CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO LA NORTEÑA (0858), ESTADO DE CHIHUAHUA

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1 Localización 2
1.2 Situación administrativa del acuífero 4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 5
3. FISIOGRAFÍA 6
3.1 Provincia fisiográfica 6
3.2 Clima 6
3.3 Hidrografía 7
3.4 Geomorfología 7
4. GEOLOGÍA 8
4.1 Estratigrafía 8
4.2 Geología estructural 10
4.3 Geología del subsuelo 11
5. HIDROGEOLOGÍA 12
5.1 Tipo de acuífero 12
5.2 Parámetros hidráulicos 12
5.3 Piezometría 13
5.4 Comportamiento hidráulico 13
5.4.1 Profundidad al nivel estático 13
5.4.2 Elevación del nivel estático 14
5.4.3 Evolución del nivel estático 15
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 16
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA 16
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRÁNEAS 16
7.1. Entradas 17
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 17
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 18
7.2. Salidas 19
7.2.1. Bombeo (B) 19
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 19
7.2.3. Evapotranspiración (ETR) 19
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS) 21
8. DISPONIBILIDAD 21
8.1. Recarga total media anual (R) 22
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) 22
8.3. Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS) 22
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 23

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 La Norteña, definido con la clave 0858 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroeste del estado de Chihuahua entre los paralelos 29°30' y 29°53' de latitud norte y los meridianos 108°12' a 108°38' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,084 km^2 (Figura 1).

Limita al norte con el acuífero Río Bavispe del Estado de Sonora, al este con los acuíferos Ignacio Zaragoza, perteneciente al Estado de Chihuahua, y Nácori Chico del Estado de Sonora; al sur y oeste con el acuífero Nácori Chico.

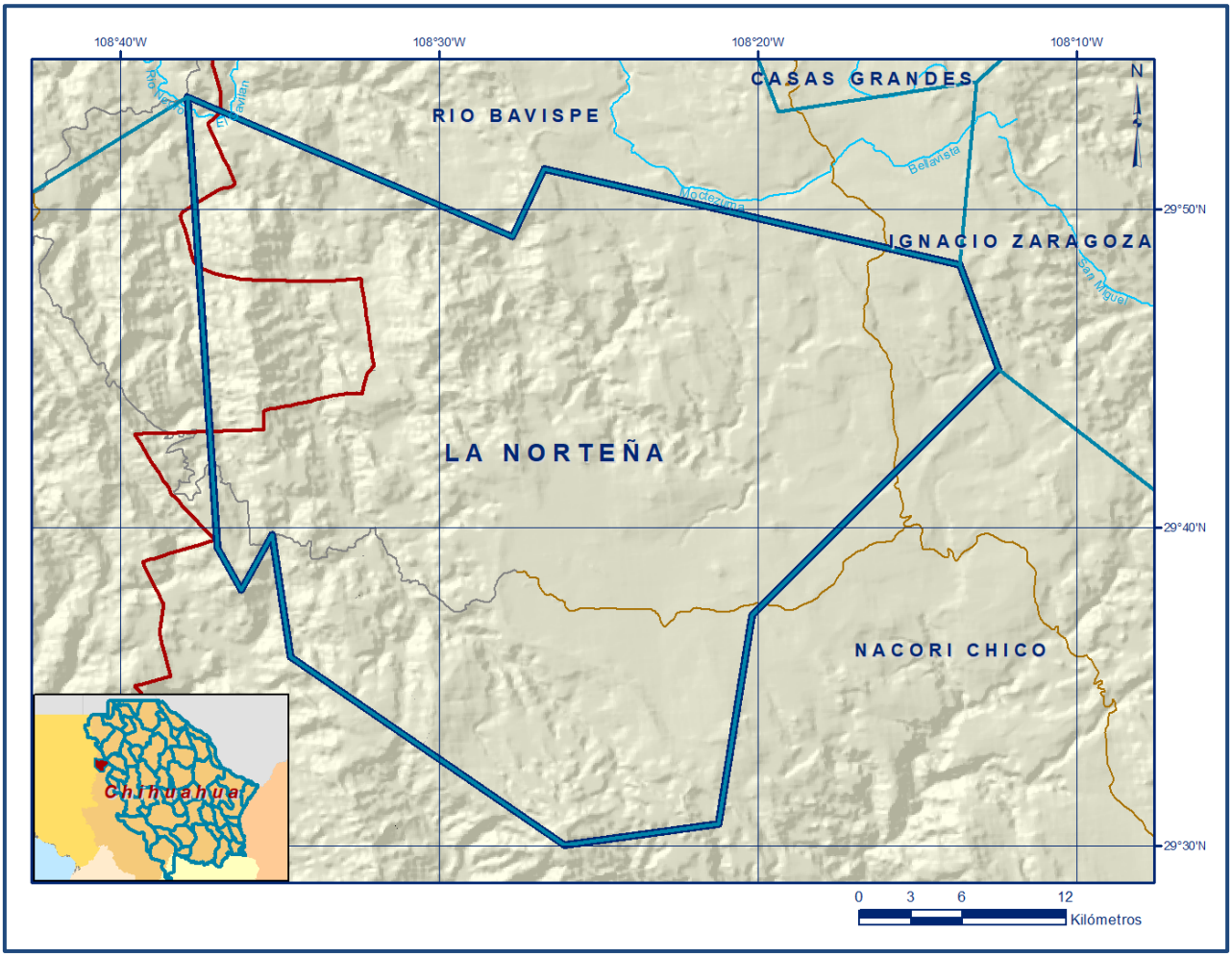


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente la mayor parte de la superficie del acuífero se encuentra en el municipio Madera, dentro del Estado de Chihuahua y una pequeña porción de los extremos noroeste y oeste se localiza en el municipio Nácori Chico, en el Estado de Sonora.

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

ACUIFERO 0858 LA NORTEÑA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	108	12	27.9	29	44	58.0	
2	108	20	11.3	29	37	15.1	
3	108	21	14.2	29	30	41.6	
4	108	26	5.7	29	30	1.5	
5	108	34	39.8	29	35	57.0	
6	108	35	14.2	29	39	46.7	
7	108	36	12.5	29	38	2.8	
8	108	36	58.1	29	39	22.4	
9	108	37	54.2	29	53	32.8	
10	108	27	42.3	29	49	8.4	
11	108	26	43.5	29	51	15.7	
12	108	13	41.6	29	48	16.5	
1	108	12	27.9	29	44	58.0	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero La Norteña pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y es jurisdicción de la Dirección Local en Chihuahua.

En su superficie completa no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del "*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican*", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

El principal usuario del agua es el doméstico-pecuario. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca "Ríos Yaqui y Mátape", instalado el 30 de agosto de 2000.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4.

En la superficie del acuífero no se localiza ningún distrito o unidad de riego, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En el área que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios de exploración geológica y minera. Con respecto a estudios hidrogeológicos se han desarrollado algunos a escala regional, de los cuales a continuación se citan los más importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ESTADO DE SONORA, 1993. Elaborado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). En su informe se describen las características hidrológicas generales de los acuíferos del Estado de Sonora.

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO DEL ESTADO DE SONORA, 2005. **Elaborado por la Universidad de Sonora para la Comisión Nacional del Agua.** El objetivo del estudio fue establecer una red de monitoreo piezométrico para cada uno de los acuíferos que son jurisdicción administrativa del Organismo de Cuenca Noroeste, (todo el estado de Sonora y los extremos occidental y suroccidental del estado de Chihuahua). Como parte de este este estudio se elaboraron mapas temáticos (clima, precipitación, temperatura, geología, geomorfología, vegetación, uso de suelo, etc.), y de configuración del nivel estático (profundidad, elevación y evolución), mostrando las direcciones de flujo subterráneo. Es un estudio de consulta general de los acuíferos.

ACTUALIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO YAQUI, MÁTAPE, ESTADO DE SONORA, 2008. Elaborado por el Servicio Geológico Mexicano para la Comisión Nacional del Agua. En este estudio se actualiza el conocimiento hidrogeológico de los acuíferos serranos del Estado de Sonora y realizan actividades de campo como censo, hidrometría y nivelación de brocales. Plantea los balances de aguas subterráneas de los acuíferos de esta cuenca.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUIFEROS RÍO BACANORA, EN EL ESTADO DE SONORA, Y LA NORTEÑA Y MADERA, EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA. Elaborado por la Universidad de Sonora, en 2011.

El objetivo general de este estudio fue definir las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas. 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

De acuerdo con la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Geografía (INEGI, 1997), la superficie cubierta por el acuífero se encuentra en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, Subprovincia Fisiográfica Sierras y Cañadas del Norte, que se caracteriza por presentar elevaciones que varían de 1500 a 2400 msnm, representadas por sierras de laderas escarpadas constituidas principalmente de rocas volcánicas, entre las cuales se localizan algunos valles intermontanos.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por E. García para las condiciones particulares de México y la clasificación climática del INEGI, en la superficie cubierta por el acuífero predominan dos tipos de climas: semifrío subhúmedo con verano fresco y prolongado en la porción este y sur del acuífero, con temperatura media anual de 12 °C, temperatura mínima hasta de -20 °C y máxima de 22°C.

Así como clima templado subhúmedo que domina al oeste, con temperatura media anual de 18°C, temperatura mínima de -3°C y máxima de 22°C; ambos con régimen de lluvias de verano. Para la determinación de las variables climatológicas se analizó la información de 3 estaciones que tienen influencia en la superficie del acuífero, dos ubicadas en Sonora: Bacadéhuachi y Bacerac, y Temósachi, ubica en territorio del estado de Chihuahua.

De acuerdo con los registros de estas estaciones para el periodo 1980-2010 (30 años), utilizando el método de polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **434.8 mm y 20.7 °C**, respectivamente. La evaporación potencial es del orden de **1725 mm anuales**.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrológica RH 9 “Sonora Sur”, cuenca del Río Yaqui. Los principales arroyos del acuífero son de régimen intermitente, entre ellos los conocidos con los nombres El Negro y El Chuhuichupa, ambos orientados en dirección sureste-noroeste; que nacen en la porción sureste de la Mesa El Poleo y el Cerro Alamillos.

En la porción occidental nace el arroyo El Arco y presenta una dirección norte-sur. A nivel regional, el escurrimiento principal es el Río Bavispe, ubicado al noroeste, fuera del límite del acuífero; que tiene su origen en la porción norte de la zona conocida como Tres Ríos.

La infraestructura hidráulica que existe en la región del acuífero consiste en algunos bordos y obras de captación de aguas subterráneas: norias y pozos someros utilizados principalmente para abastecimiento doméstico. El drenaje de la zona es de tipo dendrítico y paralelo.

3.4 Geomorfología

La región presenta en términos generales tres unidades geomorfológicas: macizos rocosos, mesetas y valles. Los macizos rocosos conforman estructuras rígidas, constituidas predominantemente por rocas ígneas extrusivas ácidas, con relieve abrupto, en ocasiones escarpado; esta unidad se ubica en la porción occidental y suroccidental del acuífero en forma de sierras aisladas que presentan fuerte pendiente, que contrasta de manera muy pronunciada con otras unidades. La segunda unidad se encuentra principalmente en la parte meridional, su expresión topográfica es de mesetas y lomeríos de pendientes suaves; constituidas por derrames de basalto. La tercera unidad geomorfológica se caracteriza por presentar un relieve de escasas variaciones, originada por los depósitos de relleno de valle y se manifiesta como llanura, en cuyos bordes se observan los cambios topográficos más frecuentes de la unidad, dando lugar a lomeríos que desaparecen paulatinamente hacia el centro del valle.

La región en estudio muestra una litología eminentemente ígnea, formada por emanaciones volcánicas, derrames de fisura, brechas y depósitos piroclásticos cuyo origen está ligado al tectonismo de la Sierra Madre Occidental. El drenaje de la zona es de tipo dendrítico.

4. GEOLOGÍA

La geología de la zona está representada por rocas volcánicas que afloran en sierras de topografía abrupta, mientras que en los valles y en los pie de monte existen conglomerados, basaltos y depósitos de origen aluvial (figura 2).

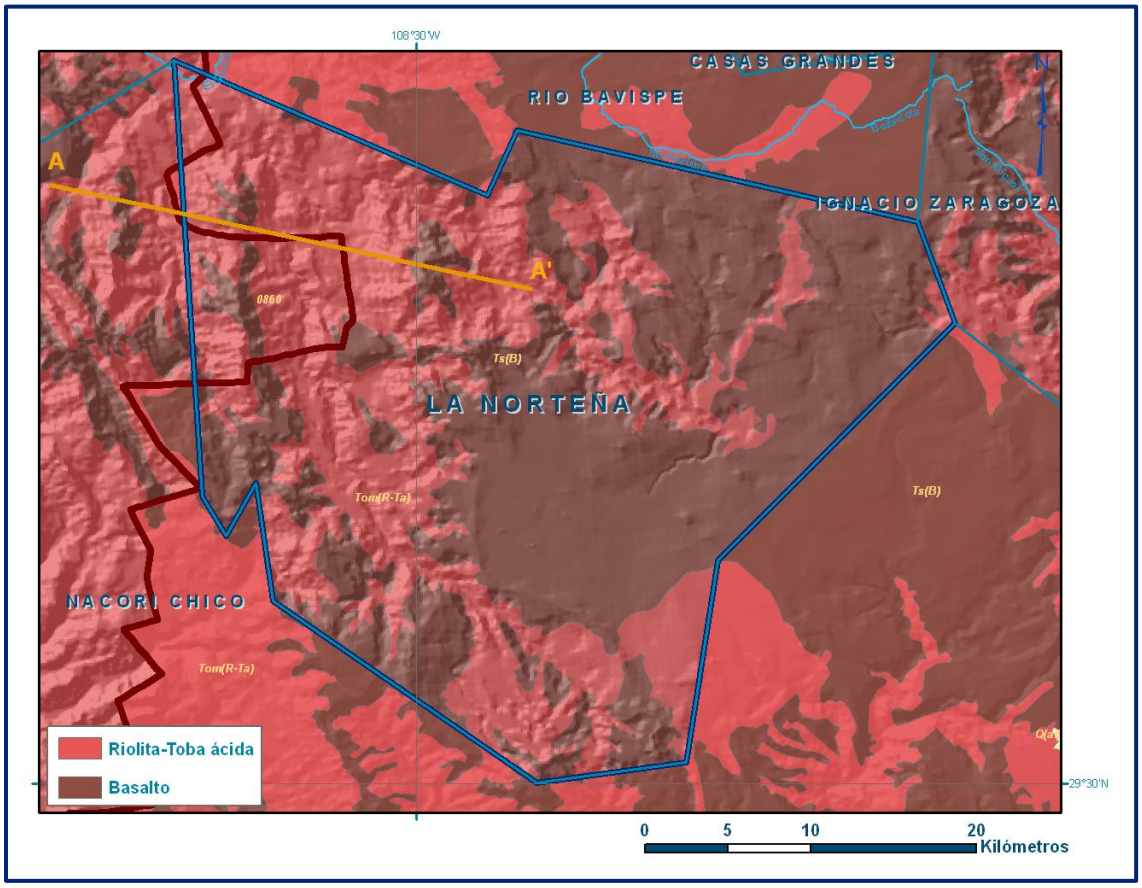


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Las unidades litoestratigráficas que afloran varían en edad del Mesozoico (Cretácico) al Reciente y están compuestas por rocas sedimentarias, ígneas extrusivas e intrusivas. A continuación, se describen brevemente, en orden cronológico de la más antigua a la más reciente.

Cretácico

Complejo Volcánico Inferior

Está representado por la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1949).

Es un grupo de rocas constituido principalmente por andesitas de color verde de textura afanítica, compacta, en algunas áreas se presenta como aglomerados andesíticos, tobas andesíticas porfídicas y dacitas, traquitas y riolitas, con escasas intercalaciones de areniscas, lutitas y calizas.

Su espesor promedio es de 1500 m; solamente aflora en la porción sur del acuífero, al oriente del poblado El Poleo. Presentan alteración y están afectadas por tectonismo, por lo que en superficie constituyen zonas de recarga.

Batolito Laramide

Está representado por intrusivos cretácicos de composición granítico-granodiorítica, cuya forma y distribución está controlada por la erosión y eventos tectónicos posteriores, se encuentran dos afloramientos expuestos al oriente del acuífero, en el Cerro El Colorado. Presenta color gris claro a crema, compacto y textura porfídica; en superficie debido a la intemperización adquiere una coloración ocre. Aunque sus afloramientos son de reducida dimensión, a profundidad constituye el basamento hidrogeológico regional de las rocas volcánicas fracturadas, de dimensiones batolíticas.

Terciario (Eoceno-Oligoceno)

Toba Riolita-Ignimbrita

Es una ignimbrita traquítica de edad Eoceno Medio-Oligoceno Inferior, que aflora al sur del acuífero, en los cerros El Negro, El Carro y Alamillos; al suroeste en el Cerro El Chato; desde la porción central hacia el noroeste, donde se presentan los afloramientos más sobresalientes. Cubre grandes extensiones con orientación NW-SE.

Secuencia Bimodal Andesita-Basalto, Basalto

Se denomina Secuencia Bimodal a una serie de flujos de rocas volcánicas de composición andesítico-basáltico y andesítico-riolítico que se presentan como andesitas basálticas y basaltos en ocasionales con intercalaciones de tobas riolíticas, que sobrepasan los 500 m de espesor. Las rocas andesíticas-basálticas afloran en su mayoría en la porción oriente del acuífero, en las inmediaciones de la Mesa Prieta; mientras que el basalto del Mioceno aflora al norte, centro y sur del acuífero.

Se depositaron de manera concordante al final de del vulcanismo ácido debido a un cambio en el régimen tectónico, están distribuidas ampliamente (Carta Geológico-Minera 12-9 “Madera”, escala 1:250000. SGM, 1999).

Terciario (Mioceno)

Formación Báucarit

Es una secuencia de areniscas, arcillas y conglomerados de composición polimíctica, bien estratificados y bien consolidados que está relacionada a la etapa de distensión. En su parte inferior existen derrames de basaltos intercalados con aglomerados basálticos.

Dentro de esta formación se agrupa una secuencia volcánica intermedia y básica, intercalada con el material conglomerático en su base y parte superior, también incluye un conglomerado polimíctico con clastos de basalto y andesitas basálticas. Esta unidad tiene escasa distribución en la zona, solamente en la porción sur, en las inmediaciones de la población Chuhuichupa.

Una generación de basaltos y tobas riolíticas de poco espesor y gran extensión, ocurrida al final del Mioceno, aflora concordantemente sobre el Conglomerado Báucarit. (Carta Geológico-Minera 12-9 "Madera", escala 1:250000. SGM, 1999).

Reciente

Aluvión

Los sedimentos del Reciente son producidos por el intemperismo de rocas preexistentes, depositados como abanicos aluviales y fluviales que rellenan los valles y a lo largo de ríos, arroyos y planicies de inundación. Están constituidos por gravas de diferentes litologías, arenas y limos, poco compactos, que presentan permeabilidad alta, pero espesor reducido. Aflora en la región central del acuífero.

4.2 Geología estructural

A nivel regional, la característica estructural más importante es la presencia de sierras alargadas afectadas por grandes fallas de rumbo preferencial NW-SE truncadas por fallas con orientación NE-SW y ocasionalmente por fallas casi E-W.

Esta orientación es típica de esta región y es atribuida al último régimen distensivo del Terciario que dislocó las unidades preterciarias, borrando gran parte de los eventos tectónicos anteriores, entre los cuales aún se puede reconocer la deformación laramídica cuyas manifestaciones más importantes son la intrusión de los batolitos del Cretácico-Terciario, los plegamientos de gran radio de curvatura en las secuencias vulcanosedimentarias y vulcanoclásticas del Cretácico Superior y la Cabalgadura de las secuencias sedimentarias del Precámbrico y del Cretácico Inferior sobre la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Tarahumara.

Así como la deformación Mesocretácica cuyas evidencias son el plegamiento cerrado y paralelo de las secuencias marinas del Cretácico Superior y la discordancia que presentan los contactos de las rocas del Cretácico Inferior y Superior.

Durante el Cretácico Superior se origina la Orogenia Laramide que se prolonga hasta el Terciario Inferior, se caracterizó por una fase de compresión manifestada por una serie de plegamientos amplios y fallamiento inverso poco desarrollado, que originó magmatismo representado por el intrusivo de dimensiones batolíticas, seguido por eventos de menor magnitud que generan apófisis y stocks de diferente composición.

Durante el Terciario Medio se emplazaron rocas volcánicas félsicas, en la fase final de la subducción de las placas Farallón y Norteamérica. Este evento volcánico fue seguido por el último periodo de extensión tectónica terciaria que ocasionó la formación de innumerables fallas normales, conformando bloques levantados y escalonados, que dieron origen a la morfología de las sierras y valles elongados ("Basin and Range"), principalmente de rumbo NW-SE.

Durante esta fase extensiva se produjo un adelgazamiento de la corteza, una fusión parcial y la producción de un magma basáltico que llegó a la superficie a través de las fallas normales activas, dando lugar al vulcanismo de tipo fisural (Carta Geológico-Minera 12-9 "Madera", escala 1:250000. SGM, 1999).

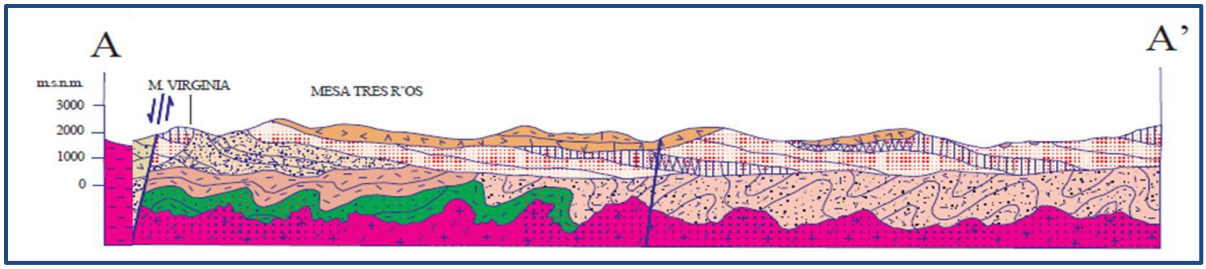
Los rasgos estructurales más sobresalientes presentes en el acuífero consisten de un patrón de fallas y fracturas: un grupo de fracturas con dirección NW-SE y otras con dirección NE-SW. Una falla normal inferida con componente lateral se ubica al noroeste del poblado Los Llanitos, en las mediaciones de la mesa La Estancia, poniendo en contacto el basalto del Oligoceno Superior, la toba, la riolita y la ignimbrita del Oligoceno Inferior.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y por correlación hidrogeológica y geofísica con acuíferos vecinos, se puede afirmar que el acuífero se encuentra constituido, en su parte superior, por depósitos aluviales y sedimentos clásticos representados por areniscas y conglomerados que rellenan el valle; la porción inferior se aloja en la secuencia de conglomerados y basaltos que constituyen la Formación Báucarit y las rocas ígneas extrusivas (basaltos, riolitas y tobas ácidas) que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las unidades de baja permeabilidad de la Formación Báucarit y por las mismas rocas volcánicas cuando a mayor profundidad desaparece el fracturamiento.

El basamento regional está compuesto por una secuencia de areniscas de cuarzo, dolomías, calizas, areniscas calcáreas y lutitas y por el intrusivo batolítico (figura 3).



Carta Geológico-Minera H12-9 "Madera". Escala 1:250 000 (SGM, 1999)

Figura 3. Sección Geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido por dos medios: el superior de tipo granular y el inferior fracturado.

El medio granular poroso está conformado por los depósitos no consolidados y semi-consolidados que incluyen materiales clásticos de granulometría diversa (gravas, arenas, limos y arcillas) y conglomerados polimícticos originados a partir del intemperismo y erosión de las rocas que afloran en la región, así como los depósitos conglomeráticos consolidados de la Formación Báucarit. Su espesor puede alcanzar 300 m en el centro del valle. El medio fracturado subyace al medio granular y está alojado en rocas sedimentarias y volcánicas.

Las unidades de baja permeabilidad de la Formación Báucarit constituyen capas confinantes entre el acuífero granular actualmente en explotación y la unidad volcánica fracturada.

5.2 Parámetros hidráulicos

Durante el censo de aprovechamientos realizado en 2011, se observó que los escasos aprovechamientos que cuentan con equipos eléctricos y condiciones adecuadas para desarrollar pruebas de bombeo, están fuera de operación o no tenían orificio para el monitoreo de los niveles del agua. Estas razones impidieron la ejecución de pruebas de bombeo.

No existe información de las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas que conforman el acuífero.

Sin embargo, mediante recorridos de campo, de acuerdo con la evidencias geológicas (litología y grado de fracturamiento), geofísicas (resistividad) y por correlación hidrogeológica con acuíferos vecinos que presentan características similares, donde se realizaron pruebas de bombeo, se estimaron valores promedio de los parámetros hidráulicos representativos del acuífero.

Los valores de transmisividad varían de **1.2 x 10^{-3} a 4.0 x10^{-3} m^2/s**, (104 a 346 m^2/día), los más altos se asocian a los depósitos aluviales de mayor granulometría. Para la conductividad hidráulica del medio granular se considera un valor promedio de **5.0 x 10^{-4} m/s** (43 m/d).

Para la estimación de entradas y salidas horizontales del acuífero se consideró un valor promedio de transmisividad de 3.0 x10^{-3} m^2/s (259 m^2/día), definido con base en las características litológicas, permeabilidad y espesor saturado observados en campo.

5.3 Piezometría

No existe registro piezométrico histórico. Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró únicamente la información recabada durante el estudio realizado en 2011.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

En 2011 los valores de profundidad del nivel estático, varían de 2 a 53 metros; los niveles más someros se registran en la región centro-oriental del acuífero, en las inmediaciones de las localidades La Manga y La Cortina; los niveles más profundos se localizan cerca de las localidades El Quemado y Chuhuichupa, ubicadas al sureste del acuífero (figura 4).

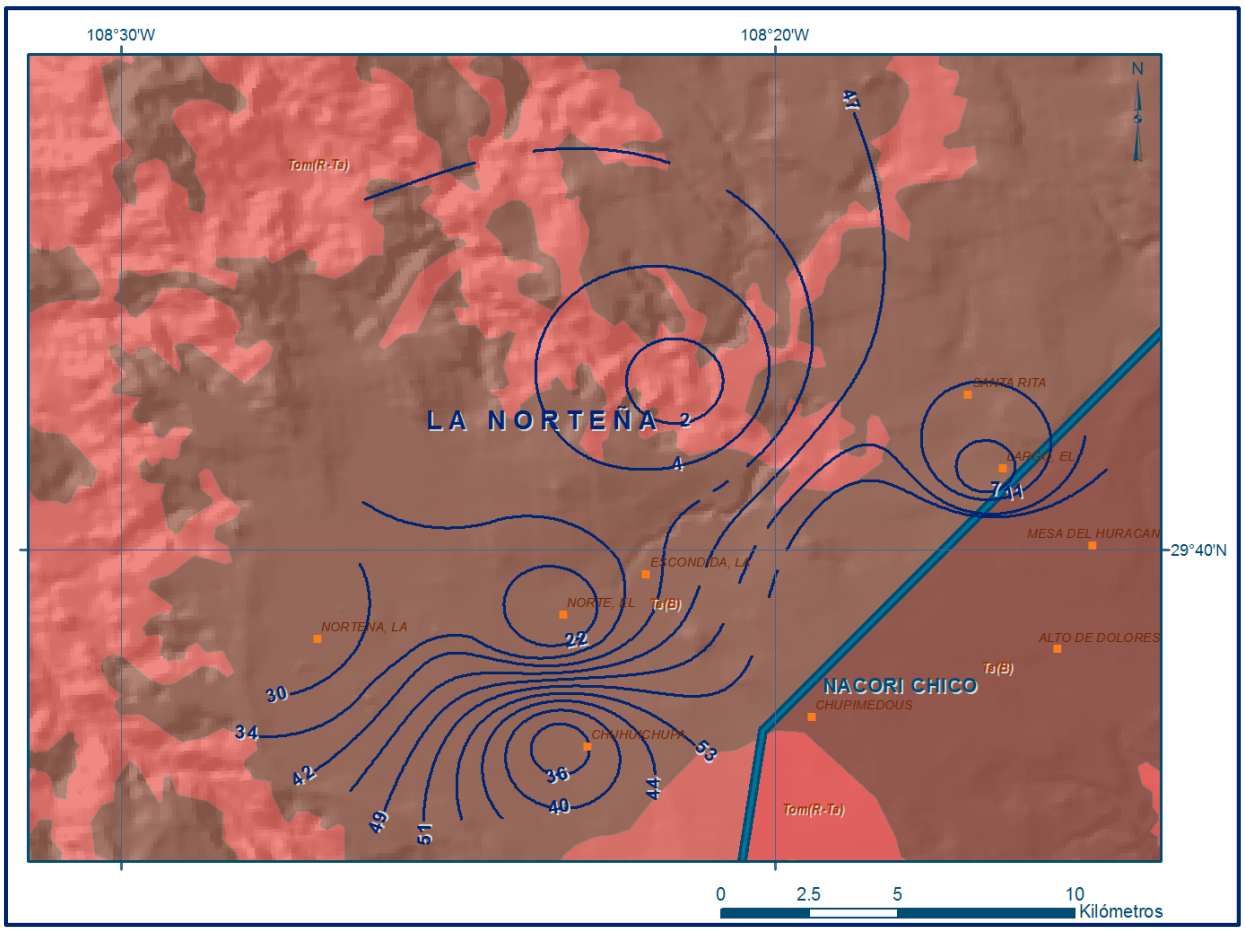


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2011)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para 2011 presenta valores que varían de 2190 a 1980 msnm, decreciendo por efecto de la topografía desde la localidad La Norteña, ubicada en el centro del acuífero, hacia el este.

Los valores máximos de elevación se localizan entre las localidades La Norteña y Rancho El Ocho, desde donde descienden en dirección al este, hacia el rancho La Manga (figura 5).

Por estas razones, se considera 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.

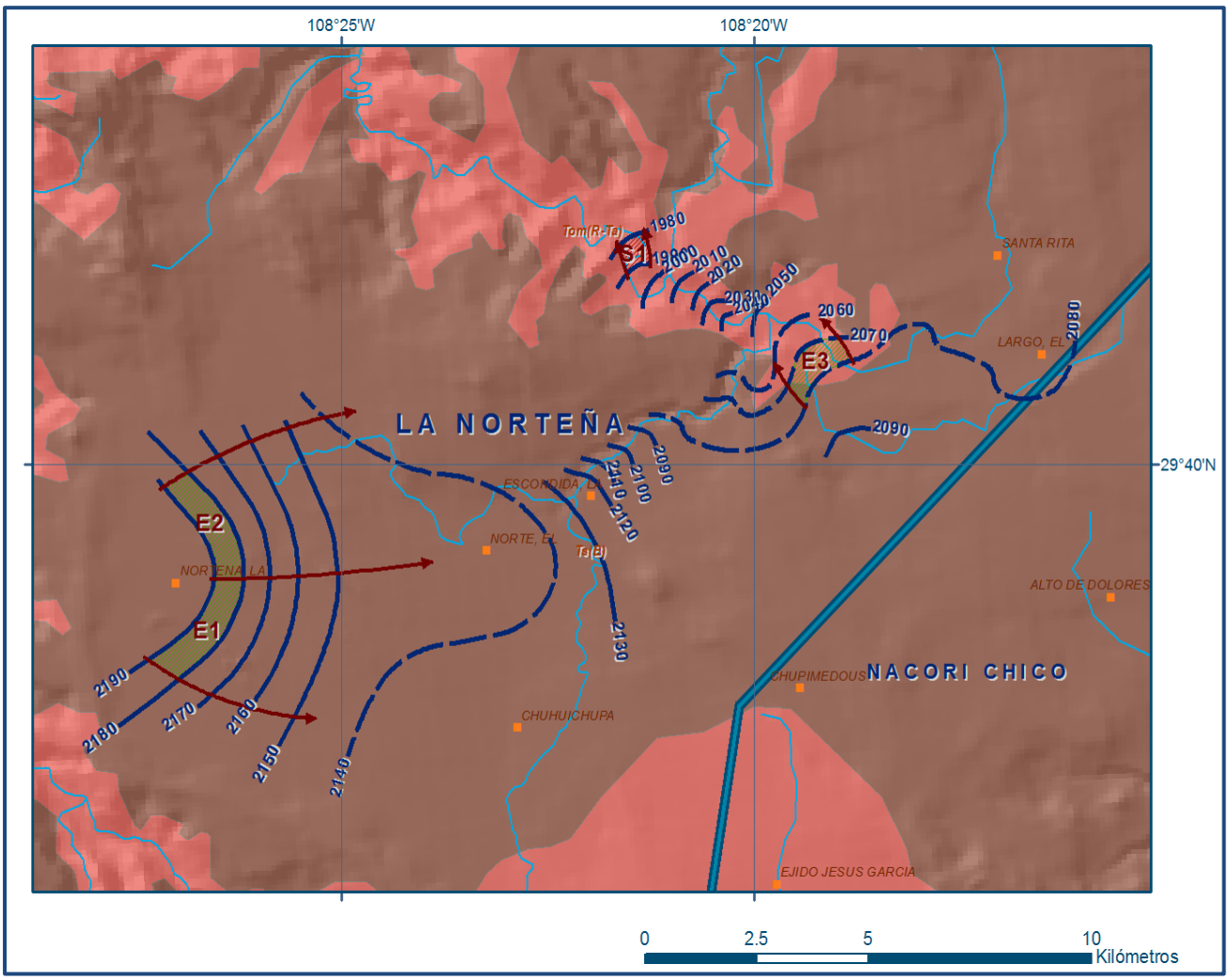


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 2005-2011, las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo muestran variaciones tanto positivas como negativas que varían de -0.15 a 0.20 m, que representan valores promedio anuales de 0.03 m.

Por otra parte, la configuración de la elevación del nivel estático no muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción.

El volumen de extracción estimado es de 0.1 hm^3 anuales, valor que es muy inferior a la recarga más conservadora que pueda calcularse.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Durante el estudio realizado en 2011 sólo se realizaron mediciones *in situ* de temperatura, conductividad eléctrica y pH, cuyos valores indican que el agua presenta baja salinidad que no sobrepasa la concentración de 1000 ppm de STD establecida como límite máximo permisible por 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, de STD. Se considera apta para los diferentes usos.

Esto es consistente con los resultados de los análisis hechos a las muestras de agua que se obtuvieron en los acuíferos vecinos Nácori Chico y Bacadéhuachi, como parte de las actividades realizadas por el SGM en el 2008.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

Durante el censo realizado en el 2005 (UNISON) sólo fue posible registrar la existencia de 5 aprovechamientos de agua subterránea, 2 pozos y 3 norias, de los cuales 3 se encontraban activos y dos inactivos (un pozo y una noria).

El volumen de extracción se estima en **0.1 hm³ anuales**, de los cuales 0.08 hm^3 (80%) se utilizan para satisfacer las necesidades de los usos doméstico y pecuario y 0.02 hm^3 (20%) para uso público-urbano

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2005-2011, en un área de balance de **1082 km²**, que corresponde a la zona del valle donde se localizan dispersos los escasos aprovechamientos del agua subterránea.

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:

Entradas (E) – Salidas (S) = Cambio de masa

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 en el acuífero:

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

Las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, debido a que el volumen para uso público-urbano es insignificante, no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Como se cuenta con información para el cálculo de las entradas y salidas por flujo subterráneo y el valor del cambio de almacenamiento se considera nulo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical
Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
B: Bombeo
Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
ETR: Evapotranspiración real
ΔV(S): Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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 acuífero 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.

Las recargas al acuífero tienen su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el 2011 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

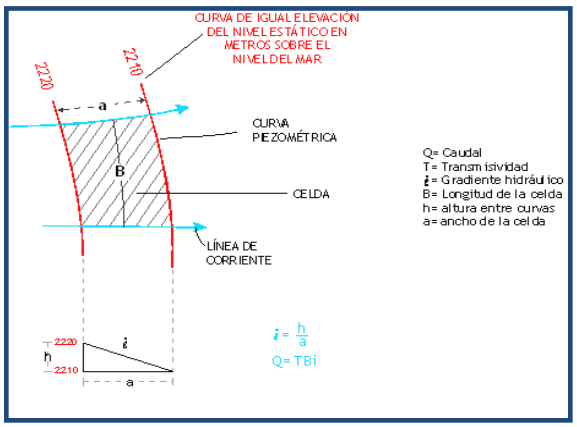
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

B= Largo del canal de flujo (m);

i= Gradiente hidráulico (adimensional);

T= Transmisividad (m^2/s);



El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2011 se presenta en la tabla 2, su valor total es de **9.2 hm^3 anuales**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal (2011)

CANAL	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)
E1	2600	626	10	0.0160	0.0030	0.1246	3.9
E2	2600	612	10	0.0163	0.0030	0.1275	4.0
E3	830	625	10	0.0160	0.0030	0.0398	1.3
						Total entradas	**9.2**

Los valores de T promedio utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron por correlación hidrogeológica con los valores obtenidos en acuíferos vecinos y por las características litológicas, permeabilidad y espesor saturado observadas directamente en campo.

7.2. Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por bombeo (B), evapotranspiración (ETR) y a través de salidas horizontales (Sh). No existen descarga por flujo base ni a través de manantiales.

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **0.1 hm³/año.**

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de la elevación del nivel estático mostrada en la figura 5. Su volumen total estimado es de **1.0 hm³ anuales,** como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2011)

CANAL	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	545	500	10	0.0200	0.0030	0.0327	1.0
						Total entradas	**1.0**

7.2.3. 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, se considera una forma de pérdida de humedad del sistema.

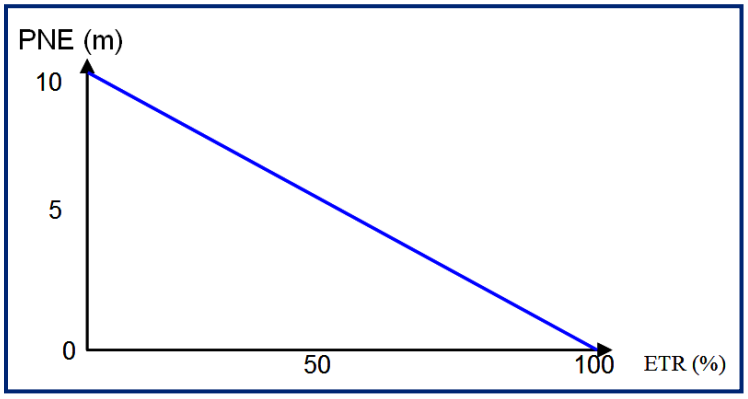
Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real, respectivamente), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación, considerando los valores medios anuales de temperatura = 20.7 °C y precipitación = 434.8 mm. La lámina de ETR que se obtiene es de 430.7 mm.

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

T (°C) =	20.7		
P(mm) =	434.8	P^2 =	189051.04
L =	1260.98715	L^2 =	1590088.59
ETR (mm)	430.7		

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 10 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 10 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 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



Considerando que en una superficie de 33.7 km^2 la profundidad media al nivel estático es de 3.0 m, de acuerdo con la relación lineal mostrada, le corresponde un 70% de la lámina de ETR obtenida.

ETR = (33.7 km^2) (0.4307 m) (0.7) = 10.2 hm^3

Por lo tanto **ETR = 10.2 hm^3/año**

7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, la información piezométrica para el periodo 2005-2011 en los pocos aprovechamientos existentes, muestra que no existen variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea. Además, la configuración de la elevación del nivel estático no presenta alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción y el volumen de extracción es muy inferior a la recarga más conservadora que pueda calcularse. Por estas razones, para fines del balance de aguas subterráneas, se considera que el cambio de almacenamiento es nulo.

Por lo tanto, **ΔV(S) = 0**

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración por lluvia (Rv), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$Rv = B + Sh + ETR - Eh \pm \Delta V(S)$$
$$Rv = 0.1 + 1.0 + 10.2 - 9.2 \pm 0.0$$
$$Rv = 2.1\ hm^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = Rv + Eh$$
$$R = 2.1 + 9.2$$
$$R = 11.3\ hm^3 \text{ anuales}$$

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:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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, tanto en forma de recarga natural como inducida.

Para este caso, su valor es de **11.3 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 el caso del acuífero La Norteña no existen descargas naturales comprometidas.

Por lo tanto, **DNC = 0.0**

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 **33,964 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, 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.

DMA = R – DNC - VEAS
DMA =11.3– 0.0 – 0.033964
DMA = 11.266036 hm^3 anuales

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **11,266,036 m^3 anuales.**