



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**  
**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO MADERA (0859), ESTADO DE  
CHIHUAHUA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>5</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA .....</b>	<b>6</b>
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.1 Clima.....	6
3.2 Hidrografía.....	7
3.3 Geomorfología.....	7
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>8</b>
<b>5. HIDROGEOLOGÍA .....</b>	<b>13</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	13
5.2 Parámetros hidráulicos.....	13
5.3 Piezometría.....	14
5.4 Comportamiento hidráulico.....	14
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	14
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	16
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	17
5.4.4 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	17
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....</b>	<b>17</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRÁNEAS.....</b>	<b>18</b>
7.1. Entradas.....	18
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	19
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	19
7.2. Salidas.....	20
7.2.1. Bombeo (B).....	20
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	20
<b>7.3. Cambio de almacenamiento (<math>\Delta VS</math>).....</b>	<b>21</b>
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>21</b>
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 Madera, definido con la clave 0859 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroeste del Estado de Chihuahua entre los paralelos 28°45' y 29°22' de latitud norte y los meridianos 107°51' a 108°15' de longitud oeste, abarcando una superficie de 1,302 km<sup>2</sup> (Figura 1). Limita al norte con el acuífero Alta Babícora, al este con Guerrero-Yepómera, ambos en el Estado de Chihuahua; al suroeste, sur y noroeste con el acuífero Nácori Chico, perteneciente al Estado de Sonora.

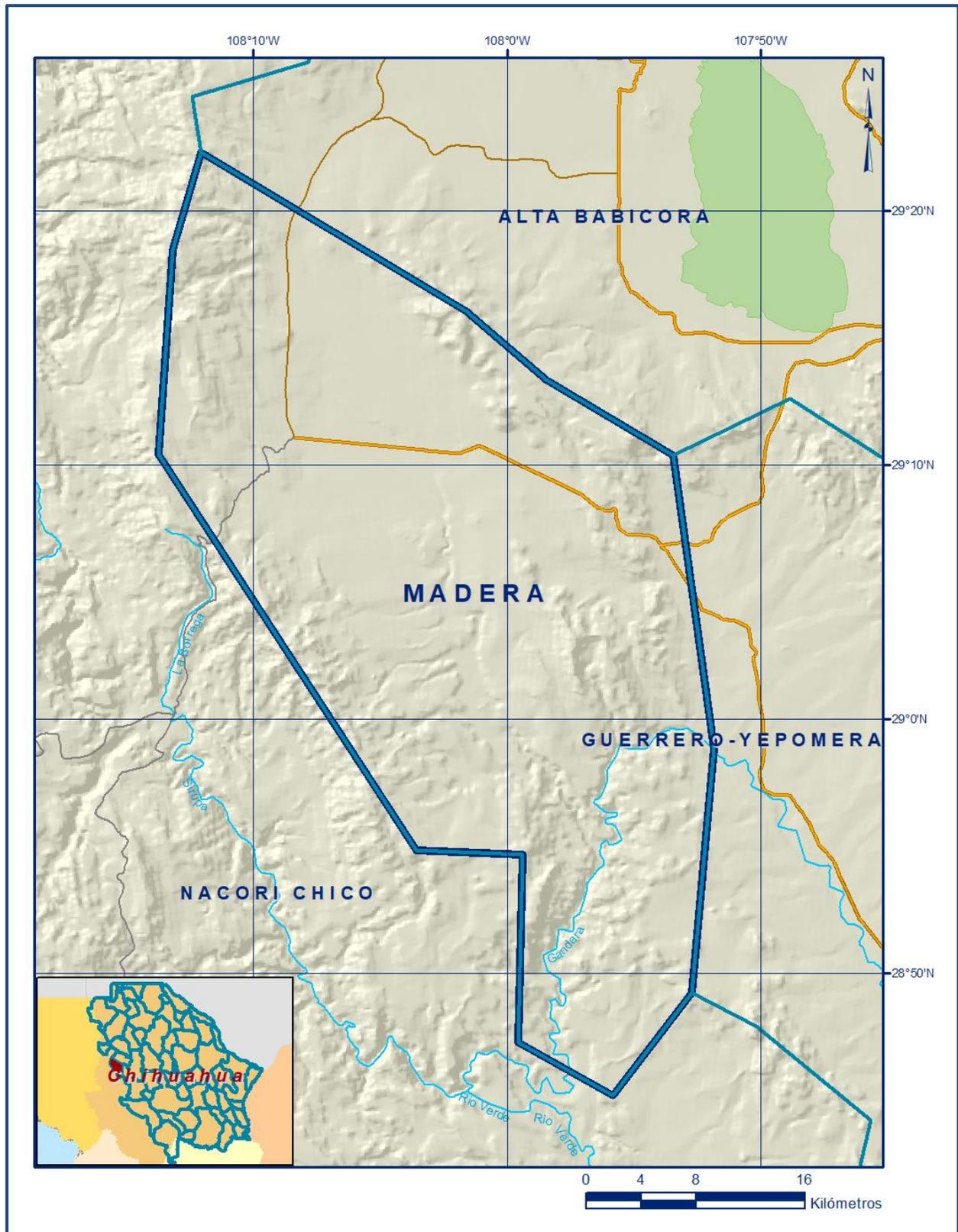


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente abarca parcialmente los municipios Madera y Temósachi. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada

ACUIFERO 0859 MADERA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	
1	108	1	37.1	29	16	4.8	
2	107	58	27.3	29	13	21.4	
3	107	53	28.6	29	10	22.8	
4	107	51	51.7	28	58	51.8	
5	107	52	45.0	28	49	13.0	
6	107	55	51.0	28	45	11.4	
7	107	59	34.5	28	47	17.4	
8	107	59	24.3	28	54	41.0	
9	108	3	34.0	28	54	51.1	
10	108	13	43.5	29	10	25.1	
11	108	13	9.3	29	18	27.9	
12	108	12	3.0	29	22	18.0	
1	108	1	37.1	29	16	4.8	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Madera pertenece al Organismo de Cuenca Noroeste y es jurisdicción territorial 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 agrícola. 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 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 ACUÍFEROS 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, en el territorio de dos subprovincias: Sierras y Cañadas del Norte y Sierras y Llanuras Tarahumaras. La provincia Sierra Madre Occidental presenta en la zona elevaciones de 1000 a 2500 msnm, sierras de laderas escarpadas, constituidas principalmente de rocas volcánicas entre las que se localizan valles intermontanos.

#### **3.1 Clima**

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificado por E. García para las condiciones particulares de México y la clasificación climática del INEGI, en la mayor parte del territorio del acuífero predomina el clima semifrío subhúmedo con verano fresco y prolongado, con temperatura media anual de 12 °C, temperatura mínima hasta de -20 °C y máxima de 22°C. Hacia el sur del acuífero, en una pequeña superficie, se presenta el clima templado subhúmedo, con temperatura media anual de 18°C, temperatura mínima de -3°C y máxima de 22°C; en menor proporción se presenta el clima semiseco templado. En todos ellos el régimen de lluvias es en verano.

Para el análisis climatológico se consideraron los datos de 7 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero; 4 en el estado de Sonora: Tepache, Aribabi, Bacadéhuachi y Arivechi y 3 en el estado de Chihuahua: Madera, Basaseachic y Temósachi, con un período de observación 1980-2010 (30 años).

Mediante el método de polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura **de 592 mm y 18.1 °C**, respectivamente. La evaporación potencial es del orden de **1725 mm** anuales.

### **3.2 Hidrografía**

El área cubierta por el acuífero se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrológica RH 9 “Sonora Sur”; cuenca del Río Yaqui, subcuenca del Río Papigochic. Por su localización en la parte serrana, existe un gran número de escurrimientos superficiales, el más importante es el Río Nuevo Madera que nace en la porción noroeste del acuífero.

Se forma con los escurrimientos de los ríos Cinco Millas y El Teniente, que al unirse confluyen en la Presa Peñitas; a partir de la cual recibe el nombre de Río Nuevo Madera, con una dirección preferencial noroeste-sureste se dirige hacia el sur hasta la altura de la Sierra Rosabari para unirse al Río Papigochic, con este nombre sale del acuífero para después confluir al Río Yaqui.

Existen dos almacenamientos de aguas superficiales; en la porción noroeste la Presa Peñita, ubicada cerca del Poblado Socorro Rivera, y la otra en el centro-este, conocida como “El Presón de Golondrinas”, ubicado a 5.6 km al este del poblado Madera.

### **3.3 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 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 pies de monte existen limolitas, areniscas y conglomerados (figura 2).

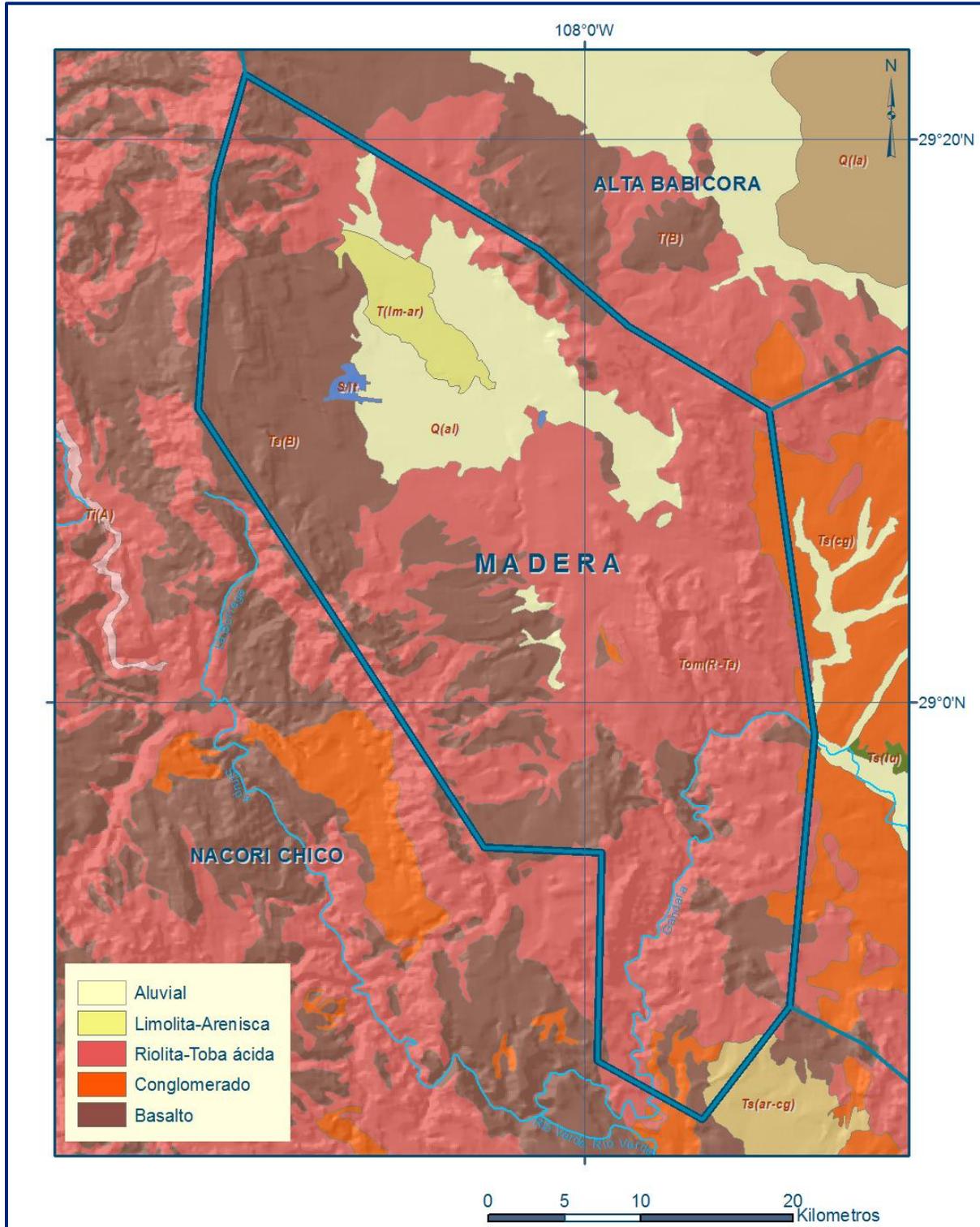


Figura 2. Geología general del acuífero

## **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. 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 observa en la región centro-oeste, en la Sierra La Chinaca, la cual tiene una orientación preferente noroeste-sureste; está cubierto por rocas volcánicas y conglomerados más recientes.

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 Riolítica e Ignimbrita**

Es una ignimbrita traquítica de edad Eoceno Medio-Oligoceno Inferior, que aflora en el flanco oeste de la Sierra Chalchihuites, ubicada en el límite noreste del acuífero; así como en la Sierra La Chinaca en el límite oeste, en las inmediaciones del poblado Casa Blanca y en la porción sur del acuífero. Cubre grandes extensiones con orientación NW-SE.

## **Rocas Basálticas**

En las etapas finales del vulcanismo ácido debido a un cambio en el régimen tectónico, se depositaron concordantemente grandes espesores de rocas intermedias y principalmente básicas de edad Oligoceno Tardío, constituidas por andesitas basálticas y basaltos, 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 una amplia distribución en la zona, sus afloramientos más importantes se presentan a lo largo del límite noroeste del acuífero, así como en la porción central, en los alrededores de las rancherías Casa Colorada, Casa Blanca, Ejido La Libertad y Las Varas.

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).

## **Plioceno-Pleistoceno**

### **Conglomerados Recientes, Limos, Arenas y Gravas**

Se trata de unidades conglomeráticas polimícticas, mal consolidadas, con escasos horizontes de limos, arenas y gravas, de clastos bien redondeados, que conforman terrazas y depósitos de talud. Sobreyace a la Formación Báucarit y subyace a los depósitos aluviales de ríos, arroyos y planicies de inundación, rellenando los valles del acuífero. Sus principales afloramientos se localizan cerca del poblado Nueva Madera. En algunos afloramientos se presentan con estratificación débilmente marcada o en forma masiva.

## **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.

Sus 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.

Así como 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 presentes en el acuífero consisten en fallas y fracturas que se agrupan en dos grupos: fracturas con dirección NW-SE y fracturas con dirección SW-NE.

Los patrones estructurales se correlacionan a la apertura del Golfo de California, que provocó la generación de fosas tectónicas donde se acumularon gruesos paquetes de productos vulcanoclásticos y detríticos.

Las fallas normales se localizan en la porción noreste del acuífero, en la Sierra Chalchihuites, poniendo en contacto el conglomerado del Plioceno-Pleistoceno con una toba riolítica del Oligoceno; y al sur con dirección NW-SE.

#### **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, limolitas 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 que afloran en la sierra Chiltepín y por el intrusivo batolítico.

## **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 de amplia distribución en la zona. El espesor de este medio puede alcanzar 300 m en el centro del valle. El medio fracturado subyace el 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 las 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. Para la transmisividad los valores varían de  **$1.2 \times 10^{-3}$  a  $27.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , (104 a 2330  $\text{m}^2/\text{día}$ ), los valores más altos se asocian a los depósitos aluviales de mayor granulometría que constituyen el cauce del río Papigochic. Para la conductividad hidráulica del medio granular se considera un valor promedio de  **$5.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$**  (43 m/d).

Los valores de transmisividad utilizados en las celdas de entradas y salidas horizontales del acuífero, se definieron con base en las características litológicas, permeabilidad y espesor saturado observados en campo. En el caso de la zona de entrada se utilizó un valor de  $3.0 \times 10^{-3}$  (260 m<sup>2</sup>/d) y para la salida  $27.0 \times 10^{-3}$  (2330 m<sup>2</sup>/d).

### **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 35 a 50 m; los niveles más someros se registran en la porción norte del acuífero, hacia la localidad Nuevo Madera; los valores de mayor profundidad se presentan cerca de los poblados Madera, Colonia Nahuarechi, Boquilla Golondrinas y Ejido Tres Ojitos (figura 3).

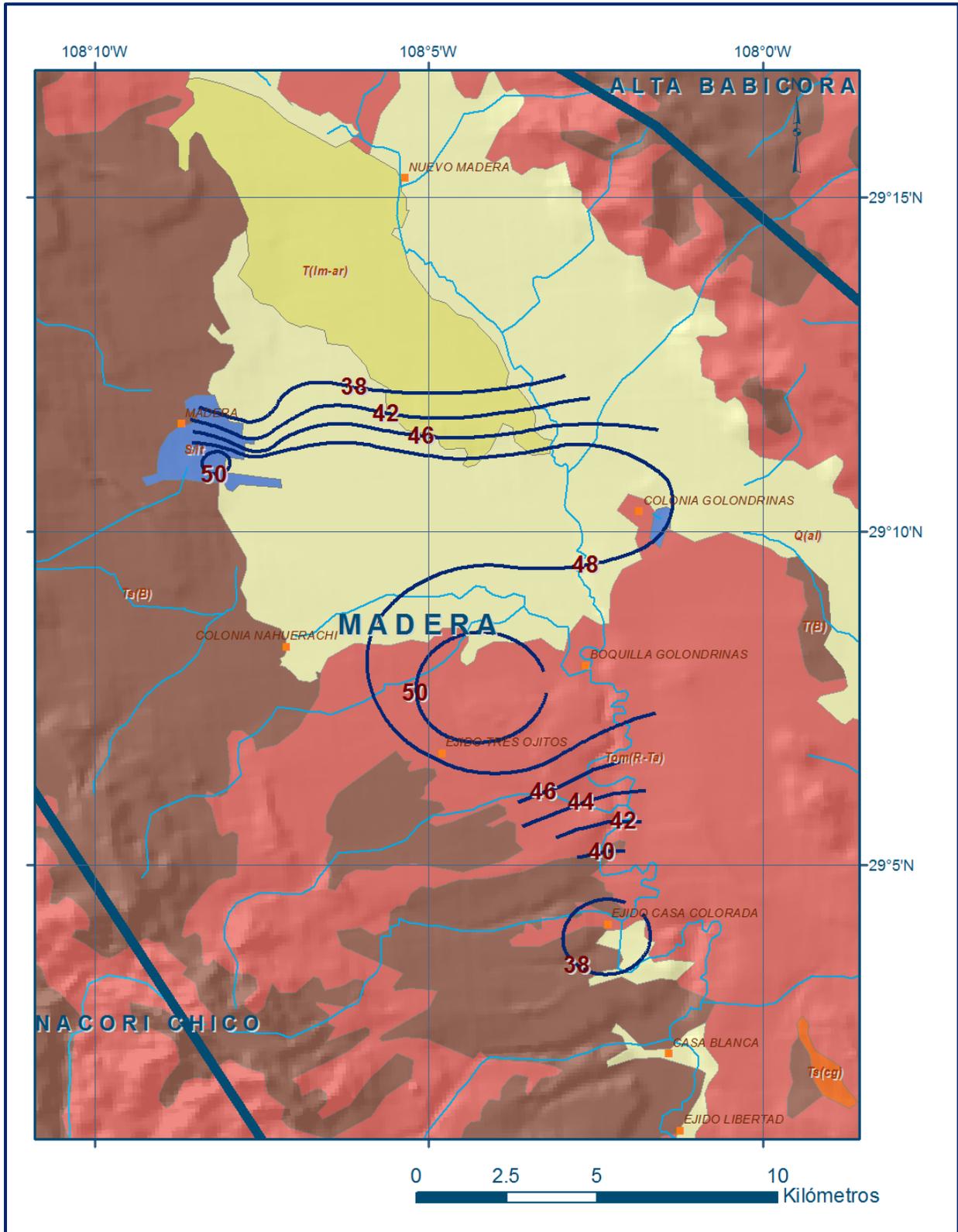


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2011)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para 2011 presenta valores que varían de 2065 a 2015 msnm, decreciendo por efecto de la topografía desde el norte del valle hacia el sur, a lo largo del escurrimiento del río Papigochic; mostrando una dirección preferencial del flujo subterráneo de norte a sur (figura 4). Los valores máximos de elevación se localizan entre las localidades Nuevo Madera y Madera, desde donde descienden en dirección sur-sureste hacia los poblados Ejido Casa Colorada y Casa Blanca.

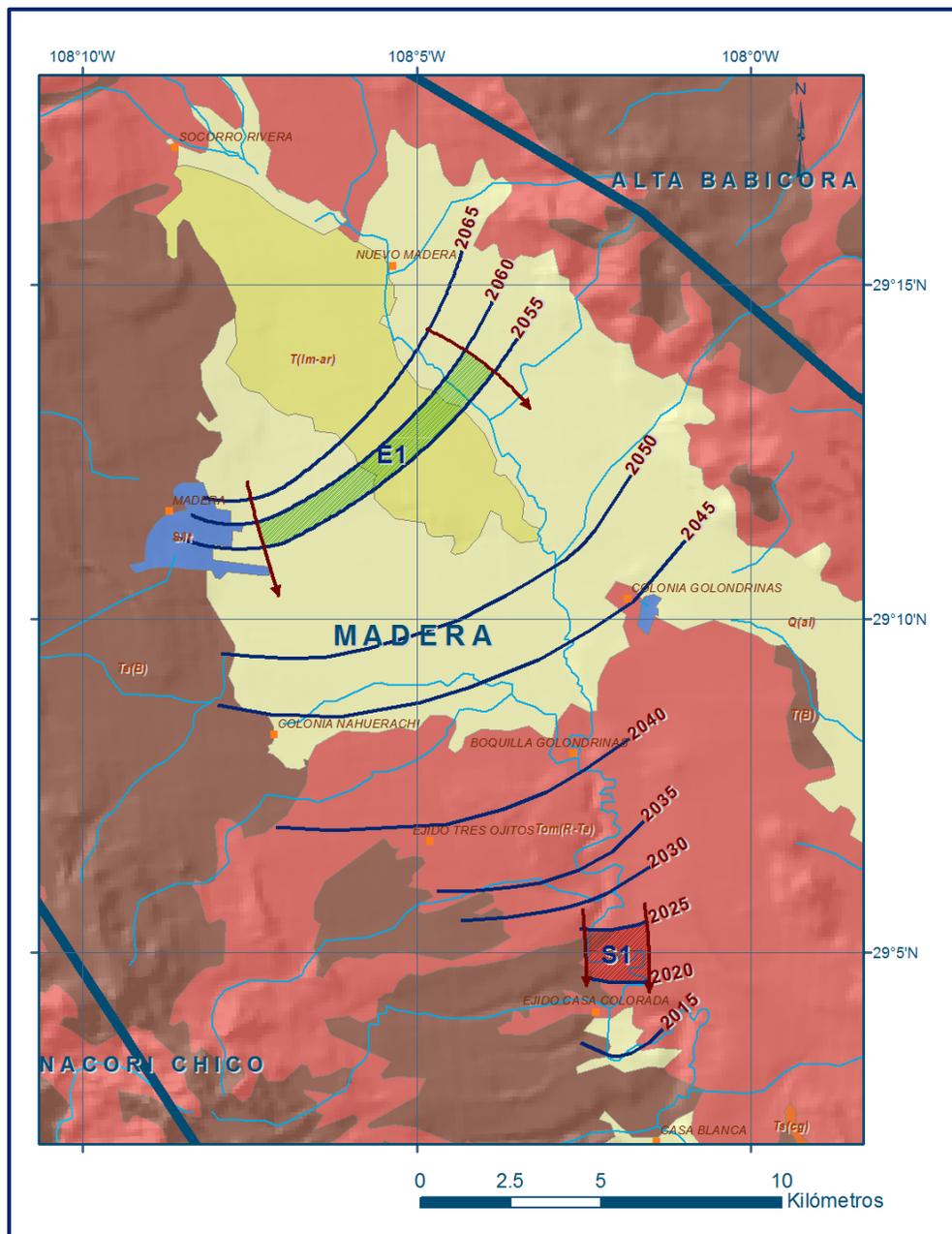


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar su 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 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 la extracción. El volumen de extracción calculado es de  $1.3 \text{ hm}^3$  anuales, valor que es muy inferior a la recarga más conservadora que pueda estimarse.

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.

### 5.4.4 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. 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 no fue posible obtener información del uso y régimen de extracción de los escasos aprovechamientos para poder estimar el volumen de extracción. Por esta razón, se optó por considerar la información de los aprovechamientos registrados en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) en 2011.

De acuerdo con ella existen sólo 9 aprovechamientos que extraen un total de  **$1.3 \text{ hm}^3$  anuales**, de los cuales,  $0.9 \text{ hm}^3$  (69.2%) se destinan al uso agrícola y  $0.4 \text{ hm}^3$  (30.8%) para uso público-urbano.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRRÁNEAS**

El balance de aguas subterráneas se definió para el 2011 en una superficie aproximada de **160 km<sup>2</sup>**, 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:

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

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 del acuífero:

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

### **7.1. Entradas**

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, 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 del río Papigochic y de los arroyos (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). Debido a que el volumen destinado a los usos agrícola y público-urbano son muy pequeños, no se considera la 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:

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

Donde:

**Rv:** Recarga vertical

**Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal

**B:** Bombeo

**Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal

**$\Delta V(S)$ :** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

### 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 acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, 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.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para 2011 (figura 4), mediante la siguiente expresión:

$$Q = B * i * T$$

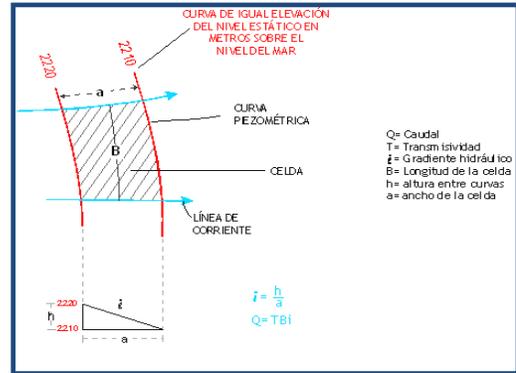
Donde:

**Q** = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

**B**= Largo del canal de flujo (m);

**i**= Gradiente hidráulico (adimensional);

**T**= Transmisividad (m<sup>2</sup>/s);



El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2011 se presenta en la tabla 2, en la que en la se observa que su valor total es de **4.0 hm<sup>3</sup> anuales**

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

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> (m)	Gradiente i	T (m <sup>2</sup> /s)	CAUDAL Q (m <sup>3</sup> /s)	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> /año)
E1	7410	871	5	0.005741	0.003	0.1276	4.0
<b>Total</b>							<b>4.0</b>

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

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

### 7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción por bombeo es de **1.3 hm<sup>3</sup>/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 elevación del nivel estático presentada en la figura 4. Su valor es de **5.3 hm<sup>3</sup> anuales**, tal 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	1800	1450	5	0.00345	0.027	0.1676	5.3
<b>Total salida</b>							<b>5.3</b>

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

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita elaborar su configuración. 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 del bombeo y el volumen de extracción es muy inferior a la recarga más conservadora que pueda calcularse.

Por estas razones, se puede afirmar que no existen variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea y que el cambio de almacenamiento es nulo. Por lo tanto,  $\Delta V(S) = 0$

### 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 ( $R_v$ ). Despejando este término de la ecuación (2) definida previamente:

$$R_v = Sh + B \pm \Delta V(S) - Eh$$

$$R_v = 5.3 + 1.3 \pm 0.0 - 4.0$$

$$R_v = 2.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a  $R_t = R_v + Eh$

$$R = 2.6 + 4.0$$

$$R = 6.6 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

## 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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso su valor es **6.6 hm<sup>3</sup>/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 Madera 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 (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **2,353,217 m<sup>3</sup> 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 6.6 - 0.0 - 2.353217 \\ \text{DMA} &= 4.246783 \text{ m}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **4,246,783 m<sup>3</sup> anuales**.