de acuerdo a su contenido faunístico permiten fijar una edad del Cenomiano Superior al Turoniano.

El contacto inferior de la formación Ojinaga se observa concordante con la parte superior del grupo Washita indiferenciado; asimismo, está cubierta discordantemente por rocas volcánicas terciarias; al sur de la sierra Magistral aflora con un espesor aproximado de 500 m.

Conglomerados

Están constituidos por clastos depositados en un ambiente continental, rellenando las fosas tectónicas. Su tamaño varía desde gravas, cantos redondos y bloques incluidos en una matriz areno-arcillosa, medianamente cementados por carbonatos de calcio y hematita. La mayoría de los clastos son derivados de rocas ígneas (riolitas, tobas riolíticas y basaltos), y de rocas calizas.

La unidad se presenta en ocasiones intercalada con areniscas conglomeráticas y aflora en las zonas de Gral. Trías, en las rancherías Vallecillo y el Charco y en los poblados de Gran Morelos, Belisario Domínguez y Santa Rosalía Cuevas, formando extensas planicies.

Por su posición estratigráfica, se le asigna una edad del Terciario Superior. Del Cuaternario se presenta una unidad de conglomerados polimícticos cuyos fragmentos son de rocas ígneas principalmente que van de subredondeados a redondeados, con un rango granulométrico amplio en una matriz arcillosa, mal compactados y pobremente cementados por carbonatos de calcio. Representan las acumulaciones de origen continental más recientes, cuyos afloramientos se localizan al pie de las sierras, al sur de Santa Rosalía de Cuevas y al oriente de la sierra Chacomeña.

Aluvial

Esta unidad litológica incluye a todos los depósitos recientes de origen aluvial. Dichos materiales están constituidos por fragmentos líticos y de minerales plagioclasas, cuarzo y micas; su granulometría es variable y sus componentes van de subredondeados a redondeados.

Están ampliamente distribuidos en la porción sureste del área, formando rellenos de valles fluviales o escasas planicies aluviales.

Rocas ígneas intrusivas

Granito

Se encuentran muy fracturados superficialmente y con intemperismo esferoidal. Afloran en el poblado del Aguaje, al pie de la carretera que va de Gral. Trías a Cuauhtémoc, donde está cubierto por conglomerados. Su edad se asigna al Terciario Medio.

Granodiorita

En el área de estudio aparecen afloramientos muy escasos de esta unidad, localizándose en la porción sureste, a la altura del poblado Santa María de Cuevas, de la ranchería Colonia y en la sierra Magistral. La roca presenta intemperismo esferoidal y fuerte oxidación; posiblemente su edad corresponde al Terciario medio, Eoceno-Oligoceno.

Rocas ígneas extrusivas

Andesita

Estas rocas afloran principalmente en la sierra El Durazno, en el poblado de Buenavista y en la porción sureste del área de estudio. Corresponden a la secuencia volcánica calcoalcalina de la Sierra Madre Occidental. Esta unidad subyace a las rocas piroclásticas, por lo que se le asigna una edad del Terciario Inferior.

Toba intermedia

Se aprecian afloramientos de estas rocas en las cercanías de la comunidad Granillas, al oriente de Gral. Trías. Está constituida por rocas líticas andesíticas, con estructura compacta. Esta unidad pertenece también a la secuencia volcánica calcoalcalinas del Terciario Inferior.

Toba ácida

Se trata de una unidad constituida por tobas silíceas e ignimbritas que presentan con frecuencia pseudoestratificación y cubren a las areniscas del Terciario, como se aprecia en el extremo norte del área y cerca de la ciudad de Chihuahua, ya fuera del área de estudio. Se le asigna una edad correspondiente al Terciario Medio.

Riolita-Toba ácida

Esta unidad aparece ampliamente distribuida en el área, formando parte de las sierras que tienen las mayores altitudes. En algunos afloramientos se observan alternancia de riolitas con tobas ácidas brechoideas.

Cubren discordantemente a las rocas sedimentarias del Mesozoico así como a las rocas volcánicas del Terciario Inferior. También aparecen en algunas partes cubiertas por derrames de basalto, como sucede sobre la carretera Chihuahua a Gral. Trías, en el tramo de Palomas a San Pedro, y generalmente están cubiertas por depósitos aluviales del Terciario Superior-Cuaternario, razón por la cual se les asigna una edad del Terciario Superior, Oligoceno-Mioceno.

Basaltos

Los derrames de esta unidad afloran ampliamente en el centro y en el extremo noreste del área, formando mesetas y lomeríos suaves de poca altura; en ocasiones aparece coronando algunas de las sierras de la región.

Sus derrames son compactos y masivos, aunque en algunas partes están sumamente fracturados y alterados; en ocasiones descansan sobre riolitas y tobas riolíticas, y en otras sobre conglomerados y materiales de acarreo del Terciario.

Constituyen el último evento de las emisiones volcánicas del Terciario Superior, Mioceno–Plioceno.

5. HIDROGEOLOGÍA

El basamento geohidrológico está constituido por estructuras de calizas y los intrusivos graníticos, granodioritas y monzonitas que las afectaron y por las unidades impermeables que ocasionalmente las sobreyacen, como la secuencia de tobas intermedias y ácidas.

El sistema de sierras orientadas NW-SE y que delimitan a los valles intermontanos, representan las áreas principales de recarga a los acuíferos constituidos en los diferentes tipos de conglomerados. Es posible que las calizas también representen acuíferos susceptibles de explotación.

La unidad calizas del Cretácico inferior compuesta por calizas con estratificación masiva y que alternan con algunas capas de lutita calcáreas, pueden contener buenos acuíferos en los horizontes afectados con fracturas y oquedades de disolución, que corresponden a depósitos de plataforma, siempre y cuando se localicen abajo del nivel de saturación.

La unidad arenisca-conglomerado del Terciario Superior, con morfología de lomeríos bajos y mesetas, presentan permeabilidades bajas que permiten a los pozos bombear caudales bajos (1 a 5 l/s) con profundidades de 100m. En la porción central del área destaca por su extensión un afloramiento conglomerático más reciente, compuesto por guijarros y cantos en una matriz arenosa, medianamente cementados por carbonatos. Estas condiciones le confieren una permeabilidad baja por lo que se cataloga como acuífero pobre. Los pozos perforados en esta unidad a 200 m, con información de caudales presentan gastos de 4 y 6 l/s. Los conglomerados del Cuaternario compuestos por fragmentos de rocas ígneas en matriz arcillosa, presentan acuíferos pobres con permeabilidades de media a baja.

Los depósitos aluviales del Cuaternario constituyen un acuífero importante, como lo demuestran numerosas norias perforadas a lo largo de los cauces de los ríos principales; sin embargo, por su pequeña extensión, poco espesor y buena permeabilidad, el agua subterránea drena rápidamente en zonas de fuerte pendiente topográfica, llegando a secar algunas norias en tiempos de estiaje.

Las unidades de rocas ígneas, especialmente cuando están fracturadas, además de constituir las sierras principales que recargan a los acuíferos de los valles intermontanos, funcionan como excelente acuífero en sus partes topográficamente bajas.

Dentro de las unidades de rocas ígneas del área de estudio, dos de ellas se son favorables desde el punto de vista geohidrológico; las primeras que corresponden a las riolitas y las tobas ácidas que ocupan las sierras de mayores altitudes y que tienen permeabilidad secundaria debido al grado de fracturamiento que presentan permiten calificarlas como buenas receptoras y transmisoras del agua infiltrada, y dependiendo de su fracturamiento, hasta como excelente acuífero.

La segunda unidad está representada por basaltos del Terciario Superior, y aunque se advierten sus derrames compactos y masivos en algunas zonas, en otras se ven sumamente fracturados por lo que su permeabilidad puede variar de baja a alta. Funciona como una unidad receptora y transmisora de agua hacia rocas más profundas de subsuelo cuando está fracturada, bien se trate de las riolitas o también de conglomerados sobre los que descansan.

En la generalidad de los pozos perforados entre 57 y 122 m de profundidad, los caudales varían entre 3 y 30 l/s, promediando unos 12 l/s. Existe en el área de Gral. Trías un pozo perforado en 1,985 a 140 m de profundidad, del cual se extrae (1985) 80 l/s, al igual que otro pozo cercano para riego.

5.1 Geología estructural

La serie de acontecimientos geológicos que afectan el área en estudio puede dividirse en dos etapas principales. La primera está representada por la sedimentación Mesozoica, acompañada de eventos tectónicos sucedidos en esa Era, quedando representados dichos sedimentos por los afloramientos descritos anteriormente.

La segunda etapa corresponde a la gran actividad volcánica que tuvo lugar durante el Terciario y parte del Cuaternario, misma que está representada por diversos cuerpos de rocas ígneas, intrusivas y efusivas que afloran frecuentemente en la región.

Durante el Jurásico y principios del Neocomiano existieron algunas tierras con elevación positiva rodeando la región en estudio, tales como la península de Coahuila al oriente; la región Tarahumara al occidente; la parte norte en territorio de los Estados Unidos de Norteamérica y el archipiélago de Palomas-Villa Ahumada-Aldama, quedando en esa época todo el resto del estado de Chihuahua cubierto por mares y recibiendo sedimentos clásticos, provenientes de las áreas altas de rocas preexistentes que originaron los depósitos de la Formación Las Vigas.

Sucesivas transgresiones del mar durante el Apatiano y Albiano temprano dan por resultado depósitos de sedimentos lagunares en los bordes de las antiguas tierras con elevaciones positivas que corresponden a las facies clásticas de la Formación La Peña o yesíferas de la Formación Cuchillo del Aptiano, así como calizas neríticas que representan a la Formación Aurora, siendo estos depósitos los más antiguos que afloran en el área.

El mar cubrió casi toda la parte norte del país a fines del Albiano, dejando una angosta faja de tierra positiva, la Sierra Madre Occidental, condiciones que perdurarían estables durante el Cenomaniano (Cretácico Superior).

La regresión de los mares que terminó a fines del Cretácico Superior quedó representada por los sedimentos de lutitas, calizas, margas y areniscas que constituyeron a la Formación Ojinaga y al grupo Washita.

La emersión definitiva y plegamientos de estos sedimentos debieron suceder a fines del Cretácico Superior y principios del Terciario, provocados por la Revolución Laramídica, cuyos esfuerzos tangenciales se produjeron de oeste a este.

Simultáneamente al máximo esfuerzo plegante y aún después del mismo, las sierras fueron afalladas debido al movimiento de acomodo de las estructuras, y más adelante vino el sepultamiento parcial de los bloques caídos por fallas, como consecuencia de una intensa erosión y actividad volcánica iniciada a fines del Oligoceno, que comenzó con la expulsión de material piroclástico y afluencia de derrames de lava (riolitas y andesitas).

Después de estas emisiones tal vez ocurrieron los pocos fenómenos ígneos intrusivos locales, representados en el área por granitos y granodioritas que se observan en las cercanías del poblado Gran Morelos.

Considerando el tipo de sistema tectónico de las estructuras regionales, se puede mencionar que la fase tectónica en la que se formaron las sierras de Magistral y Chaconeña, localizadas en la porción central del área, es de tipo orogénica, razón por la cual presentan afectación por los esfuerzos tangenciales de la Orogenia Laramide, consistentes en fallas normales e inversas en los sedimentos que forman parte de las estructuras que afloran en el área.

La última fase de tectonismo es de carácter distensivo, que tuvo lugar durante el Mioceno-Plioceno, y que está representada por el dislocamiento norte-sur, originando un sistema de fosas y semigrabens en las unidades volcánicas, las cuales presentan una pseudoestratificación horizontal, con la presencia de fracturamiento cuyos cortes en ocasiones atestiguan la existencia de calderas volcánicas.

La orientación general de las estructuras calcáreas sedimentarias que afloran tiene un rumbo NW-SE, con echados en los anticlinales buzando hacia el NE-SW, presentando además fallas y fracturas paralelas dispuestas perpendicularmente a las formaciones sedimentarias.

Por lo que se refiere a los macizos de rocas volcánicas, presentan un extenso fracturamiento con orientaciones variables y fallas normales a lo largo de las estribaciones de las montañas, mostrando a la vez, una inclinación de sus derrames hacia el noreste, suroeste y sureste.

5.2 Hidrología subterránea

Las condiciones geohidrológicas de la región son bastante complejas debido a la heterogeneidad de las rocas geológicas que comprenden no sólo las eminencias sino también los valles; el aprovechamiento de las aguas subterráneas es sumamente reducido.

Desde el punto de vista geohidrológico el área de estudio en general es pobre en cuanto a su potencial debido a sus bajas permeabilidades.

Lo anterior se ha constatado por los bajos rendimientos de los pozos, salvo algunas excepciones, ya que de acuerdo a información geohidrológica estatal de Chihuahua del año de 1985, de exploraciones cercanas a esa fecha y realizadas por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, se obtuvieron en algunas de ellas resultados satisfactorios con caudales de hasta 70 l/s; sin embargo, en otras exploraciones se obtuvieron resultados negativos.

La explotación de aguas subterráneas en el área de estudio es bajo, y aunque actualmente no rebasa su potencial, debe considerarse que la zona en términos generales es geohidrológicamente pobre, por lo cual se debe tener una adecuada planeación de este recurso.

Las zonas de recarga más importantes se localizan en la unidad de riolitas y tobas ácidas que forma el sistema de sierras con mayores elevaciones, pudiendo ser al mismo tiempo un buen acuífero susceptible de explotar en sus partes bajas, colindantes con las planicies. Recarga a los acuíferos constituidos en las diferentes unidades de conglomerados tanto del Terciario como del Cuaternario, en las porciones sur y occidental del área de estudio, así como en la porción central.

La disposición geológica estructural de las sierras y valles obligan al agua subterránea a circular de NW a SE; en los valles de los ríos Satevó y Santa Isabel, se pueden inferir intercomunicaciones subterráneas a través de la unidad de alternancia de riolitas y tobas ácidas (afectadas por fracturamiento), en las porciones norte y central, por la estrecha garganta presente entre los afloramientos calizos, por lo que al último sitio citado se refiere.

El agua subterránea del acuífero reconoce finalmente los alrededores del vaso de la presa Francisco I. Madero. Los escurrimientos subterráneos de los valles General Trías y Gran Morelos alimentan a los del valle de Santa Isabel, que también son enriquecidos con recargas provenientes de los valles donde se desarrollan los arroyos San Javier y Tres Hermanos.

A la altura de Satevó la dirección adoptada por el flujo subterráneo parece coincidir sensiblemente con el cauce del río San Pedro.

5.3 Tipo de acuífero

El acuífero granular funciona como **libre** o freático. A falta de información directa, esto es, de pruebas de bombeo, las características hidráulicas del acuífero Alto Río San Pedro, se estiman para la transmisividad del orden de $0.16 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, semejante a valores obtenidos en pruebas de bombeo en el área de Cd. Cuauhtémoc, el cual colinda con este acuífero.

5.4 Comportamiento hidráulico

El acuífero del Alto Río San Pedro cuenta con datos de niveles piezométricos correspondientes a los años de 1985 y 1986.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En el acuífero del Alto Río San Pedro las profundidades del nivel estático para el año de 1986, se pueden observar en la configuración de la figura 3, que en general varían de 5 a 80 m.

En el valle de General Trías oscilan de 5 a 15 m, las mayores se localizan en su parte noroeste a la altura del lugar El Venado y parte sur, al este del poblado de General Trías; valores de 5 m se encuentran al norte de Riva Palacio, El Terrero y en el Rancho Las Rosas.

En el Valle de Gran Morelos las profundidades de los niveles estáticos varían de 10 a 80 m localizándose las mayores al sur del poblado de San Juan de Abajo, valores de 20 a 60 m se presentan en forma de una envolvente alargada entre Entronque Tacaba, Ciénega de Castillos, Cieneguilla, La Laborcita de San Javier y Santa Rosa. Profundidades del nivel estático de 30 y 35 m se observan en el poblado de La Paz.

En el área del poblado de Tutuaca se observan valores de 15 m; valores de 10 m corresponden a las estribaciones de las sierras que delimitan el valle, donde ocurre una parte de la recarga al acuífero; las menores profundidades del nivel estático de 5 m se localizan en las inmediaciones de los poblados de Guadalupe Cruz de Mayo, Dr. Belisario Domínguez y Vicente Guerrero.

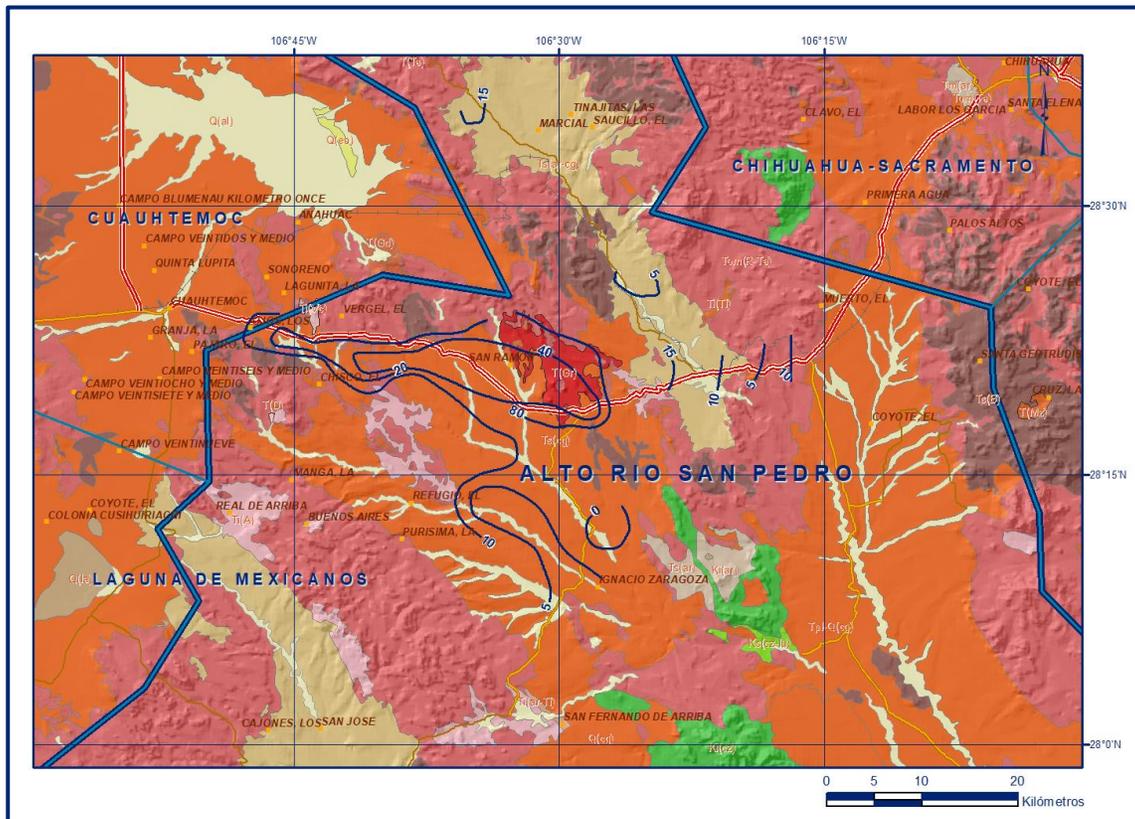


Figura 3 Profundidad al nivel estático en m (1985)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de las curvas de igual elevación del nivel estático en 1986, muestra que el agua subterránea en los valles de General Trías y Gran Morelos, el sentido general de ambos flujos subterráneos es de NW a SE, tal como se puede observar en la figura 4. En el primero de los valles, al norte del poblado de Riva Palacio, el acuífero presenta una altitud del nivel estático de 1,800 msnm; el agua subterránea fluye de este sitio hacia el sureste, y más o menos a la altura del poblado de General Trías cambia el flujo hacia el oriente alimentando al acuífero en el área de Santa Isabel, donde el flujo se manifiesta con rumbo norte a sur, hasta la población de Satevó.

El flujo subterráneo que se presenta en el valle de Gran Morelos, que se inicia con una altitud del nivel estático de 1,950 msnm, después de pasar por Belisario Domínguez, cambia el rumbo hacia el oriente para recargar el acuífero del valle de Santa Isabel, a través de una estrecha garganta entre calizas; esta alimentación se une al flujo principal de ese valle.

En el valle de Santa Isabel el agua subterránea fluye de norte a sur desde el poblado San José hasta la población de Satevó; en este sitio, la altitud del nivel estático del acuífero es de 1,400 msnm y el flujo apunta en dirección al oriente, y considerando que en el área de Ciudad Delicias, ubicada al este de la presa Francisco I. Madero y fuera del área de estudio, la altitud de los niveles de agua subterránea fluye de la cota 1,190 msnm a 1,150 msnm, se puede inferir que el agua subterránea en el área de estudio sigue una trayectoria hacia la presa Francisco I. Madero.

En el valle intermontano de San Francisco de Borja las condiciones geológicas parecen propiciar una alimentación proveniente del acuífero de la Laguna de Mexicanos, y de hecho esta situación se puede observar en esa área, donde se tiene una salida de agua subterránea a la altura de Santa Rita y San Bernabé, con dirección hacia las barrancas que se localizan en la sierra Álamo Mocho.

De información reciente, proporcionada por la Gerencia de Aguas Subterráneas, el acuífero no presenta variación de sus niveles piezométricos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Del total de los 160 aprovechamientos que se tienen censados en el área, 119 son pozos y 41 norias. La extracción por pozos es de 15.91 hm³/año y 3.41 hm³/año a través de norias.

En la tabla siguiente se muestra el aprovechamiento por usos del agua subterránea en la zona donde se localiza el acuífero Alto Río San Pedro.

Tabla 2. Aprovechamiento del agua subterránea

Uso	Volumen hm ³ /año	Porcentaje (%)
Doméstico- Abrevadero	0.8	4.1
Agrícola	10.98	56.9
Público Urbano	7.54	39.0
Total	19.32	100

La extracción total de agua subterránea en la zona es de **19.32 hm³/año**, la cual se destina principalmente para la agricultura, y en menor proporción para uso público urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

7.1 Entradas

7.1.1 Recarga

La recarga del acuífero proviene de las infiltraciones del agua de lluvia que se precipita en las sierras, y de la que se precipita en las partes bajas donde las formaciones permiten dicha infiltración; el agua de lluvia que fluye por los ríos en parte también se infiltra, y en este caso se considerará como parte integral de los volúmenes que recargan al acuífero procedentes de la precipitación, debido por un lado a que no provienen de otras cuencas ni sus escurrimientos son perennes sino de temporal; el acuífero recibe recarga del exceso de agua aplicada en la irrigación en los campos de cultivo. La recarga considerada como la suma de la infiltración del agua de lluvia más el flujo subterráneo proveniente de las zonas montañosas que rodean al valle.

Se ha calculado en **56.3 hm³/año**, repartida como sigue: una superficie de 3 400 km², una precipitación de 450 mm y un coeficiente de infiltración de 0.03, dando como resultado una recarga vertical de **45.9 hm³/año**, además, la recarga subterránea horizontal es de **8.5 hm³/año**, que corresponde al agua de lluvia infiltrada en las sierras y que llega al acuífero en sus partes bajas como una entrada horizontal, así como una parte de los volúmenes que ingresan por la zona oeste del acuífero de estudio y que proceden de acuíferos contiguos, como es el caso del acuífero de La Laguna Mexicanos.

Es importante mencionar que no toda el agua que sale del acuífero de La Laguna de Mexicanos entra al acuífero del Alto Río San Pedro, sino sólo una parte, la demás es posible que se pierda a profundidad.

La recarga inducida proviene del agua subterránea que se utiliza en exceso para el riego, y en una menor proporción del agua utilizada en el uso público urbano. El monto total de la recarga inducida se ha calculado en **1.9 hm³/año**, resultado de multiplicar el volumen aplicado al riego (10.98 hm³/año de agua subterránea), por un coeficiente de infiltración de 0.10 y de multiplicar el volumen utilizado en usos urbanos (7.54 hm³/año) por un coeficiente de 0.10.

7.2 Salidas

7.2.1 Descarga

Las salidas del sistema acuífero están integradas por las descargas naturales que en condiciones originales presentaba el sistema, y que aún cuando hayan sido modificadas por las condiciones actuales de explotación, aún persistan; más las descargas artificiales por efecto del bombeo en los pozos.

Las salidas totales del sistema se han calculado en **56.3 hm³/año**, distribuidos de la siguiente manera.

Las descargas naturales del acuífero consisten en aquellas por flujo subterráneo horizontal que se presentan particularmente entre el poblado de San Pedro y el de Satevó, donde el flujo subterráneo adopta una tendencia a coincidir sensiblemente con el cauce del río San Pedro, o sea hacia el oriente, hasta la presa Francisco I. Madero; calculadas en 6.6 hm³/año, más la descarga por evapotranspiración que se tiene en las áreas de niveles someros considerados hasta 5 m de profundidad, y que en total son del orden de 220 km², resultando **5.28 hm³/año** al considerar un porcentaje de 0.01 de la evaporación.

La extracción de agua subterránea se ha calculado en **19.32 hm³/año**, conformada por la extracción en pozos y norias.

De acuerdo con la piezometría existente, el acuífero tiene una salida por flujo subterráneo la cual se ha calculado en **6.6 hm³/año**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se ha comentado anteriormente, el acuífero se encuentra prácticamente en equilibrio dinámico, y el volumen que entra es semejante al volumen que sale, con un cambio de almacenamiento bajo.

Para el cálculo de este término se consideró un coeficiente de almacenamiento de 0.0737, tomando en cuenta que el acuífero no manifiesta cambio en su almacenamiento.

Ecuación de Balance

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 anualmente por el almacenamiento del subsuelo.

La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

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

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 de una unidad hidrogeológica, quedando como sigue:

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

Tabla 3. Balance de aguas subterráneas

Área total del acuífero Alto Río San Pedro		km ²	11,088
RECARGA TOTAL			
Recarga natural por lluvia	Área de valle	km ²	3,400
	Coefficiente	l ₁	0.03
	Precipitación	mm/año	450.0
		hm ³ /año	45.9
Entradas horizontales		Eh	hm ³ /año
			8.5
Total de recarga natural			hm ³ /año
			54.3
Recarga inducida P.U.	Público Urbano	l ₂	0.10
			hm ³ /año
			0.8
Recarga inducida Agrícola + otros	Agrícola más otros	l ₃	0.10
			hm ³ /año
			1.1
RECARGA TOTAL			hm ³ /año
			56.3
DESCARGA TOTAL			
Salidas horizontales		Sh	hm ³ /año
Caudal base		Q _{base}	hm ³ /año
Evapotranspiración			hm ³ /año
			6.6
			25.1
			5.3
160	Extracción total		hm ³ /año
			19.3
	Manantiales comprometido		hm ³ /año
	Agrícola		10.98
	Público urbano		7.54
Industrial		0.00	
Otros		0.80	
DESCARGA TOTAL			hm ³ /año
			56.3
Cambio de almacenamiento		DA	hm ³ /año
			0.0
Coefficiente de almacenamiento		S	
			0.07373
Volumen drenado (0 m/año)		Vd	hm ³ /año
			0
Área de abatimiento			km ²
			1

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas se aplica el procedimiento establecido en la Norma, que establece la metodología para calcular la disponibilidad de aguas nacionales.

La disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual, calculada como la suma de la recarga natural (54.4 hm³/año) más la recarga inducida (1.9 hm³/año), arroja un valor de **56.3 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben ser sostenidas para no afectar a las unidades hidrogeológicas adyacentes.

Respecto al caudal base, es del orden de 25.11 hm³/año. Para este acuífero las salidas de agua subterránea que se tienen se pueden considerar que están comprometidos en parte; en este sentido, de acuerdo a la piezometría del acuífero de Delicias–Meoqui el volumen comprometido hacia aguas abajo es del orden de 4.0 hm³/año, a fin de garantizar los volúmenes de agua que alimentan a la zona contigua, localizada al oeste de la zona de estudio. De acuerdo a lo anterior la descarga comprometida es del orden de **29.1 hm³/año**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **35,388,062 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 56.3 - 29.1 - 35.388062 \\ \text{DMA} &= -8.188062 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **8,188,062 m³ anuales**.