

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO JESÚS MARÍA (1459), ESTADO DE
JALISCO**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES	1
Antecedentes.....	1
1.1. Localización.....	1
1.2. Situación administrativa del acuífero	3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	4
3. FISIOGRAFÍA.....	5
3.1. Provincia Fisiográfica	5
3.2. Clima.....	5
3.3. Hidrografía	6
3.4. Geomorfología.....	6
4. GEOLOGÍA.....	7
4.1. Estratigrafía	8
4.2. Geología Estructural	9
4.3. Geología del Subsuelo	9
5. HIDROGEOLOGÍA.....	10
5.1. Tipo de Acuífero.....	10
5.2. Parámetros hidráulicos.....	10
5.3. Piezometría	11
5.4. Comportamiento hidráulico.....	11
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	11
5.4.2 Elevación del nivel estático	12
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	13
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	14
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	14
7.1. Entradas	15
7.1.1 Recarga vertical.....	15
7.1.2 Recarga inducida	18
7.2. Salidas.....	19
7.2.1 Bombeo.....	19
7.2.2 Salida por flujo horizontal subterráneo.....	19
7.3. Cambio de almacenamiento	20
8. DISPONIBILIDAD	21
8.1. Recarga total media anual (R).....	21
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	21
8.3. Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS).....	22
8.4. Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA).....	22

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 Jesús María, definido con la clave 1459 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza al extremo Oriente del estado de Jalisco, en la región Tepatitlán-Arandas, al sureste de Los Altos; entre los paralelos 20° 21' y 20° 45' de latitud norte y los meridianos 102° 01' y 102° 19' de longitud oeste. Colinda al norte con los acuíferos San José de las Pilas y Ocotlán, del estado de Jalisco, al oriente con el acuífero Pénjamo-Abasolo del estado de Guanajuato, al sur con los acuíferos La Piedad y Briseñas-Yurécuaro del estado de Michoacán y, al occidente con el acuífero La Barca, también del estado de Jalisco. Figura 1, cubre una superficie aproximada de 737 km² conforme a la poligonal que lo delimita.

Se localiza totalmente dentro de los municipios Degollado y Jesús María, y en pequeñas porciones de los municipios Ayotlán y Arandas; destacando en él las poblaciones Jesús María, Degollado, Altamira y El Pino.



Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan el acuífero

ACUIFERO 1459 JESUS MARIA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	102	5	45.3	20	23	1.0	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	102	6	47.9	20	22	49.1	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	102	16	27.4	20	20	21.8	
4	102	16	0.5	20	21	33.4	
5	102	15	2.4	20	22	23.3	
6	102	15	19.0	20	23	46.4	
7	102	15	2.4	20	25	42.8	
8	102	13	14.3	20	26	41.0	
9	102	12	32.7	20	27	39.2	
10	102	10	3.1	20	28	54.0	
11	102	6	35.3	20	30	0.5	
12	102	7	41.8	20	31	7.0	
13	102	10	11.4	20	30	42.1	
14	102	12	24.4	20	31	7.0	
15	102	13	14.3	20	30	50.4	
16	102	14	20.8	20	32	5.2	
17	102	16	17.2	20	32	46.7	
18	102	18	38.5	20	33	3.4	
19	102	18	55.1	20	35	24.7	
20	102	17	40.3	20	37	46.0	
21	102	13	14.3	20	41	5.5	
22	102	9	46.5	20	44	16.7	
23	102	6	2.1	20	43	18.5	
24	102	5	28.8	20	42	20.3	
25	102	6	2.1	20	39	50.7	
26	102	7	33.5	20	37	54.3	
27	102	6	35.3	20	36	56.1	
28	102	3	40.7	20	35	16.4	
29	102	2	17.6	20	35	41.3	
30	102	0	54.5	20	35	33.0	
31	102	0	45.4	20	32	32.5	DEL 31 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	102	5	45.3	20	23	1.0	

Tabla 1 Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada que delimitan el acuífero

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII “Lerma-Santiago-Pacífico”. Su territorio completo se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto de veda tipo III *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en las zonas no vedadas en diversos municipios del estado de Jalisco y se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento, extracción y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en todos los Municipios del estado de Jalisco”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 12 de julio de 1987.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El uso principal es el agrícola. En el acuífero no se localiza Distrito de Riego alguno, ni tampoco se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca (15) Lerma-Chapala, instalado el 28 de enero de 1993. La porción norte del acuífero pertenece a la Comisión de Cuenca (15B) Propia del Lago de Chapala.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

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

Estudio para la reactivación de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de: El Llano, Ags, Tesistan-Atejamac-Toluquilla, Cd. Guzmán y Ameca, Jal., Puerto Vallarta-Valle de Banderas, Jal.-Nay., La Barca-Yurecuaro, Jal-Mich., Amascala-La Griega-Buenavista, Qro. y Loreto, Jerez, Zac. diciembre de 1998. Realizado por Estudios y proyectos Moro.

Para la configuración de elevación del nivel estático de 1988 en el acuífero somero Tesistán-Atemajac-Toluquilla, se dividió en tres zonas. La zona norte queda comprendida desde el poblado de Las Golondrinas, hasta las poblaciones de Nextipac y Atemajac. Zona centro, abarca prácticamente toda la Zona Metropolitana de la ciudad de Guadalajara. Zona sur, comprende en general el Valle de Toluquilla.

En la zona norte las líneas equipotenciales forman un parteaguas subterráneo a partir del poblado de Nextipac, cuya dirección es de este a oeste; este parteaguas ocasiona que se tenga un flujo con dirección hacia el noroeste; otro flujo mantiene una dirección concéntrica hacia un cono de abatimiento que se forma en el poblado de Rancho Nuevo. Un tercer flujo se observa hacia la ciudad de San Juan de Ocotlán, el cual tiene una dirección de flujo que parece ser hacia el Río Grande Santiago.

Estudio de actualización geohidrológica de los acuíferos La Barca, San José de Las Pilas, San Diego de Alejandría y Jesús María, Jalisco. Contrato SGT-LSP-JAL-05-040-RFLP, realizado por la Compañía Proyectos, Trámites y Supervisión de Construcciones (PROTYC, S.A. de C. V.). 2005.

La principal conclusión del estudio es que dadas las condiciones geohidrológicas y conforme al grado de explotación en que se encuentra el acuífero, es viable incrementar la extracción de las aguas subterráneas de acuerdo con la disponibilidad existente, considerando necesario proteger los usos prioritarios.

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

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia Fisiográfica

La zona del acuífero es una meseta de cimas y faldas, valles y barrancos en donde las partes más accidentadas se elevan entre los 1,500 y 2,400 msnm, cuya provincia fisiográfica corresponde a la porción Centro Oriental del Altiplano Jalisciense, que se localiza entre una derivación de la Mesa Central, el Eje Neovolcánico y las estribaciones de la Sierra Madre Occidental. (INEGI 1991).

3.2. Clima

El clima dominante en la región es el semicálido subhúmedo, del grupo de climas templados (según la clasificación de Köppen modificada por E. García, para las condiciones de la República Mexicana, 1973).

De acuerdo a la clasificación de C. W. Thornthwaite, el clima es semiseco y semicálido. La temperatura media anual es de 14.5° C. La temperatura máxima promedio es de 38° C y la mínima extrema de -0.8° C, los valores extremos máximos se presentan durante los meses de mayo y de junio, y los mínimos en diciembre y enero.

Para el cálculo de la precipitación y temperatura media anual se tomaron los datos de las siguientes estaciones climatológicas:

Estación	Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Elevación
14020	Ayo el Chico	20°31'48"	102°19'48"	1,650 msnm
14076	Jesús María	20°37'12"	102°12'12"	2,110 msnm
16044	El Salto , La Piedad	20°22'48"	102°06'00"	1,650 msnm
16141	Yurécuaro, Yurécuaro	20°21'00"	102°16'48"	1,534 msnm

Con base en los registros de cada una de las estaciones, se obtuvo una precipitación media anual de 826.6 mm, concentrados principalmente en verano representando el 95% del total anual y en otoño el 5% restante. La lluvia máxima promedio en 24 horas es de 61.5 mm, sin embargo, se han presentado máximas de 80.6 mm y 79.0 mm, en los meses de agosto y septiembre. El promedio de días con heladas al año es de 30.4.

La dirección de los vientos es variable en todo el año, no obstante, persisten los vientos dominantes del oeste.

3.3. Hidrografía

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica No. 12, cuenca del Río Lerma-Chapala, Subregión Hidrológica Bajo Lerma.

Los riachuelos y arroyos que surcan el acuífero, unos son de escurrimientos perennes y otros de corrientes rápidas e intermitentes de caudales o crecidas solamente en época de lluvias.

Las principales corrientes son: Las Canoas, Las Águilas, La Laja, Regladero, Almacino, Corrales El Sabino, San Agustín, Palo Caído, Acúmbaro, Magaña, San José, Los Ojos de Agua, Los Aviones, Potrerillos y Tarimoro, siendo estos dos últimos los principales tributarios del río de Huáscato sobre el que se construyó uno de los vasos más importantes: la presa de La Pólvora, cuyas aguas son aprovechadas por las tierras fértiles de Degollado, Ayotlán, Atotonilco y La Barca.

A estos pequeños cursos fluviales le siguen numerosos arroyos de menor importancia que por lo regular sólo llevan agua en verano, y que descienden de esta meseta alteña para ir a desembocar al valle de La Barca correspondiente a la cuenca hidrológica del Río Lerma, tributaria del Lago de Chapala.

Para hacer frente a las necesidades del líquido vital en época de estiaje, se han construido en el acuífero un sinnúmero de tajos, pequeños bordos, presas, y algunos pozos.

Dentro de las Presas, se encuentran: Presa de La Luz o de Los Dulces Nombres que cuenta con un pequeño sistema de irrigación (inaugurada el 5 de mayo de 1958), Ayo el Grande, Ciénega de Galvanes, San Antonio próxima a los límites del municipio del estado de Guanajuato; y La Pólvora (municipio de Degollado) cuyas aguas invaden tierras de Jesús María en Potrerillos, Ojo Zarco de Fuentes, Regladero y Saltillo.

Existen pequeñas lagunas y algunos manantiales que se ven amenazados por las condiciones climáticas y la alta evaporación que sobrepasa a las precipitaciones, que han sido muy irregulares en las últimas cuatro décadas.

3.4. Geomorfología

Se encuentra enclavado en la Altiplanicie Central. En general su superficie es semiplana (75%) y plana (21%), en una proporción menor (4%) existen zonas accidentadas con elevaciones entre los 1,500 y 2,100 msnm. En algunos lugares del noroeste y al suroeste hay elevaciones que alcanzan los 2,700 msnm.

El acuífero se encuentra en los contrafuertes de la Sierra de Los Altos, rodeado por las montañas de Las Avispas, El Pandillo, Cerro de Romos, Cerro Pelón, El Chiquihuitillo, La Culebra, Cerro Grande, El Picacho, Mogotes, El Meco, La Malaobra, San Antonio, El Águila, La Campana, La Muralla, El Cerro de la Cruz, El Fraile, Peña Blanca y El Cerro de Ayo.

4. GEOLOGÍA

El territorio está conformado por terrenos que pertenecen al período Cuaternario. Está constituido por rocas ígneas extrusivas, conglomeradas y rocas sedimentarias, Hay algunos lugares lunares de basalto y en otros cerros hay toba. En este sector del país fue donde se concentró la mayor cantidad la actividad volcánica Plio-Cuaternaria. Está muy bien delimitada por la cuenca del Río Balsas al sur, al norte la Depresión del Bajío, las fracturas Querétaro-San Miguel de Allende (Gto.), el anticlinal de Tzitzio-Huetamo (Mich.), al este y por último la zona Oligo-miocénica y cretácica del sur del Lago de Chapala al oeste.

En general el vulcanismo presente en el área ha tenido una sola fase de actividad; el volumen emitido es muy reducido. Estos conos basálticos por lo general, se encuentran en los flancos de los aparatos andesíticos más imponentes. En mapa geológico del área del acuífero se presenta en la figura 2.

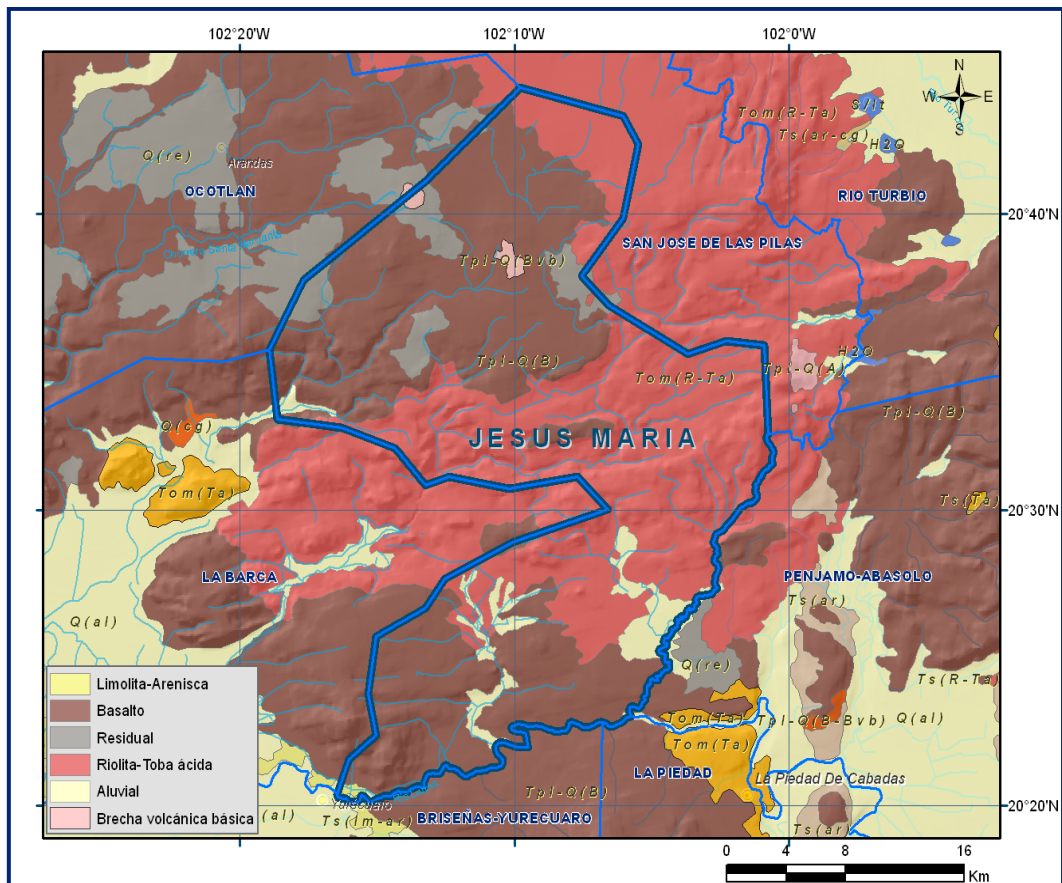


Figura 2. Mapa Geológico

4.1. Estratigrafía

Es difícil establecer que tipos de rocas se encontraban en la base del Eje Neovolcánico antes de que éste alcanzara su pleno desarrollo en el Plioceno, se dio lugar a imponentes moles de rocas volcánicas de más de 5000 m de altura.

Evidentemente, nuestro continente prácticamente permanecía ya emergido durante el Eoceno, y se estaban ya erosionando gran parte de las elevaciones cretácicas y rocas ígneas y metamórficas preexistentes.

Las unidades litológicas aflorantes están representadas por secuencias volcanosedimentarias, rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas; ubicadas en un rango cronoestratigráfico comprendido entre el Mesozoico y el Cenozoico.

Unidades del Paleógeno-Neógeno

Las rocas ígneas extrusivas básicas del Paleógeno-Neógeno, se presentan ampliamente en la región. Consisten en basalto y basalto andesítico; su textura es holocristalina, intergranular y porfídica; su estructura es vesicular, masiva y compacta, con fracturas y fallas normales.

Sobreyace en discordancia a granito del Cretácico, toba ácida del Oligoceno-Mioceno y rocas sedimentarias clásticas del Neógeno; subyace a depósitos clásticos del Cuaternario. Por lo anterior se la asigna edad del Paleógeno-Neógeno. Morfológicamente constituye derrames lávicos, volcanes monogenéticos y estratovolcanes.

Unidades del Cuaternario

En el Cuaternario se encuentra una secuencia volcánica de composición ácida, constituida por lava riolítico peralcalina, toba, pómez, vidrio volcánico, depósitos lacustres, fluviales y volcanoclásticos. A este paquete de materiales se les dató del Pleistoceno Superior.

La unidad de suelos es de edad Cuaternaria e incluye material aluvial, litoral residual y lacustre. El aluvial varía en su granulometría de arcilla a grandes bloques, el residual es limo-arcilloso y en el lacustre predomina la arcilla; el aluvial se distribuye por todo el estado, el residual en la región de Los Altos de Jalisco y el lacustre en la región central del estado.

4.2. Geología Estructural

Las secuencias volcánicas desarrolladas entre el Paleógeno-Neógeno y el Cuaternario presentan las siguientes características: la primera del Paleógeno, se constituye por rocas volcánicas de composición andesítica, que se encuentran ligeramente deformadas e intensamente afalladas y alteradas; por lo general son rocas encajonantes de mineralizaciones en esta región; esta secuencia constituye un arco volcánico calcoalcalino, que se relaciona con una margen continental convergente, en la cual la placa Farallón, en la actualidad extinta, fue subduccionada por la corteza continental de México.

La segunda secuencia volcánica, del Oligoceno-Mioceno, se forma por rocas con carácter ignimbrítico, en posición horizontal o ligeramente deformadas; su origen se atribuye a volcanismo de zona de rift detrás de un arco andesítico. En conjunto con la secuencia anterior constituyen el paquete volcánico inferior y el complejo volcánico superior.

La tercer secuencia, del Plioceno hasta el Cuaternario, se constituye por volcanismo calcoalcalino; las rocas más representativas son: basalto, andesita, toba y brecha de composiciones básica e intermedia, en ellas se observan tres grandes sistemas de fallas, que originaron el graben de Colima-Sayula, con orientación norte-sur, el graben de Chapala, con dirección oeste-este y el graben de Tepic-Zacoalco de Torres, de noroeste-sureste los cuales convergen en la misma zona dentro de la superficie estatal; el origen de las rocas que conforman el Eje Neovolcánico se relaciona a la subducción de la placa de Cocos debajo de la corteza continental de México.

4.3. Geología del Subsuelo

Las rocas que componen el área, se caracterizan por una permeabilidad que varía en un amplio rango, controlada principalmente por el grado de fracturamiento, por la presencia de tubificaciones dentro de los derrames y la intercalación de material escoriaceo.

Las rocas consolidadas y no fracturadas que se encuentra en el subsuelo de los valles y por abajo del nivel regional de saturación, forman barreras al flujo de agua subterránea. Los derrames andesíticos funcionan como basamento, en el caso de los valles tectónicos, este basamento se localiza a cientos de metros de profundidad. Los derrames de roca no fracturada intercalada con material aluvial a diferentes profundidades, forman acuíferos locales independientes.

En contraste, la mayoría de las rocas de composición riolítica, presente hacia la porción norte, y que se extiende hacia las cuencas aluviales en el sur forman acuíferos de gran densidad y de permeabilidad moderada, debido al fracturamiento.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de Acuífero

En las porciones bajas de la cuenca, los acuíferos que se alojan en derrames volcánicos fracturados y cubiertos por depósitos lacustres y aluviales de menor permeabilidad, forman acuíferos confinados o semiconfinados.

El material piroclástico en la zona de saturación funciona como acuitardos, y a escala regional puede producir o transmitir grandes cantidades de agua a los acuíferos adyacentes.

En la superficie del acuífero afloran depósitos lacustres de alta porosidad y poca permeabilidad, forman acuitardos de algunos metros de espesor y de grandes volúmenes de agua.

El material aluvial poco consolidado, como gravas, arenas y sedimentos finos, expuesto en los valles, forma acuíferos someros.

En los arroyos es común encontrar material clástico de alta permeabilidad, formando viejos canales activos que funcionan como acuíferos semiconfinados, en cambio en las llanuras de inundación abunda el material clástico de grano medio a fino y permeabilidad moderadamente baja.

De acuerdo con observaciones realizadas y con planteamientos teóricos parece que hay una continuidad hidráulica entre la zona saturada y el material de relleno, que constituye un solo sistema de flujo, además de que todos los estratos están hidráulicamente interconectados. No obstante, debidas a la heterogeneidad y anisotropía del relleno, hay diferencias significativas en la carga hidráulica, temperatura y calidad del agua en el sentido vertical.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades realizadas en el estudio de 2005, las características hidráulicas del acuífero fueron determinadas mediante la realización de 5 pruebas de bombeo. Tomando en cuenta la poca profundidad de los niveles estáticos en la zona y la rápida estabilización de los niveles dinámicos, se estableció un período de prueba menor o igual a 24 horas y una etapa de recuperación máxima de 4 horas.

Los datos obtenidos de las pruebas de bombeo se analizaron con ayuda del software AquiferTest diseñado para tal efecto por Waterloo Hidrogeologyc, con el cual se realizó el análisis gráfico y los reportes correspondientes. Los resultados se observan en la tabla No. 3.

Tabla No. 3. Resultado de las pruebas de bombeo

POZO	COORDENADAS		VALORES ACEPTADOS	
	Latitud	Longitud	Transmisividad (m ² /s)	Coefficiente de almacenamiento
CNA-01	-102.10972	20.70667	1.000E-03	1.00E-04
CNA-02	-102.26000	20.64417	1.000E-03	1.00E-04
CNA-03	-102.17028	20.56583	1.000E-03	1.00E-04
CNA-04	-102.05611	20.58833	1.000E-03	1.00E-04
CNA-05	-102.06944	20.55139	1.000E-03	1.00E-04

Aunque no se contó con pozo de observación durante la prueba de bombeo, el coeficiente de almacenamiento se estimó según correlación de la litología con acuíferos vecinos.

5.3. Piezometría

No existe información histórica sobre la piezometría del acuífero, en los recorridos de campo realizados durante el estudio de 2005, para el censo de aprovechamientos de agua subterránea, se obtuvieron los datos de la profundidad al nivel estático.

Se realizaron dos corridas piezométricas para obtener las configuraciones del nivel del agua subterránea.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático (2005) se registran valores de los 15 a los 140 m. Los valores más someros se localizan en la porción centro-norte del acuífero, en los alrededores del poblado Palo Caído, profundizándose hacia el noroeste, hasta los 35 m en el poblado Jesús María; al igual que hacia el sureste, hasta llegar a los 140 m, en el poblado de Altamira, como se observa en la figura 3.

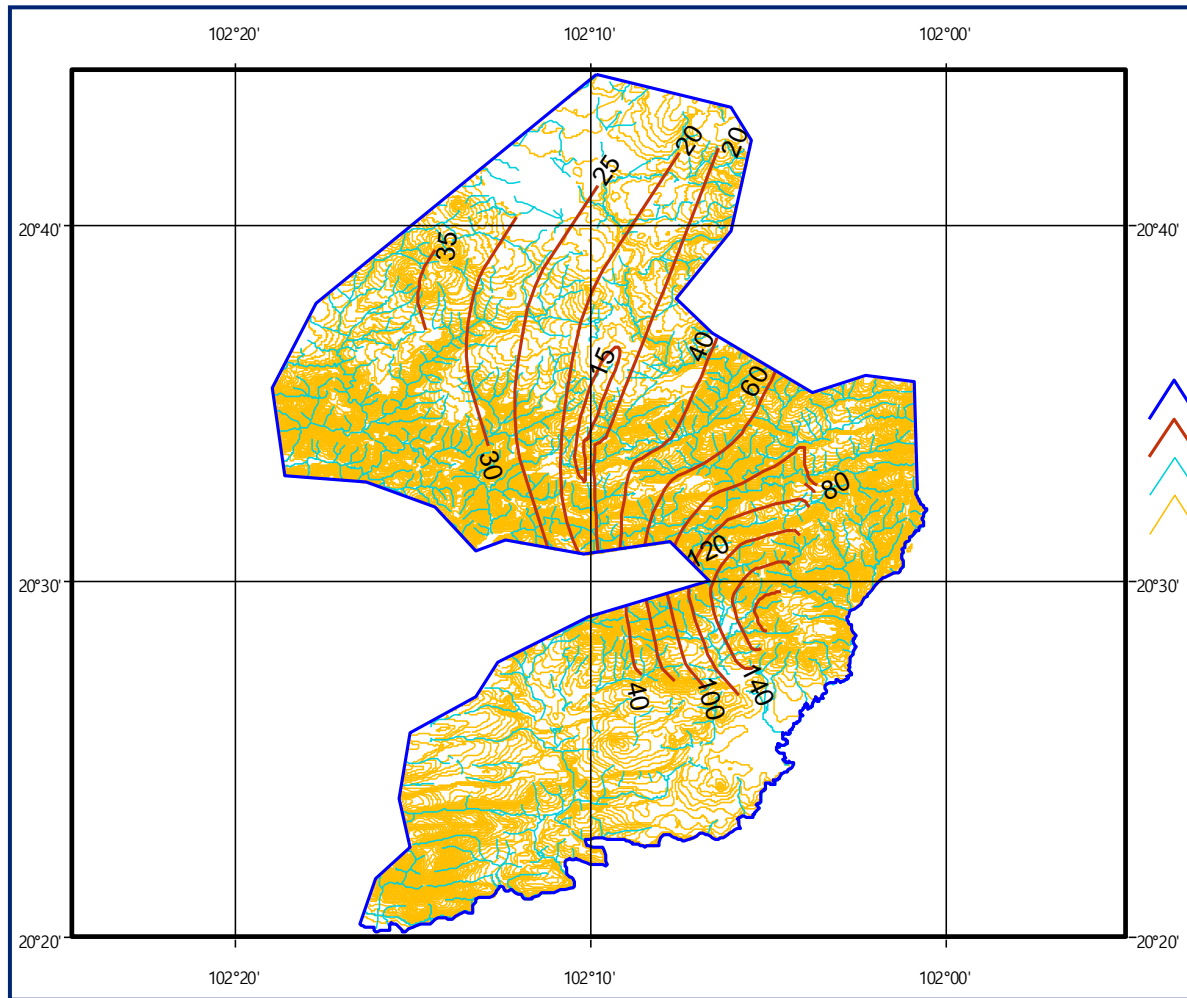


Figura 3. Profundidad al nivel estático (m), 2005

5.4.2 Elevación del nivel estático

En lo que respecta a la configuración de curvas de igual elevación del nivel estático (2005), se presenta una elevación máxima de 2220 msnm, hacia la zona norte del acuífero, en los alrededores del poblado La Montaña, con una dirección de flujo hacia el sur, llegando a los 2100 msnm en el poblado La Atarjea.

En la porción central del acuífero las curvas van de los 1890 msnm en los poblados El Capulín y San Rafael, a los 1870 msnm en el poblado San José de la Paz. Hacia el sur del acuífero la elevación del nivel estático va de los 1760 msnm al norte del poblado Marijo, a los 1620 msnm al sureste del poblado Degollado. Referente al flujo subterráneo, en general, éste tiene una dirección de noreste-suroeste, el cual circula de las partes altas a las bajas. Figura 4.

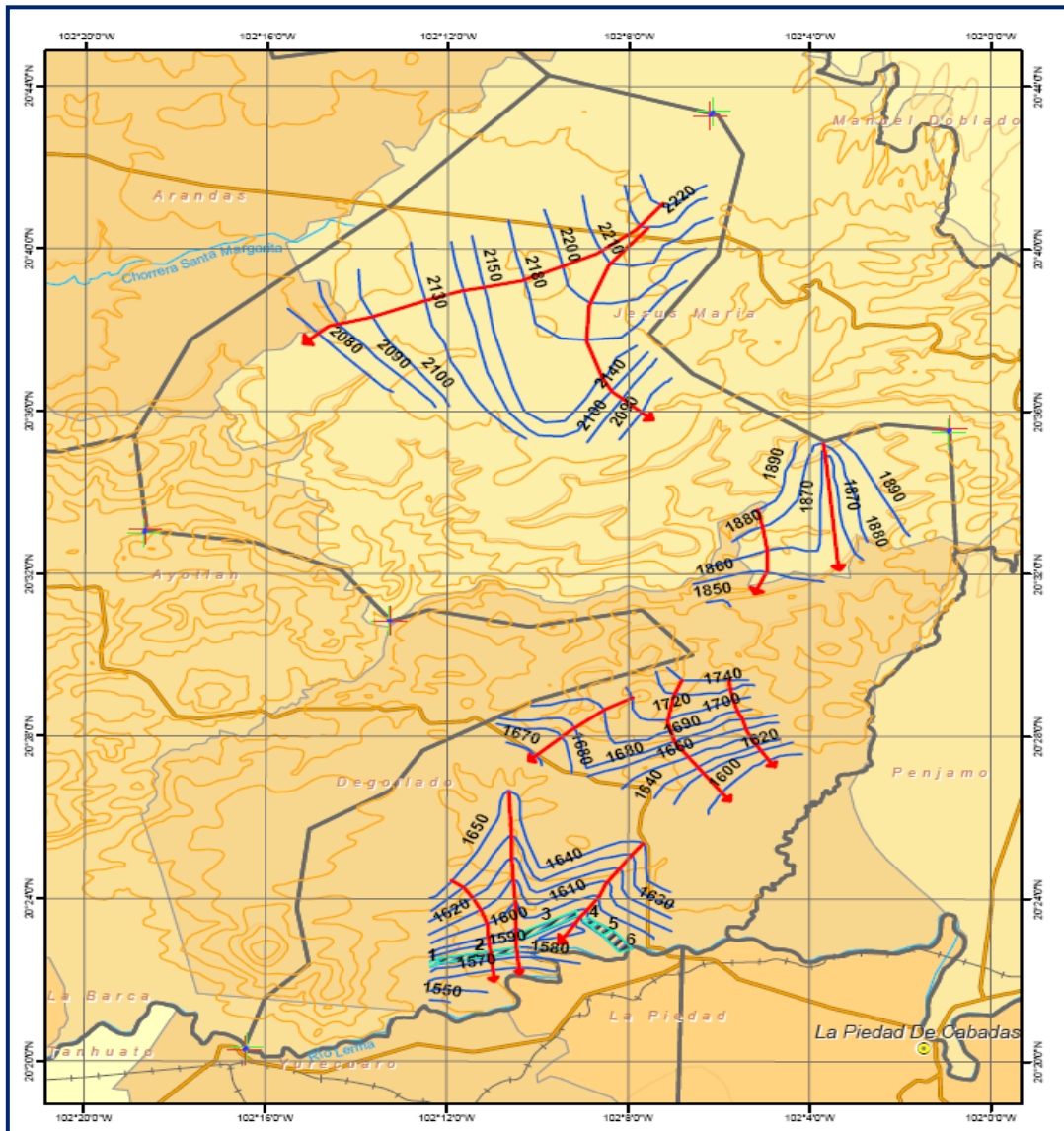


Figura 4. Elevación del nivel estático (msnm). 2005 Dirección y celdas de flujo

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica que permita elaborar una configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas no son suficientes y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero.

La extracción que se realiza no ha causado aún la alteración de las condiciones del estado inicial del régimen de flujo subterráneo. El volumen de extracción es inferior al valor más conservador de la recarga que pudiera estimarse.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Con base en el muestreo que se llevó a cabo en el estudio del 2005, se obtuvieron los siguientes resultados, con respecto a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022.

Las muestras, se encuentran dentro de los límites permisibles en la mayoría de los parámetros, en un caso a excepción del Hierro, que rebasa el límite de 0.30 ppm que marca la Norma y presentó 0.38 ppm, y en otro caso a excepción del Nitrito que dio 0.6 ppm ligeramente superior al límite que establece 0.5 ppm.

Por lo tanto, para el uso público-urbano, en general se concluye que la mayoría de las muestras deben ser sometidas a algún tipo de tratamiento para su potabilización. Pero se encuentran en general dentro de los rangos esperados para agua de pozo utilizables para uso y consumo humano (previo tratamiento).

Para el uso agrícola, los resultados presentan una clasificación de aguas moderadamente salinas que pueden ser usadas para riego si se proporciona un excedente para fines de lavado, sin prácticas especiales de control de sales. El contenido de sodio es muy bajo sin que presente gran peligro de crear niveles de sodio intercambiable.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con los recorridos de campo realizados para el estudio de 2005, se identificaron 172 aprovechamientos de agua subterránea en el área.

El uso principal del agua que se extrae del acuífero es agrícola; con un registro de 160 aprovechamientos y un volumen de 15.2 hm³. Los otros usos industrial, servicio, público urbano y domésticos no son representativos al acuífero por el poco volumen que requieren, del total de aprovechamientos se extrae un volumen de 16.0 hm³.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea involucra el registro de las entradas, salidas y el cambio de almacenamiento, modificaciones que suceden en un volumen específico del acuífero en un determinado tiempo.

La diferencia entre la suma total de las entradas y la suma total de las salidas, representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo definido.

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

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

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

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

Las entradas al sistema acuífero pueden ser por flujo vertical (Rv), por entradas horizontales (Eh); Retornos de Riego y Retornos por fugas en la red de abastecimiento; estas dos últimas se manejan como Recarga inducida (Ri); mientras que las salidas a través de flujo subterráneo horizontal (Sh), por el afloramiento de manantiales o cuerpos de agua superficiales (Dm), por extracciones mediante bombeo (B) y por evapotranspiración (Etv) para acuíferos con nivel freático somero. Si expresamos el cambio de almacenamiento como $\Delta V(s)$, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$Eh + Rv + Ri - Sh - Dm - B - ETR = \pm \Delta V(s)$$

De acuerdo con las variables involucradas, la ecuación de balance para el año 2005 en el acuífero Jesús María, es la siguiente:

$$Rv + Ri - Sh - B = \pm \Delta V(s)$$

En donde:

Rv Recarga vertical.

Ri Recarga inducida.

Sh Salida por flujo horizontal subterráneo

B Bombeo.

$\Delta v(s)$ Cambio de almacenamiento.

7.1. Entradas

7.1.1 Recarga vertical

La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre a su salida recibe el nombre genérico de pérdidas. En general, las pérdidas están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración.

Además de que en la práctica es separar estos cuatro componentes, la porción más considerable de las pérdidas esta dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas bajo este nombre.

A pesar de contar con el plano de elevación del nivel estático donde se pudieron marcar celdas de entradas y salidas horizontales, en cuanto a las entradas, se optó por el planteamiento de un balance hidrometeorológico como una estimación conservadora de la recarga total que recibe al acuífero, debido a la falta de información de parámetros hidráulicos y a que una buena parte de los pozos se aloja en las rocas volcánicas.

En el área donde se marcaron las celdas de flujo de salidas el tipo de roca es más homogéneo, existiendo información de parámetros hidráulicos del acuífero por lo que éstas salidas se evaluaron a través de la Ley de Darcy.

Para realizar el balance hidrometeorológico se requiere conocer entre otros parámetros, los volúmenes de escurrimiento que se presentan por lluvia dentro del área del acuífero, es decir, es necesario determinar el volumen de agua que se genera por cuenca propia; sin embargo, no se disponen de aforos específicos que permitan cuantificar dicho volumen. En este sentido, a continuación se menciona la forma en que se procedió para obtenerlo.

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

El volumen anual medio de escurrimiento natural en términos genéricos es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que es función del tipo y uso de suelo. Para la zona del acuífero se consideró un valor de $K= 0.24$, que corresponde a suelos medianamente permeables, uso de suelo cubierto o pastoreo del 50 al 75%. Aplicando este valor de K en la ecuación:

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

Donde P = Precipitación anual, en mm.

Se obtiene un coeficiente de escurrimiento de:

$$C_e = K(P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 = 0.24 \times (826.62-250)/2000 + (0.24-0.15)/1.5 = 0.1292$$

De esta manera el volumen escurrido sería: $V_e = C_e \times V_{\text{lluvioso}} = 0.1292 \times 138.9 = 17.9 \text{ hm}^3$

$$V_{\text{lluvioso}} = P \times \text{Área} = 0.8266 \times 168 = 138.9 \text{ hm}^3$$

Para conocer el orden de magnitud del volumen de infiltración por lluvia que se presenta en el sistema, se realizó el balance de agua superficial con apoyo en la fórmula de Turc para calcular la evapotranspiración y dejar como incógnita a la infiltración, mediante la siguiente expresión:

Infiltración = precipitación – evapotranspiración - escurrimiento

Para determinar la evapotranspiración real (ETR), se hizo uso de la fórmula de Turc, la cual indica que:

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

Donde:

ETR = evapotranspiración real en metros/año

P = Precipitación media anual (826 mm)

T = Temperatura media anual (14.5° C)

El volumen evapotranspirado sería: Evapotranspiración (Turc) x Área = 0.595 (mm) X 168 km² = 100.0 hm³.

El Volumen infiltrado o recarga vertical, resulta de restarle al volumen precipitado, el volumen escurrido, y el evapotranspirado = 138.9 – 17.9 – 100 = **21.0 hm³**.

El área donde se realizaron los cálculos es de 168 km², ésta se obtuvo sumando las zonas donde la infiltración es más propicia, dependiendo del tipo de roca y de la localización de los aprovechamientos (afloramientos de tipo aluvial y en cambios de pendiente), como se muestra en la Figura 5.

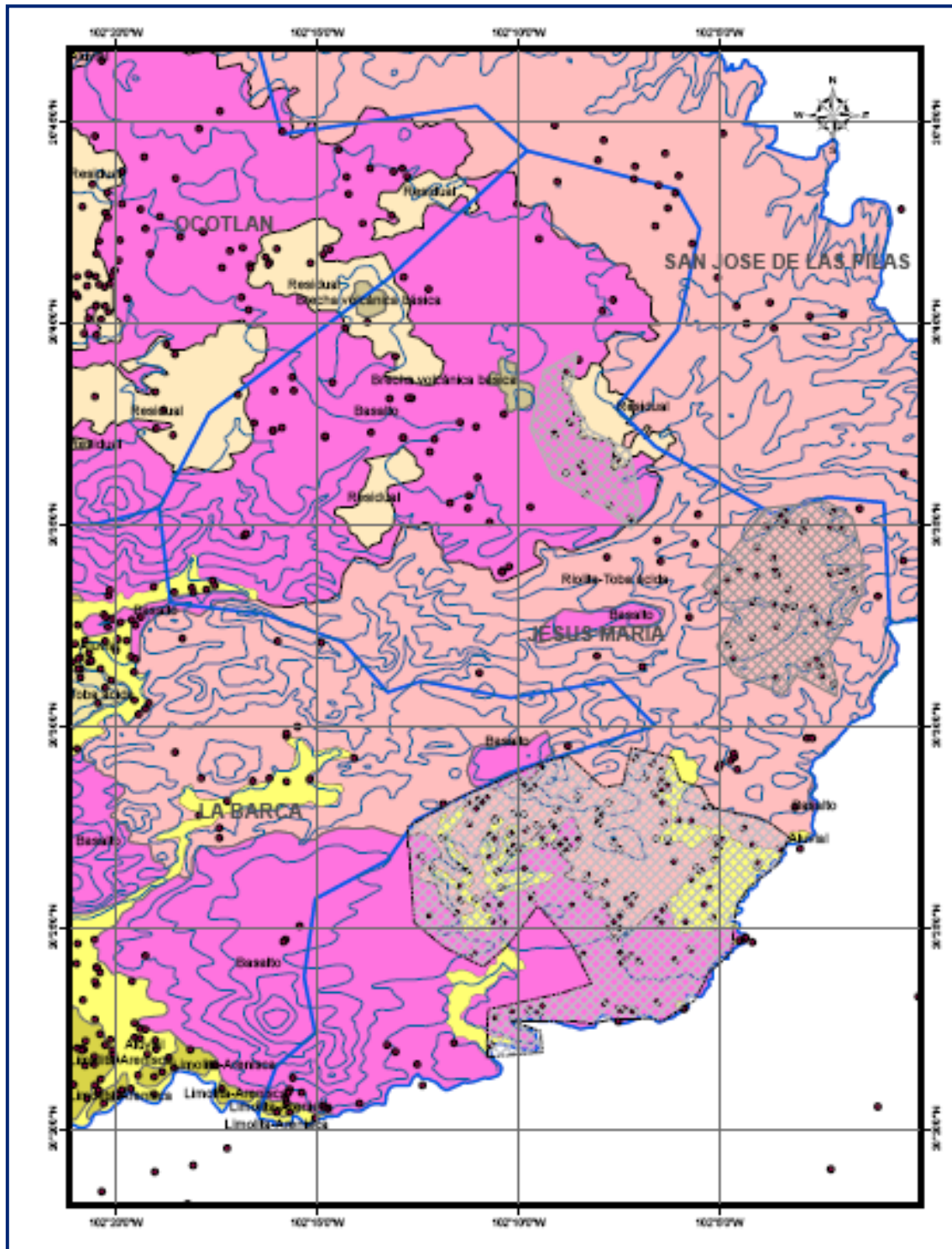


Figura 5. Áreas propensas a la infiltración de agua provenientes de la precipitación

7.1.2 Recarga inducida

Aun en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen de agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie del agua subterránea.

El volumen de agua para uso agrícola se tomo del censo realizado en 2005, considerando que el 10% regresa al acuífero como recarga efectiva, tenemos:

$$V_R = V_{AGR} \times (\% \text{ de retorno}) = 15.2 \times 0.10 = \mathbf{1.5 \text{ hm}^3}$$

Que será sumado al volumen de infiltración antes calculado, para obtener la Recarga Total:

$$R_{total} = \text{Recarga vertical} + \text{Retornos de Riego} = 20.9 + 1.5 = \mathbf{22.5 \text{ hm}^3/\text{año.}}$$

7.2. Salidas

De acuerdo con el modelo conceptual definido, la descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) y a través de las salidas horizontales (Sh).

7.2.1 Bombeo

De acuerdo con los recorridos de campo, realizados en el estudio de 2005, se identificaron 172 aprovechamientos. Los volúmenes de extracción se determinaron mediante el tiempo de operación, el gasto promedio y volumen concesionado, dando como resultado un volumen anual de **16.0 hm³**.

7.2.2 Salida por flujo horizontal subterráneo

La estimación de esta componente se realizó utilizando la configuración de la elevación del nivel estático para el año 2005, en la cual se definieron las direcciones y celdas de flujo que junto con la transmisividad y gradiente hidráulico, delimitaron los caudales que circulan en el acuífero (figura 4).

La componente de flujo subterráneo se calculó para el año 2005 (tabla 2), Con base en la configuración se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" que recarga subterráneamente al acuífero.

$$\mathbf{Q = B * i * T}$$

Donde:

B = Ancho (m) del canal de flujo

i = Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

T = Transmisividad en el canal de flujo.

Tabla 2. Cálculo de las salidas horizontales

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	307.14	160	5	0.0313	0.0010	0.0096	0.3
S2	3182	170	5	0.0294	0.0010	0.0936	3.0
S3	2288	183	5	0.0273	0.0010	0.0625	2.0
S4	360	259	5	0.0193	0.0010	0.0069	0.2
S5	623	332	5	0.0151	0.0010	0.0094	0.3
S6	936	475	5	0.0105	0.0010	0.0099	0.3
TOTAL							6.1

Este acuífero aporta al acuífero vecino de Pénjamo – Abasolo un volumen aproximado de **6.1 hm³/año**.

7.3. Cambio de almacenamiento

El cambio de almacenamiento se calcula a partir de la configuración de evolución de nivel estático; dicho valor afectado por el coeficiente de almacenamiento, o del rendimiento específico (Sy) en acuíferos libres, permite conocer el valor de pérdida o ganancia de agua subterránea en el sistema.

No se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, es de esperar que no se registren alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo, ni conos de abatimiento. Bajo estas consideraciones, la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser mínimo.

$$\Delta V(s) = 22.5 - 22.1 = 0.4 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Los resultados del balance de aguas subterráneas se presentan en la tabla 3

Tabla 3. Balance de aguas subterráneas.

	Volumen en hm ³ /año
Recarga natural por lluvia	21.0
Retornos de riego	1.5
Recarga total	22.5
Extracción	16.0
Salidas horizontales	6.1
Descarga total	22.1
$\Delta V(s)$	0.4

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **22.5 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida, se cuantifica mediante la 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 de ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes; y sostener el gasto ecológico.

De acuerdo con el estudio del acuífero Penjamo-Abasolo, que indica que el acuífero Jesús María le aporta agua, se procedió a cuantificar aproximadamente el volumen, por lo que la descarga natural comprometida se considera el total de las salidas horizontales:

$$\text{DNC} = 6.1 \text{ hm}^3$$

8.3. Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **35,685,067 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4. Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA)

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

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

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 22.5 - 6.1 - 35.685067 \\ \text{DMA} &= -19.285067 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **19,285,067 m³ anuales**.