

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO 20 DE NOVIEMBRE (1412), ESTADO DE
JALISCO**

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	Provincias fisiográficas.....	5
3.2	Clima.....	6
3.3	Hidrografía.....	6
3.4	Geomorfología.....	7
4	GEOLOGÍA.....	7
4.1	Estratigrafía.....	8
4.2	Geología estructural.....	9
4.3	Geología del subsuelo	10
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	15
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	16
7.1	Entradas	16
7.1.1	Recarga vertical (Rv).....	16
7.1.2	Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	17
7.1.3	Recarga Inducida (Ri)	18
7.2	Salidas.....	19
7.2.1	Descarga de manantiales (Dm).....	19
7.2.2	Evapotranspiración (ETR).....	19
7.2.3	Bombeo (B).....	21
7.3	Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	21
8	DISPONIBILIDAD	22
8.1	Recarga total media anual (R).....	22
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	22
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	22
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	23
9	BIBLIOGRAFÍA.....	24

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 20 de Noviembre, definido con la clave 1412 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción este del estado de Jalisco, entre los paralelos 21°35' y 21°50' de latitud norte y los meridianos 101°30' y 101°50' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 375 km². Colinda al norte con el acuífero Ojuelos, al oeste con Primo Verdad, al sur con Lagos de Moreno, todos ellos pertenecientes al estado de Jalisco; al este con el acuífero Ocampo perteneciente al estado de Guanajuato y al noreste con el acuífero Pinos, en el estado de Zacatecas (figura 1). Geopolíticamente el acuífero cubre parcialmente a los municipios Ojuelos de Jalisco y Lagos de Moreno.

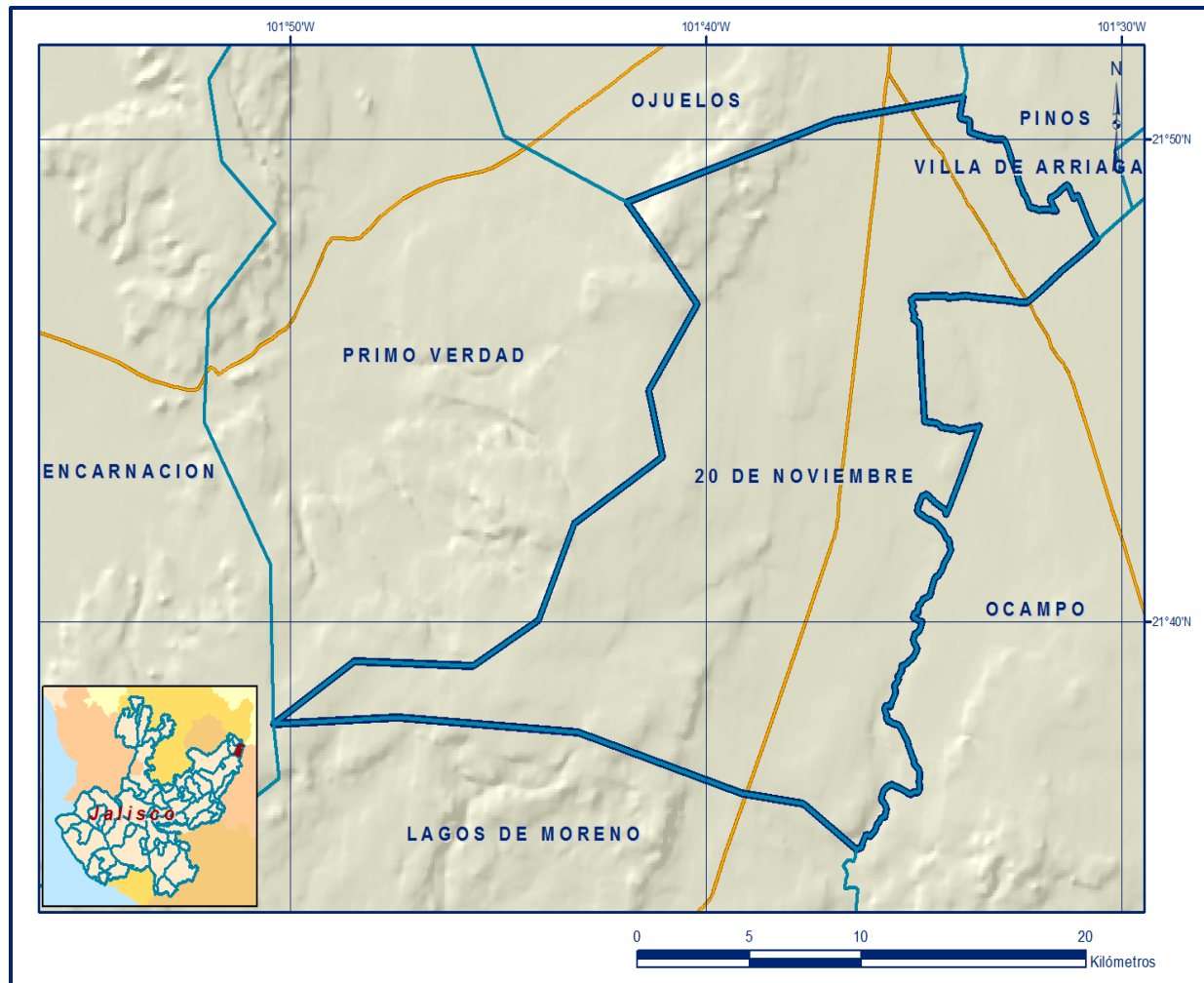


Figura 1. Localización del acuífero

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 del acuífero

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	33	50.1	21	50	53.7	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	101	30	35.8	21	47	56.4	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	101	36	24.2	21	35	16.7	
4	101	37	41.1	21	36	13.1	
5	101	39	10	21	36	25.8	
6	101	43	5.1	21	37	42	
7	101	47	25.7	21	38	1.1	
8	101	50	25.2	21	37	52.3	
9	101	48	29.2	21	39	11	
10	101	45	37.7	21	39	4.6	
11	101	44	2.3	21	40	1.8	
12	101	43	11.5	21	42	2.6	
13	101	41	4.4	21	43	25.2	
14	101	41	23.5	21	44	47.8	
15	101	40	13.6	21	46	35.8	
16	101	41	4.4	21	47	39.4	
17	101	41	55.2	21	48	42.9	
18	101	36	56.6	21	50	24.6	
1	101	33	50.1	21	50	53.7	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero 20 de noviembre pertenece al Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico.

Su territorio completo se encuentra vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en 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, este decreto se clasifica 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 3.

El uso principal del agua es el agrícola. En el territorio que cubre 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 comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de cobertura regional. El único estudio que abarcó la superficie completa del acuífero es el que se describe a continuación:

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS, VALLE DE GUADALUPE, PRIMO VERDAD, LA HUERTA, MIGUEL HIDALGO, CIHUATLÁN, 20 DE NOVIEMBRE, CUQUÍO, COLOTLÁN, TECOLOTLÁN, TOMATLÁN, TEQUILA Y LA BARCA, EN EL ESTADO DE JALISCO. Elaborado por la Universidad Nacional Autónoma de México, para la Comisión Nacional del Agua en 2010. El objetivo general de este estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, mediante el comportamiento piezométrico; obtener información necesaria para calcular la recarga y determinar su disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante actividades de campo se realizaron, censos de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas. Este estudio fue 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 Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del INEGI, el área que cubre el acuífero 20 de noviembre se encuentra ubicado dentro de la Provincia Fisiográfica Mesa del Centro, subprovincias Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes, Altos de Jalisco y Sierra de Cuatralba. Está situado en una zona de traslape de tres grandes provincias fisiográficas que le confieren fuertes contrastes topográficos y un ambiente tectónico complejo: el contacto entre la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico; entre la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur, y entre la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. Estas zonas particulares definen la diversa litología, geología y morfología del territorio jalisciense.

La Provincia Mesa Central se localiza en la región central de la República Mexicana, se extiende desde el Río Nazas Durango, en el norte, hasta su colindancia con el Cinturón Volcánico Mexicano, quedando limitada al poniente por la Sierra Madre Occidental y al oriente por la Sierra Madre Oriental. Comprende parte de los estados de Durango,

Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes y Guanajuato.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, los climas predominantes se encuentran en el rango de semiseco al semicálido, con una temperatura media anual de 17.1 °C ($8.9 < T < 25.4$).

La climatología de la cuenca es heterogénea, con variaciones anuales predominantemente semiseco a semicálido, con otoño, invierno y primavera secos, con invierno benigno.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 5 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero y son: 11050, 14054, 14097, 14103 y 14106, cuyo registro comprende un periodo de 57 años.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **522 mm** y **16.6 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,835 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta, en términos generales, dos períodos de ocurrencia uno en verano de junio a septiembre, cuando se registran los valores más altos, y otro de lluvias que abarca de febrero a abril, con precipitaciones menos significativas. En el mes de julio se tiene la mayor lámina de precipitación con 108.1 mm; mientras que en el mes de marzo solo se registra una lámina de precipitación de 9.6 mm.

En cuanto a la distribución mensual de la temperatura media, mayo es el mes más cálido, con una temperatura media de 20.6°C, en tanto que los meses de diciembre y enero registran la menor temperatura media, 14.4°C.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 12 “Lerma-Chapala-Santiago”, Cuencas del Río Verde Grande y Río San Pablo y Otras (porción norte del acuífero). La cuenca del Río Verde Grande cubre 11801 km² del estado y se extiende entre la Sierra de Nochistlán y la meseta de San Jerónimo, incluye localidades como Ojuelos de Jalisco y Lagos de Moreno.

El Río Verde nace en el estado de Zacatecas y drena una cuenca considerable antes de penetrar al Estado de Jalisco. En la cuenca Río Verde Grande se localiza la presa El Cuarenta que irriga aproximadamente 3000 hectáreas y sirve además como control de avenidas. La cuenca del Río Verde Grande se ha formado por los aportes sedimentarios de una extensa red de drenaje a partir del Plioceno y ha funcionado como tal hasta la actualidad.

3.4 Geomorfología

La región se caracteriza por una zona montañosa, el drenaje es dendrítico y la principal corriente fluvial es el río Verde. La altitud se encuentra por encima de los 2000 msnm y es una región cubierta en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas. La región muestra un estado de erosión mucho más activo con desniveles más pronunciados y los rasgos estructurales, principalmente fallas normales, se observan menos erosionadas.

4 GEOLOGÍA

Las rocas que afloran en el área del acuífero son de origen continental, las cuales corresponden a rocas ígneas de composición riolítica y afloramientos muy pequeños de rocas sedimentarias de origen marino.

Las rocas más antiguas que se encuentra dentro del área de estudio corresponden al Cretácico Superior, indican que su ambiente de depósito fue en aguas profundas con variación de esta.

El Neógeno está representado por rocas ígneas extrusivas, producto de flujos de lavas y eventos explosivos. El cuaternario está representado por los diferentes sedimentos tanto aluviales como residuales que cubren principalmente las partes planas.

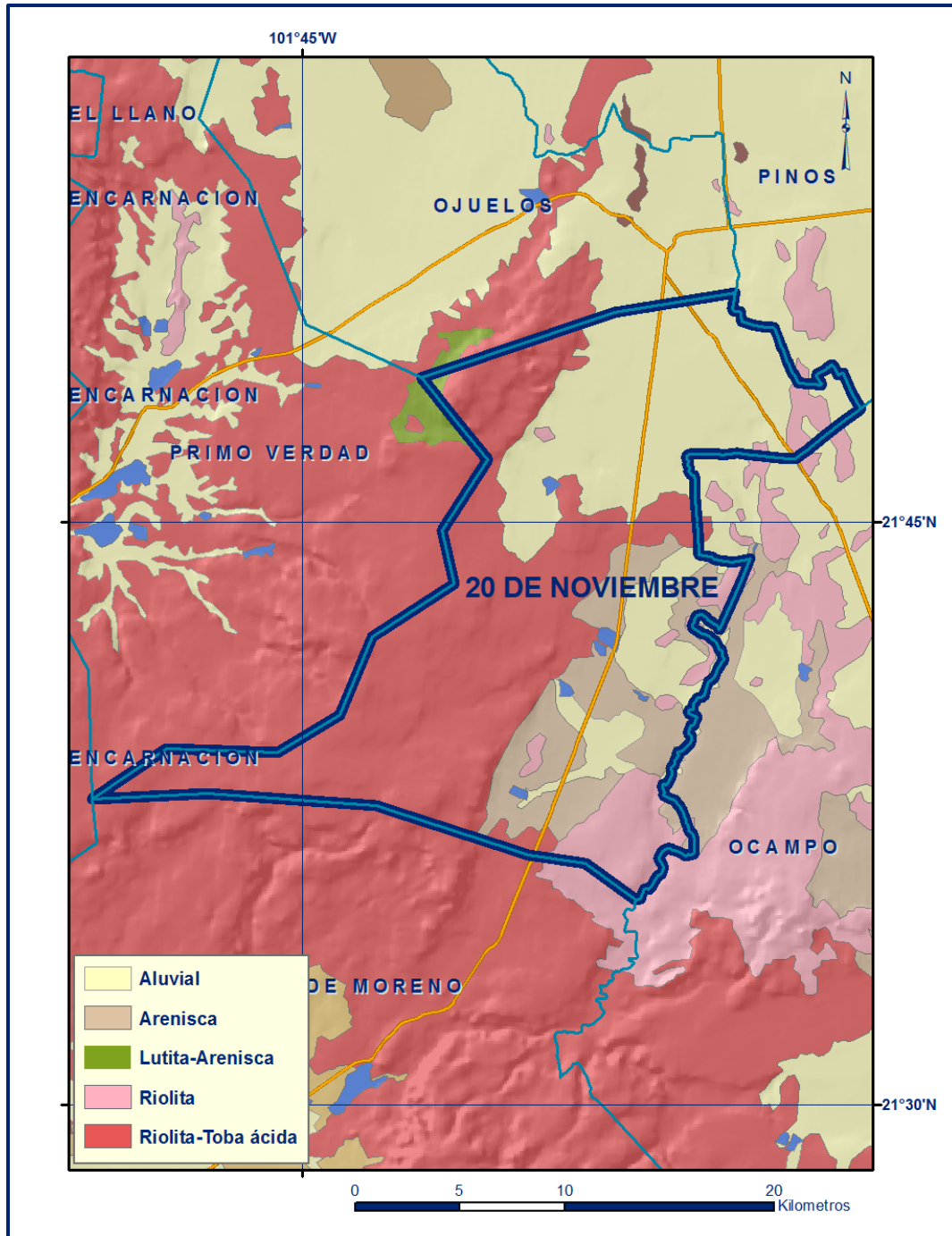


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en la región comprende un registro cuya edad varía del Cretácico al Reciente. A continuación, se describen las distintas unidades litológicas de la más antigua a la más reciente.

Para el Cretácico Superior se tiene una secuencia sedimentaria que paso de caliza de plataforma a caliza arcillosa y a lutita calcárea de color gris verdoso que intemperiza a amarillo y presenta una fractura concoide; culminando hacia la cima en rocas clásticas, principalmente areniscas con numerosos clastos de rocas volcánicas, que marcan la regresión que puso fin a las condiciones marinas en la Mesa Central.

Durante el Eoceno Superior-Oligoceno fueron extruidas rocas volcánicas y composición riolítica, las cuales corresponden a depósitos de actividad volcánica explosiva, se trata de una cubierta de ignimbritas y otras rocas piroclásticas que aparecen cubriendo a los domos y derrames riolíticos. Las rocas sedimentarias del Oligoceno-Cuaternario muestran intercalaciones de rocas máficas.

Al Cuaternario corresponden los aluviones de diversas granulometrías, producto erosivo de las rocas preexistentes, que cubren parcialmente a todas las formaciones ya descritas.

4.2 Geología estructural

El marco tectónico-estructural que se observa en el área está relacionado a dos fases: los plegamientos que perturbaron a las rocas sedimentarias de la región y las fallas y fracturas que se encuentran afectando a las rocas paleógeno-neógenas y mesozoicas.

Estos fallamientos y fracturamientos fueron originados por la Orogenia Laramide en el periodo Paleógeno-Neógeno, posteriormente a la depositación de las rocas.

Los plegamientos ocurrieron a principios del Paleógeno, cuando los sedimentos marinos del Cretácico sufrieron deslizamientos submarinos dirigidos al NE.

Estos movimientos orogénicos crearon extensos anticlinorios y sinclinorios. En la porción este de la zona se observan las rocas sedimentarias afectadas por plegamientos originados por los esfuerzos tectónicos generados por la Orogenia Laramide, durante el Cretácico Tardío.

De acuerdo a los esfuerzos que estuvieron acompañados por fallas y fracturas, las cuales liberaron parte de la energía generada por los esfuerzos compresionales, posteriormente hubo un evento de relajamiento de las rocas causando su reacomodo.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de sondeos geofísicos, de la geología superficial, cortes litológicos de pozos y por correlación con otros acuíferos vecinos es posible definir que en el subsuelo se presentan riolitas y riolitas-tobáceas; sobreyacidas en algunas áreas por estratos de delgados espesores de areniscas y depósitos aluviales y fluviales, así como de piedemonte hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero.

El acuífero se encuentra alojado, en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales producto de la erosión de las partes altas de las sierras, que han sido transportados por escurrimientos superficiales para ser depositados en los cauces de los arroyos y en los valles. Su espesor es variable y solo alcanza algunas decenas de metros en los cauces de los arroyos ubicados en la porción centro-norte del acuífero. La parte inferior está conformada por rocas volcánicas, como riolitas y riolita-tobácea, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración. Estas mismas rocas constituyen las barreras al flujo subterráneo y el basamento hidrogeológico, cuando desaparece su fracturamiento a profundidad.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

De acuerdo a las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, se define la presencia de un acuífero **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical. Esta constituido en su porción norte por sedimentos aluviales, en tanto que hacia la parte sur se aloja en rocas extrusivas (riolitas y riolitas-tobas acidas). La recarga principal del acuífero proviene del SW del acuífero. La mayoría de los materiales presenta buena permeabilidad; a profundidad se presentan horizontes semiconfinantes de arcilla o rocas volcánicas con variaciones en su permeabilidad.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se realizaron 3 pruebas de bombeo para determinar los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales que rigen el movimiento del agua en el subsuelo, para describir satisfactoriamente el comportamiento histórico y actual del recurso subterráneo. Mediante un análisis comparativo de los resultados y de la estratigrafía, se establece que los valores de transmisividad varían de **$0.1 \text{ a } 18 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un promedio de **$9.05 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , en las zonas donde la estratigrafía está compuesta de una combinación de sedimentos aluviales y formaciones fracturadas de rocas ígneas.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con información de 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010, mostrada en la figura 3, se observa la profundidad media del nivel estático varía en un rango de 3 a 5 m, Los valores se incrementan gradualmente, por efecto de la topografía, desde los cauces de los arroyos y los valles hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero.

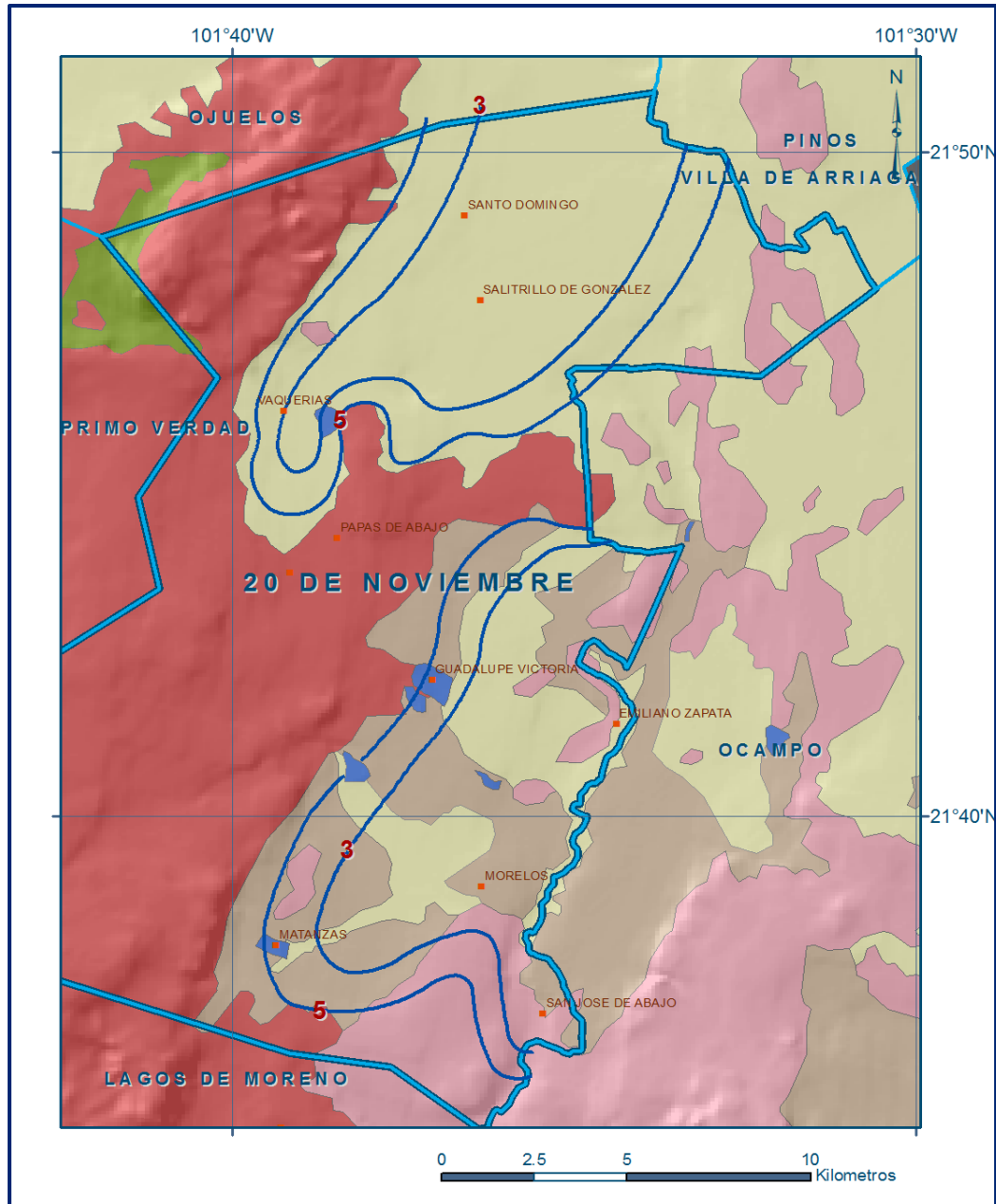


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para 2010, mostrada en la figura 4, se observa que el sistema de flujo natural del acuífero tiene una dirección noreste-sureste con valores de 2,280 msnm en las zonas topográficamente más altas, descendiendo gradualmente hasta 2,170 msnm, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando la dirección preferencial del flujo subterráneo.

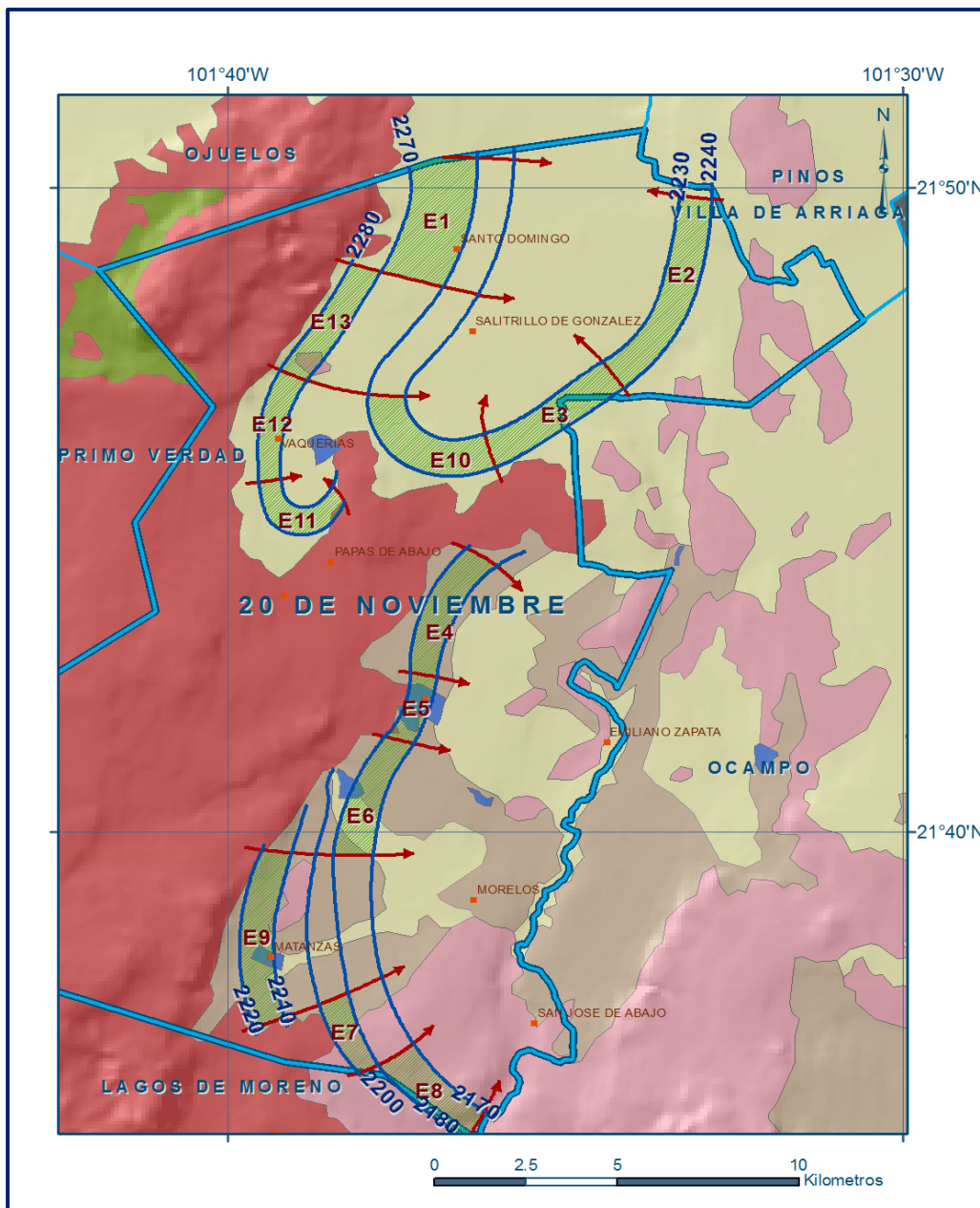


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Además, 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.

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. Las mediciones realizadas en 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 12 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron: parámetros fisicoquímicos Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Potencial de Hidrogeno (pH), Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Sólidos Totales Disueltos (mg/l), Dureza Total (mg/l), DQO (mg/l), compuestos mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} y HCO_3^{-}), así como determinaciones de B^{3+} , $\text{As}^{+/-3}$ y F^{-} , para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 93 a 320 ppm, los cuales no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido 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. Con respecto a la conductividad eléctrica, esta presenta valores que varían de 122 a 519 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores de temperatura varían de 16.6 a 35.8 $^{\circ}\text{C}$, los de pH varían de 7.45 a 9.29 y los valores de dureza total varían de 17 a 102 mg/l.

De los resultados obtenidos de la elaboración de los diagramas de Piper, De los resultados obtenidos se identifican tres familias: la primera, denominada bicarbonatada sulfatada sódica ($\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$), con bajo contenido iónico y prevalencia del ion Na, se localiza sobre los depósitos de materiales aluviales y residuales situados al pie de los materiales riolíticos que flanquean la parte occidental de la cuenca.

En la porción centro-sur del acuífero, el agua es suave con dureza temporal y muy bajas concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- .

Los pozos de esta clasificación (17%, $n=2$), denominada bicarbonatada sódica (HCO_3-Na), se encuentran posicionados sobre una litología predominantemente de areniscas y lutitas. En el extremo oriental del acuífero, fuera de sus límites oficiales, el agua es suave con dureza temporal y muy bajas concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- .

En cuanto a las concentraciones de arsénico, las normas oficiales mexicanas establecen límites máximos permisibles de $\text{As}^{+/-3}$ que varían de $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para uso doméstico (NOM, 1994) a $0.100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para uso agrícola (SEDUE, 1989).

El 100% ($n=12$) de pozos analizados se sitúa dentro del rango permisible para uso doméstico, con una concentración promedio menor de $0.0017 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

En cuanto al flúor, la concentración promedio se encuentran dentro de la normatividad con un valor de $0.337 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($0.15 < F < 0.68$). Por otra parte, el 100% ($n=12$) de las muestras presenta concentraciones de boro que superan el rango permitido para uso doméstico o riego con una concentración promedio de $1.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Por último, la demanda química de oxígeno (DQO) en las 12 muestras de agua presenta concentraciones que se encuentran dentro de las normas establecidas con un valor promedio de $7.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($3 < \text{DQO} < 15$), por lo que puede descartarse la ocurrencia de procesos naturales o de origen antropogénico que afecten su calidad.

Según el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), las muestras se clasifican como C_1S_1 , que representa contenido bajo de sales y baja proporción de sodio intercambiable, que pueden utilizarse para riego agrícola sin ninguna restricción.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio realizado en 2010, se registró un total de 130 aprovechamientos de los cuales 125 se encuentran activos y los restantes 5 inactivos. De ellos, 69 se destinan al uso Público urbano para dotación de agua potable a las comunidades de la región y 56 para uso agrícola. El volumen total de extracción es de **$18.3 \text{ hm}^3/\text{año}$** , de los cuales 8.1 hm^3 (44.3 %) se utilizan para uso agrícolas y 10.2 hm^3 (55.7 %) es para uso público urbano.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el 2010, en un área total de 50 km² del acuífero que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan los aprovechamientos.

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:

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

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 un acuífero:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración a lo largo de los ríos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en la red de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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

$$R_v + E_h + R_i - B - D_m - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv= Recarga vertical;

Eh= Entradas por flujo horizontal;

Ri= Recarga inducida;

B= Bombeo;

Dm= Descarga de manantiales;

ETR= Evapotranspiración;

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento;

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene lo siguiente:

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2010, mostrada en la figura 5.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

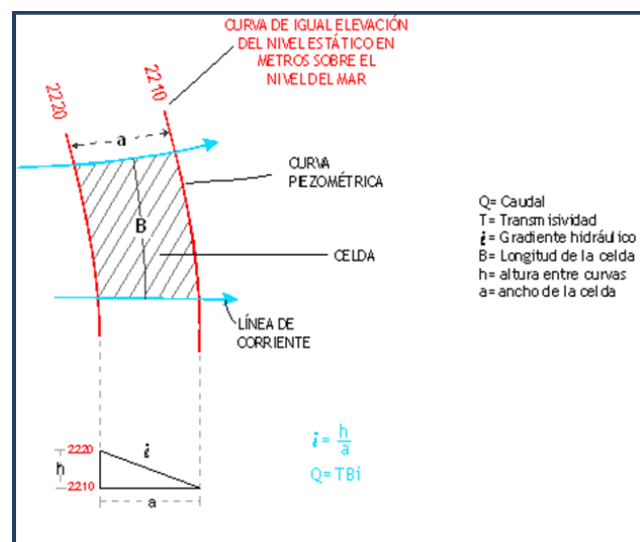
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B: Largo del canal de flujo (m);

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$);

T: Transmisividad (m^2/s);



La recarga total del flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **16.7 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo horizontal (2010)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	5120	2295	30	0.013072	0.0008	0.0535	1.69
E2	7765	1410	10	0.007092	0.0008	0.0441	1.39
E3	5295	1235	10	0.008097	0.0010	0.0429	1.35
E4	5295	1235	10	0.008097	0.0010	0.0429	1.35
E5	2470	1060	10	0.009434	0.0008	0.0186	0.59
E6	4940	1235	10	0.008097	0.0003	0.0120	0.38
E7	2650	880	20	0.022727	0.0005	0.0301	0.95
E8	4235	1235	10	0.008097	0.0005	0.0171	0.54
E9	6530	1060	10	0.009434	0.0005	0.0308	0.97
E10	5295	1235	10	0.008097	0.0015	0.0643	2.03
E11	3530	1235	10	0.008097	0.0015	0.0429	1.35
E12	3880	880	10	0.011364	0.0015	0.0661	2.09
E13	4590	1060	10	0.009434	0.0015	0.0650	2.05
Total entradas							16.7

7.1.3 Recarga Inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, por correlación con acuíferos vecinos, se consideró un 20% del volumen aplicado al uso agrícola que retorna al acuífero en forma de recarga inducida, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea mayor y la presencia de estratos de baja permeabilidad en el subsuelo.

El volumen extracción de agua subterránea para uso agrícola es de 8.1 hm^3 anuales, si consideramos que el 20 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero, obtenemos que el volumen de $1.6 \text{ hm}^3/\text{año}$.

El rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución es del orden del 20 % al 45 %, para el cálculo de fugas en la red de distribución en el acuífero de 20 de noviembre se consideró un valor conservador del 20 %.

De este modo, el volumen total anual de extracción concesionado para uso público urbano es de $10.2 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que el volumen que retorna al acuífero en forma de recarga inducida es de $2.1 \text{ hm}^3/\text{año}$. Por lo tanto, el volumen total por recarga inducida es de **$3.7 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por las descargas de los manantiales (Dm), evapotranspiración (ETR) de los niveles freáticos someros y bombeo (B). No existen salidas por flujo subterráneo horizontal.

7.2.1 Descarga de manantiales (Dm)

Puesto que no se dispone de un registro histórico de niveles ni de los aforos en los manantiales del acuífero, un cálculo aproximado de esta componente con base en los caudales de los 2 manantiales existentes estimados durante las visitas de campo es de **$2.0 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

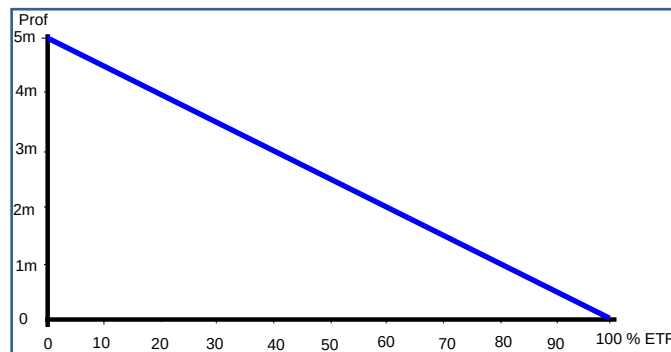
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que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

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

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

T (°C) =	16.6		
P(mm) =	522	P ² =	272484
L =	943.7148	L ² =	890597.624
ETR (mm)	475.3		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior.

Tomando en cuenta una superficie de 100 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y una lámina de evapotranspiración obtenida de 475.3 mm, se tiene que la ETR = 100 km² (0.4753 m) (0.4) = 19.0. Por lo tanto, la **ETR=19.0 hm³/año.**

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **18.3 hm³ anuales**.

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo.

Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

Bajo estas consideraciones, se considera que la posición del nivel del agua subterránea no ha sufrido alteraciones importantes y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por esta razón, para fines del balance de aguas subterráneas, no existe cambio de almacenamiento en el acuífero; es decir, **$\Delta V(S) = 0$** .

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión 2, que fue establecida con anterioridad:

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

$$R_v = 18.3 + 2.0 + 19.0 + 0.0 - 16.7 - 3.7$$

$$R_v = 18.9 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$R = R_v + E_h + R_i$$

$$R = 18.9 + 16.7 + 3.7$$

$$R = 39.3 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular 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 siguiente expresión:

$$\text{DMA} = \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \quad (3)$$

Donde:

DMA= Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

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 (R) corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como de recarga inducida. Para el caso del acuífero 20 de noviembre su valor es de **39.3 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 están comprometidos como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes, sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida un volumen de **11.5 hm³ anuales**, que corresponde a la descarga a través de los manantiales y al 50% de la evapotranspiración.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **6,516,953 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión 3, 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.

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \quad (3) \\ \text{DMA} &= 39.3 - 11.5 - 6.516953 \\ \text{DMA} &= 21.283047 \text{ hm}^3 \text{ anuales}\end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **21,283,047 m³ anuales**.

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de los acuíferos, Valle de Guadalupe, Primo Verdad, La Huerta, Miguel Hidalgo, Cihuatlán, 20 de noviembre, Cuquío, Colotlán, Tecolotlán, Tomatlán, Tequila y La Barca, en el estado de Jalisco. Elaborado por la Universidad Autónoma del Estado de México.