



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

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO TACÁMBARO-TURICATO (1611), ESTADO  
DE MICHOACÁN**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
	<b>Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2</b>	<b>FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Provincia fisiográfica.....	5
2.2	Clima.....	6
2.3	Hidrografía.....	7
2.4	Geomorfología.....	7
<b>3</b>	<b>GEOLOGÍA.....</b>	<b>8</b>
3.1	Estratigrafía.....	8
3.2	Geología estructural.....	11
3.3	Geología del subsuelo.....	13
<b>4</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
4.1	Tipo de acuífero.....	13
<b>5</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>14</b>
5.1	Entradas.....	14
5.1.1	Recarga vertical (Rv).....	15
5.2	Salidas.....	20
5.2.1	Bombeo (B).....	20
5.2.2	Descarga por flujo base (Dfb).....	20
5.2.3	Descarga a través de manantiales (Dm).....	21
<b>6</b>	<b>DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>21</b>
6.1	Recarga total media anual (R).....	21
6.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	21
6.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	22
6.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	22
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>23</b>

## **1 GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

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

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

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

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

### **1.1 Localización**

El acuífero Tacámbaro-Turicato, definido con la clave 1611 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción sureste del estado de Michoacán, entre las coordenadas geográficas 18° 30' y 19° 34' de latitud norte y 100° 40' y 101° 52 'y abarca una superficie de 5456.03 km<sup>2</sup>.

Limita al norte con los acuíferos Lagunillas Pátzcuaro y Morelia-Queréndaro, al este con Huetamo, al oeste con Nueva Italia y La Huacana, al suroeste con el acuífero Churumuco, pertenecientes al estado de Michoacán; al sur con el acuífero Coahuayutla, perteneciente al estado de Guerrero (figura 1).

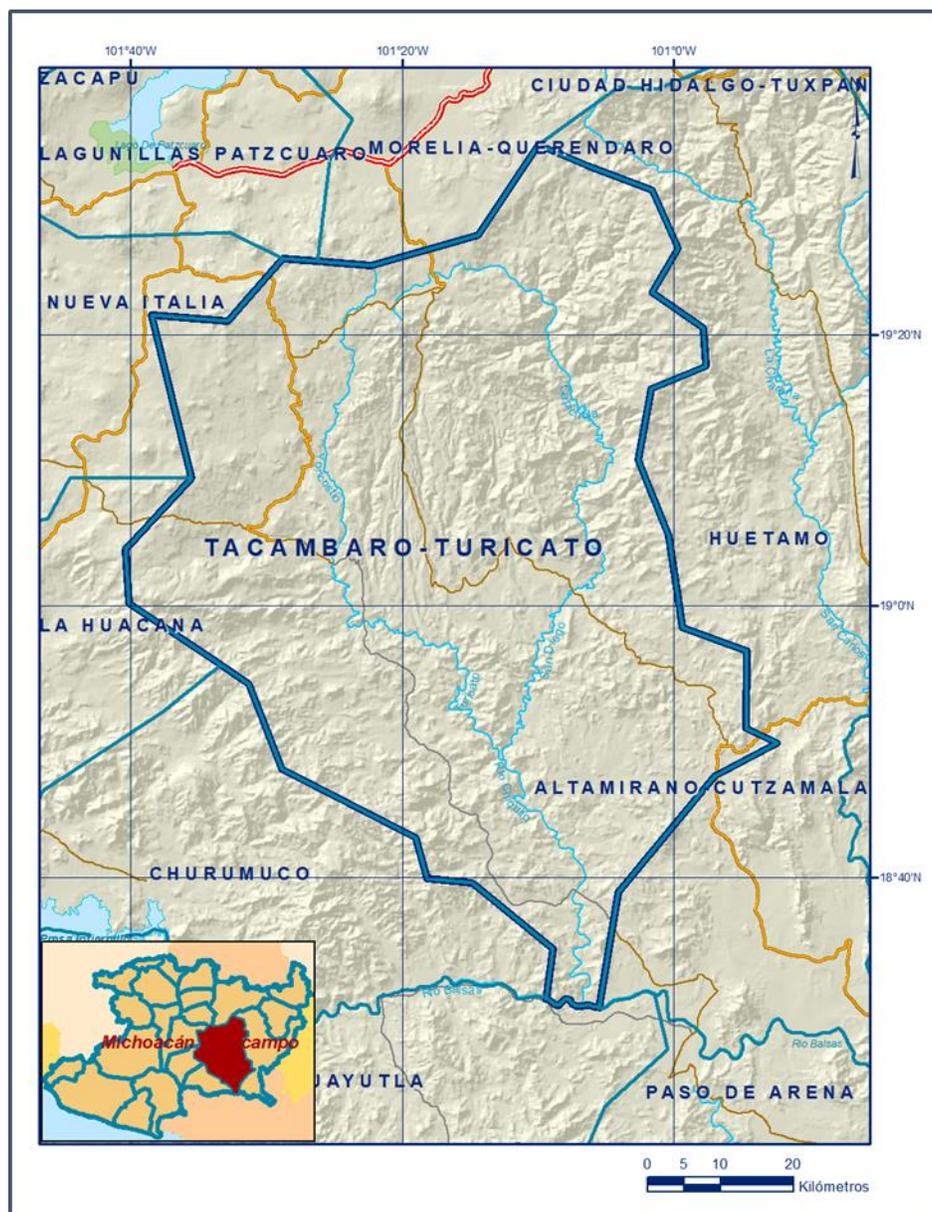


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1611 TACAMBARO-TURICATO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	8	53.0	18	34	42.5	
2	101	14	50.8	18	39	34.7	
3	101	18	13.0	18	39	54.7	
4	101	19	11	18	42	56.8	
5	101	28	54.1	18	47	58.5	
6	101	31	17.4	18	54	15.2	
7	101	33	21.4	18	55	40.5	
8	101	40	7.8	19	0	13.8	
9	101	40	23.7	19	4	10.2	
10	101	35	33.3	19	9	24.6	
11	101	38	30.1	19	21	28.9	
12	101	32	49.3	19	20	59.5	
13	101	28	48.4	19	25	37.4	
14	101	26	15.4	19	25	25.4	
15	101	22	17.2	19	25	6.7	
16	101	14	25.0	19	27	19.5	
17	101	9	59.9	19	34	0.9	
18	101	6	13.6	19	32	23.2	
19	101	1	35.2	19	30	42.3	
20	100	59	41.3	19	26	23.4	
21	101	1	38.5	19	23	6.4	
22	100	57	50.7	19	20	31.3	
23	100	57	38.6	19	17	41.9	
24	101	1	42.0	19	16	2.4	
25	101	2	36.8	19	10	46.7	
26	101	0	22.0	19	5	13.6	
27	100	59	20.3	18	58	25.1	
28	100	54	37.1	18	56	40.8	
29	100	54	40.8	18	51	0.7	
30	100	52	21.7	18	49	55.4	
31	100	57	0.1	18	47	28.8	
32	101	4	6.7	18	38	52.8	
33	101	5	31.7	18	30	23.4	DEL 33 AL 34 POR EL LIMITE ESTATAL
34	101	9	23.4	18	31	2.2	
1	101	8	53.0	18	34	42.5	

## 1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tacámbaro-Turicato pertenece al Organismo de Cuenca IV Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Michoacán. Así también el acuífero forma parte de los Consejo de Cuenca Río Balsas y Lerma Chapala, instalados el 26 de marzo de 1999 y el 28 de enero de 1993, respectivamente

Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. La mayor parte de su porción norte está regida por el "Decreto por

el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona del Bajo Balsas”, estableciéndose veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 27 de junio de 1975 y una pequeña porción en el noreste es regida por el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende los Municipios de Morelia y Charo, Mich.”, publicado en el DOF el 10 de febrero de 1964.

La primera veda se clasifica como tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos, mientras que la segunda es de tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos 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.

## **2 FISIOGRAFÍA**

### **2.1 Provincia fisiográfica**

El acuífero se encuentra en la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico Transmexicano y la Sierra Madre del Sur, concretamente en la transición entre estas dos provincias fisiográficas, denominando a este valle como la Depresión del Balsas.

El Eje Neovolcánico está representado por grandes expresiones de vulcanismo explosivo, originado durante eventos relativamente recientes; alcanza desarrollo significativo de sistemas de fallas asociados con manifestaciones volcánicas y grabens o fosas. El vulcanismo de la región se generó a lo largo de lineamientos de fallas formando las sierras circundantes y creando paisajes de morfologías combinadas y notable singularidad.

La Sierra Madre del Sur se originó por el choque de las placas tectónicas Cocos y Norteamericana, y está caracterizada por ser un sistema montañoso complejo disectado por corrientes fluviales que en su trayectoria labran valles y llanuras con cañadas, cuyas alturas varían de 150 msnm (presa Infiernillo y la ribera del Río Balsas), hasta casi 2,000 msnm. Se localiza al sur de México y se extiende a lo largo de 1,200 km, desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, con una dirección preferencial de noroeste a sureste; en ella nacen varias corrientes que desembocan en el Océano Pacífico y en su vertiente interior se localizan las cuencas

de los ríos Balsas, Verde y Tehuantepec. Es la provincia de mayor complejidad geológica, en ella se encuentran rocas ígneas, sedimentarias y en mayor abundancia rocas metamórficas. Su representación dentro del acuífero se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte norte, en donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes los 3,000 msnm.

La subprovincia Cordillera Costera del Sur, constituye la franja central de la provincia y se caracteriza por estar constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Está orientada de manera paralela a la línea de costa por más de 650 km, abarca parte del estado de Michoacán, cruzando todo el estado de Guerrero y parte del estado de Oaxaca. Se encuentra limitada al norte por la Escarpa Limítrofe del Sur, al este por la Depresión del Balsas, al oeste por la Depresión del Tepalcatepec y al sur por los lomeríos de la Costas del Sur.

La subprovincia Depresión tiene como límites al norte la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico, al sur está bordeada por la subprovincia Cordillera Costera del Sur, al oeste las subprovincias Neovolcánica Tarasca, Escarpa Limítrofe del Sur y la Cordillera Costera del Sur, y al este la Subprovincia Sierra y Valles Guerrerenses (INEGI, 1991). Está conformada por “profundos y sinuosos valles a lo largo de los cuales los ríos Balsas y Tepalcatepec han ido labrando las sierras en algunas partes de 3,000 m de altura, dándole a esta cuenca una topografía muy abrupta” (Raisz, 1964). En general en las regiones topográficamente más altas está conformada por calizas y conglomerados que muestran un aspecto redondeado, con drenaje ampliamente espaciado; mientras que, por otro lado, los valles, laderas y partes bajas están constituidas por lutitas, areniscas, limolitas y rocas ígneas que conforman lomeríos con pendientes muy suaves y con un drenaje bien desarrollado.

## **2.2 Clima**

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por E. García, para las condiciones de la República Mexicana, en el área cubierta por el acuífero predominan cuatro tipos de climas, en la parte norte el templado subhúmedo C(w2)(w) a (A)C(w2)(w) con un rango de temperatura de los 14° a los 22°C, en el centro el cálido subhúmedo Aw1(w) con una temperatura promedio de 24°C y semiseco muy cálido BS1(h')w(w) con temperaturas entre 26 y 28°C, y en la parte sur seco muy cálido BS0(h')w(w) con una temperatura promedio de 29°C.

Para la determinación de las condiciones climatológicas, se utilizaron los datos de 9 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero Los Pinzanes, San Pedro, Tacámbaro, Tzitzio, Turicato. Villa Jiménez y San Miguel del Monte en Michoacán, y Zirándaro en Guerrero. Con un periodo de registro que comprende 1981-2018 y utilizando el método de polígonos de Thiessen, se determinó que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación potencial son **23.7 °C y 936.0 mm**, respectivamente.

El régimen de lluvias ocurre durante los meses de mayo a octubre, concentrándose principalmente entre junio y septiembre. La máxima precipitación se registra en el mes de julio. La época de estiaje se presenta entre noviembre y abril.

### **2.3 Hidrografía**

El acuífero se ubica en la Región Hidrológica 18 Balsas; casi en su totalidad dentro de la cuenca Río Tacámbaro y solo un área de 17 km<sup>2</sup> está comprendida en la cuenca cerrada del Lago de Cuitzeo, perteneciente a la Región Hidrológica 12 Lerma Santiago.

El patrón de drenaje que predomina es de tipo dendrítico y en la parte central es de tipo subparalelo, controlado principalmente por las estructuras, la litología y morfología de las unidades en las que se emplazado.

La corriente principal se origina en las estribaciones del eje Neovolcánico, a partir de las corrientes perennes que descienden desde una altitud de 3,000 msnm de los cerros Turicato, Taretio y el Perdido.

Los principales arroyos que conforman la región son Tacámbaro, Quenchendio y Carácuaro, todos ellos afluentes del río Tacámbaro. En cota más baja de la cuenca Tacámbaro, existe la estación hidrométrica los Pinzanes, la cual registra las descargas de agua subterránea que drenan hacia el río Balsas.

### **2.4 Geomorfología**

El acuífero se encuentra geomorfológicamente en una etapa de juventud, la actividad volcánica y cañones pronunciados así lo manifiestan, está integrado por pequeños valles intermontanos formado por volcanes de basaltos, así como el basamento del valle y cubierto por sedimentos aluviales, tales como boleos, arenas, arcilla y cenizas estratificadas, producto de antiguos cauces de ríos. Dentro de los puntos más

sobresalientes están los cerros El Pozole, El Malacate, Blanco, El Pinabete, La Campana, con elevaciones superiores a los 2,000 msnm, algunos forman serranías cuyas alturas disminuyen hacia el sur. Se presentan varios conos cineríticos en todo el acuífero.

### **3 GEOLOGÍA**

El acuífero Tacámbaro-Turicato se encuentra incluido en el terreno tectonoestratigráfico Guerrero, definido por Campa y Coney (1981, 1983) y Sedlock *et al.* (1993), que se ha ido subdividiendo en arcos, denominados Zihuatanejo-Huetamo, definido como un arco volcánico de afinidad shoshonítica (Talavera, 1993), el arco Zihuatanejo, posible basamento y ligado a éste se encuentra la cuenca de Huetamo, interpretada como una cuenca en subsidencia a la orilla de un arco volcánico, debido a que el aporte principal de sedimentos son detritos de rocas volcánicas.

Por otra parte, Centeno *et al.* (1993) plantean la existencia de dos elementos tectonoestratigráficos que son: un basamento metamórfico de afinidad oceánica, de edad Jurásico inferior-medio, que correspondería al Complejo Artega, cubierto por el arco Zihuatanejo de edad Albiano.

El basamento del terreno Guerrero, es el Complejo Carácuaru, y se encuentra afectado por intrusivos de composición granito-granodiorita de edad Cretácico superior y está cubierto por la unidad volcánica-detrítica denominada arco Amengarícuaru de edad Cretácico inferior, con sus depósitos de destrucción del arco como son los sedimentos Comburindio y Conglomerado Acuyo.

La distribución general de las distintas unidades litológicas se muestra en la figura 2.

#### **3.1 Estratigrafía**

En el acuífero se encuentran registrados cuatro ambientes litológicos distintos. El más antiguo corresponde a una secuencia metamórfica de edad Jurásico, denominado complejo metamórfico Carácuaru; le subyace en discordancia la secuencia vulcanosedimentaria de edad Cretácica, relacionada con la evaluación de un arco de islas denominado para esta región, arco Zihuatanejo-Amengarícuaru, constituido por vulcanismo andesítico basáltico y conglomerado polimíctico. Su cobertura está representada por dos eventos volcánicos distintos, el primero constituido por andesita y flujos de riolita de edad Oligoceno-Mioceno, correspondientes al magmatismo de la Sierra Madre del Sur, el segundo y más reciente por vulcanismo andesítico-basáltico

de edad Pliocuaternaria, relacionado con el magmatismo del Eje Neovolcánico Transmexicano.

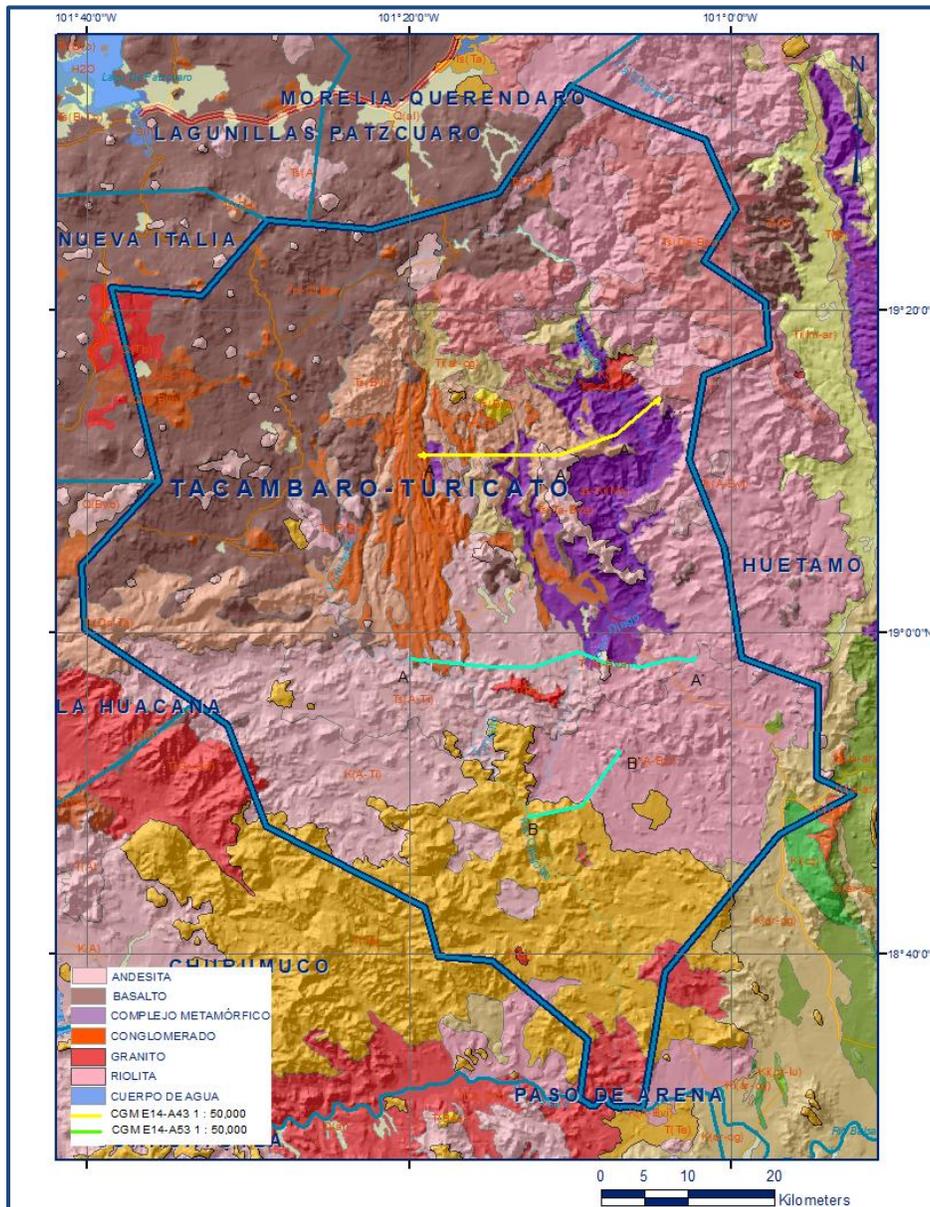


Figura 2. Geología general del acuífero

### Complejo metamórfico Carácuaro

Es una secuencia de roca metasedimentaria que aflora en los alrededores del poblado de Carácuaro, lo conforman principalmente pizarra, filita, esquisto y Meta-arenisca. El conjunto litológico que lo constituye, indica un ambiente de mar profundo, interpretación que es coherente con los trabajos realizados por Centeno y colegas

(1993), en donde demuestran que las unidades metamórficas pre-cretácicas del subterreno Huetamo-Zihuatanejo tienen una afinidad oceánica.

### **Magmatismo Jurásico, intrusivo La Noria**

Es un cuerpo de composición diorítica a granítica que aflora al sur del acuífero. La diorita únicamente presenta relación de intrusión con el Complejo Metamórfico Carácuaro, al sureste del poblado del mismo nombre. Se desconoce el ambiente tectónico en que se originó la Diorita La Noria, ya que faltan estudios que profundicen en sus características geoquímicas y petrotectónicas, sin embargo, parece estar ligada al Complejo Arteaga y a la evolución del subterreno Huetamo-Zihuatanejo (Sabanero et al., op. cit).

### **Terreno Guerrero, Arco Amengarícuaro**

Potente paquete de conglomerado polimíctico, con varios horizontes de limolita calcárea, arenisca, caliza de intermarea, pedernal blanco, depositadas en un ambiente de arco magmático volcánico. Su litología está constituida por conglomerado polimíctico, arenisca, limolita y lutita.

### **Magmatismo Sierra Madre del Sur**

Se define como Volcánicos Paránguaro a una sucesión potente de brechas y derrames de composición andesítica-dacítica, que afloran extensamente al sur del acuífero. Su litología consiste principalmente de andesita, brecha andesítica, dacita e intercalaciones de toba andesítica. Esta unidad estratigráfica es parte del arco continental que inicia en el Cenozoico inferior, la cual es consecuencia de la convergencia de placas a lo largo de la margen pacífica de Norteamérica.

### **Eje Neovolcánico Transmexicano**

Su ambiente está relacionado con la evolución de un arco volcánico continental. Su origen posiblemente está relacionado con la tectónica convergente activa, entre las placas de Cocos y de Norte América. Sin embargo, puede estar relacionado a una tectónica transtensiva compleja, la cual a profundidad provocó condiciones propicias para la generación de puntos calientes que se dispararon al ascender y formar el Eje Neovolcánico.

Y por último los depósitos cuaternarios, los aluviones son el producto de la desintegración de las rocas preexistentes y se depositan en las partes bajas y en los cauces de ríos y arroyos.

### **3.2 Geología estructural**

En el acuífero se observan estructuras de deformación dúctil que afectan al Complejo Carácuaro, así como plegamientos de las rocas cretácicas y deformación frágil representadas por estructuras de transtensión que rompen a todas las unidades litoestratigráficas.

La expresión de la deformación dúctil en el “Complejo Carácuaro” está dada por el desarrollo de anisotropía planar penetrativa correspondiente a una sola fase de deformación progresiva. Esta deformación se desarrolló en condiciones de baja temperatura y baja presión, como lo demuestra la presencia de minerales de la facies metamórfica de esquistos verdes. La deformación dúctil se presenta con desarrollo de dos superficies de anisotropía, plegada y aparente desarrollo de clivaje de crenulación; se observan zonas de cizalla con desarrollo de budines de hasta 1 m de elongación y pliegues curvilineales rotos. En general se presentan afloramientos con una deformación penetrativa bien definida y otros separados por zonas de cizalla con poco desarrollo de deformación dúctil. Por otra parte, la lineación mineral está poco desarrollada en los afloramientos, en su lugar hay predominio de estructuras planares y como estructuras de estiramiento se observan las estructuras sigmoides de todos los tamaños. A nivel regional se observa una estructura antiformal simétrica con un eje orientado sensiblemente noroeste-sureste, en la porción central del acuífero. El flanco oriental, deducido a partir de la superficie envolvente de los micropliegues, tiene una inclinación de 25° a 30° hacia el noreste. El flanco poniente, deducido de igual forma, se observa buzando indistintamente al noroeste como al sureste con inclinaciones de 20° a 30°. El núcleo de esta estructura es afectado por la intrusión granítica granodiorítica que aflora en forma alargada paralela al eje de la antiforma, extendiéndose hacia el este del acuífero.

Las estructuras representativas de deformación frágil están representadas por fallas normales y laterales. Las fallas normales conforman un sistema de dos direcciones que son NE-SW y NW-SE.

Entre las fallas normales de rumbo NW-SE, se encuentran:

La falla Nocupétaro, se sitúa al sur del área, al noroeste de Nocupétaro, muestra un rumbo general N 16-30-33° W y echado 55-76-77° al SW. Tiene una longitud aproximada de 16.7 km. Afecta al Complejo Metamórfico Carácuaro, al conglomerado polimíctico-arenisca de la unidad Acuyo y a la brecha volcánica andesítica-andesita de la unidad Volcánica Paránguaro.

La falla Las Anonas, se presenta al este de Carácuaro, tiene un rumbo N 83°-85° W y echado 70°-85° al SW y pitch 50°, se determinó una longitud de 5.2 km. Afecta al Complejo Metamórfico Carácuaro y a la unidad volcánica Paránguaro.

Entre las fallas normales de rumbo NE-SW, se encuentran:

La falla La Sierrita, se encuentra al norte del área, al noreste del poblado de Guadalupe; mostrando un rumbo de N 82°-85° E y echado 69-75° al NW y una longitud de 11 km. Afecta a la brecha volcánica andesítica-andesita de la unidad volcánica Paránguaro y en el extremo suroriental al intrusivo de granito granodiorita.

La falla El Salitre, se localiza al noroeste del poblado de Fronteras; mostrando un rumbo N 50° E y echado 65° al SE y una longitud de 3.8 km, afecta al intrusivo granito-granodiorita.

La falla Pinzan Dulce, se encuentra en la porción central del acuífero, al noreste de Nocupétaro; presenta un rumbo general de N 55-60° E y echado 70-80° al SE con pitch de 68° al SE y una longitud de 10 km. Afecta en el extremo nororiental al Complejo Metamórfico Carácuaro y el conglomerado polimíctico-arenisca Acuyo, en el extremo suroccidental afecta a la unidad granito granodiorita y a la unidad volcánica Paránguaro. Y la falla El Recodo, se ubica al noreste de Nocupétaro; muestran un rumbo de N 45° E y echado 80° al NW y una longitud de 3.7 km. Afecta al intrusivo granito granodiorita.

Entre las fallas laterales de rumbo NW-SE, se encuentran:

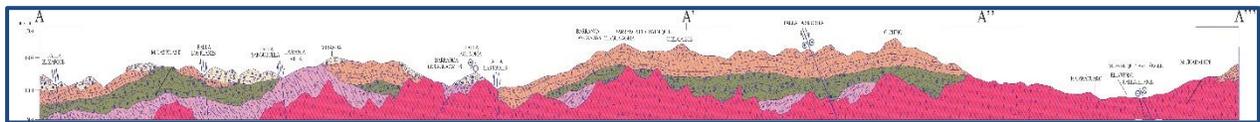
La falla Peña El Grito, se encuentra al noroeste del poblado Guadalupe; interpretada como falla lateral sinistral, con dirección general N 30° W, en una extensión de 3.4 km. Afecta al conglomerado polimíctico de la unidad La Angostura y en el extremo suroeste afecta al Complejo Metamórfico Carácuaro. Y la falla El Añil que se localiza al

norte del poblado de Fronteras; es una falla lateral dextral, mostrando una dirección N 70° W, un echado de 72° al NE y pitch de 20° al NE y una longitud de 10.5 km. Afecta en su mayor extensión a la unidad volcánica Paránguaro, en el extremo noroccidental a la unidad de granito granodiorita y desplaza a la falla lateral denominada El Real. Asociada a la falla El Añil se tiene la falla Loma Alta, interpretada como falla lateral sinistral, de rumbo N 75° W, con longitud de 2.7 km, que afecta a la unidad volcánica Paránguaro.

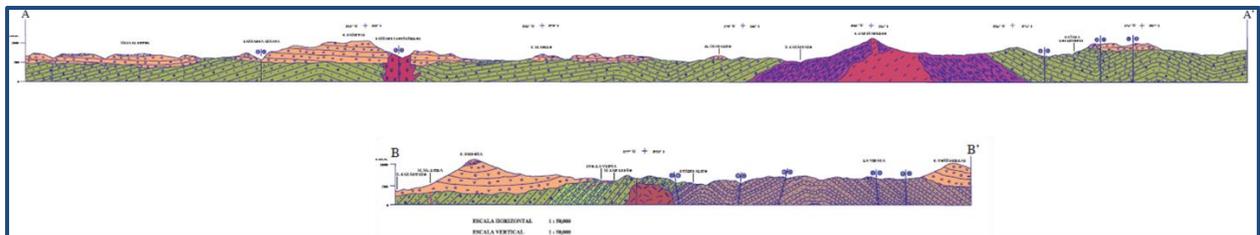
### 3.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la geología superficial y por correlación con los acuíferos circundantes, se determina que el acuífero está constituido, en su porción superior, por sedimentos fluviales y conglomerados, mientras que la porción inferior está conformada por rocas ígneas de composición riolítica (figura 3). Esta unidad constituye el acuífero regional que tiene mayor potencial hidrogeológico.

El intrusivo granítico de la región se considera de porosidad y permeabilidad nula que funciona como barrera impermeable al flujo subterráneo, superficialmente presenta recarga al valle por medio de las fallas que muestra.



Fuente: Carta Geológico-Minera E14-A43 "Carácuaro". Esc. 1:50,000 (SGM,2008)



Fuente: Carta Geológico-Minera E14-A53 "Acuyo". Esc. 1:50,000 (SGM, 2008)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

## 4 HIDROGEOLOGÍA

### 4.1 Tipo de acuífero

Las rocas volcánicas aflorantes se consideran de baja permeabilidad, presentan fracturamiento por donde pudiera infiltrarse el agua y propiciar la recarga a los valles dispersos en el acuífero.

Las evidencias geológicas permiten establecer la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo, constituido, en su porción superior, por un medio granular poroso conformado por los depósitos aluviales, fluviales y conglomerados de granulometría diversa, no consolidados y semi-consolidados, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en la zona, estos materiales presentan permeabilidad media a baja y se ubican en los cauces de los ríos y arroyos, como lo confirman los escasos aprovechamientos, en su mayoría norias, ubicados en los subálveos y en las zonas encañonadas en donde existe material permeable. El flujo subterráneo está definido por el río Balsas.

## **5 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Debido a la poca información piezométrica actual e histórica en la superficie que cubre el acuífero y a que se encuentra dispersa en espacio y tiempo; hace imposible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas tradicional. Por lo tanto, se optó por plantear un balance hidrometeorológico en el área de balance de **5,455.4 km<sup>2</sup>** del acuífero, para estimar de manera conservadora el volumen de agua susceptible de infiltrarse para recargar al acuífero.

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:

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

### **5.1 Entradas**

Las entradas al acuífero Tacámbaro-Turicato están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la lluvia ( $R_v$ ).

### 5.1.1 Recarga vertical (Rv)

La recarga vertical total que recibe el acuífero (volumen susceptible de infiltrarse) se obtuvo mediante el planteamiento de un balance hidrometeorológico para toda la superficie del acuífero, mediante la siguiente expresión:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF} \quad (1)$$

Donde:

$V_{LL}$  = Volumen de lluvia;

$V_{ETR}$  = Volumen evapotranspirado;

$V_{ESC}$  = Volumen escurrido;

$V_{INF}$  = Volumen infiltrado;

Por lo tanto, despejando el volumen infiltrado, se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \quad (2)$$

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (5,455.4 km<sup>2</sup>) por la lámina de precipitación media anual (936.0 mm):

$$V_{LL} = 5,455.4 \text{ km}^2 (0.9360 \text{ m}) = 5,106.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando el valor medio anual de precipitación de 936.0 mm y temperatura 23.7 °C. Coutagne propuso la ecuación siguiente para calcular la evapotranspiración real:

<b>COUTAGNE</b>	$ETR = P - \chi P^2$
Donde:	
ETR= Evapotranspiración m/año	
P = precipitación en m/año	
$\chi = 1/(0.8 + 0.14 t)$	
t = temperatura en °C	

La fórmula sólo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre 1/8X y 1/2X, en la que ETR y P se expresa en metros, y T en °C. Si P es menor que 1/8λ la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento;

si la precipitación es mayor que  $1/2\lambda$  la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por  $ETR = 0.20 + 0.035 T$ . Aplicando la ecuación de Coutagne se obtiene una lámina de evapotranspiración real de **723 mm anuales**. Por lo tanto el volumen de ETR es:

$$V_{ETR} = 5,455.4 \text{ km}^2 (0.723 \text{ m}) = 3,944.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se utilizó el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 27 de marzo de 2015, en la que se señala que para los casos en los que no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento. El volumen anual medio de escurrimiento natural es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

Para determinar el valor de escurrimiento, la normatividad establece la siguiente relación:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{VOLUMEN ANUAL DE} & & & & & & \\ \text{ESCURRIMIENTO} & & & & & & \\ \text{NATURAL DE LA} & = & \text{PRECIPITACION} & * & \text{AREA DE LA} & * & \text{COEFICIENTE DE} \\ \text{CUENCA} & & \text{ANUAL DE LA} & & \text{CUENCA} & & \text{ESCURRIMIENTO} \\ & & \text{CUENCA} & & & & \end{array}$$

El coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Con apoyo de cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, de acuerdo con los tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 2 y se determina el uso actual del suelo (figura 5).

Tabla 2. Valores de k en función del tipo y uso del suelo

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO A	TIPO DE SUELO B	TIPO DE SUELO C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.3
Cultivos:			
En hilera:	0.24	0.27	0.3
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.3
Granos pequeños	0.24	0.27	0.3
Pasizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% -poco-	0.14	0.2	0.28
Del 50 al 75% -regular-	0.2	0.24	0.3
Menos del 50% -excesivo-	0.24	0.28	0.3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.3
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.3	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.3
TIPO DE SUELO	CARACTERISTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		

En el caso de que, en la cuenca en estudio, existan diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas para obtener el promedio ponderado.

Dependiendo del valor obtenido para K, el coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Si K resulta menor o igual que 0.15

$$C_e = K (P-250) / 2000$$

Si K es mayor que 0.15

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

Donde:

**P** = Precipitación anual;

**Ce** = Coeficiente de escurrimiento anual;

**K** = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo;

De acuerdo con cartografía de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), escala 1:1,000,000, en la zona que comprende el acuífero Tacámbaro-Turicato, predominan los siguientes tipos de suelo: Acrisol, Andosol, Cambisol, cuerpos de agua, Feozem, Litosol, Luvisol, Poblado, Ranker, Regosol y Vertisol que se clasifican en dos tipos de suelo: B y C (figura 4).

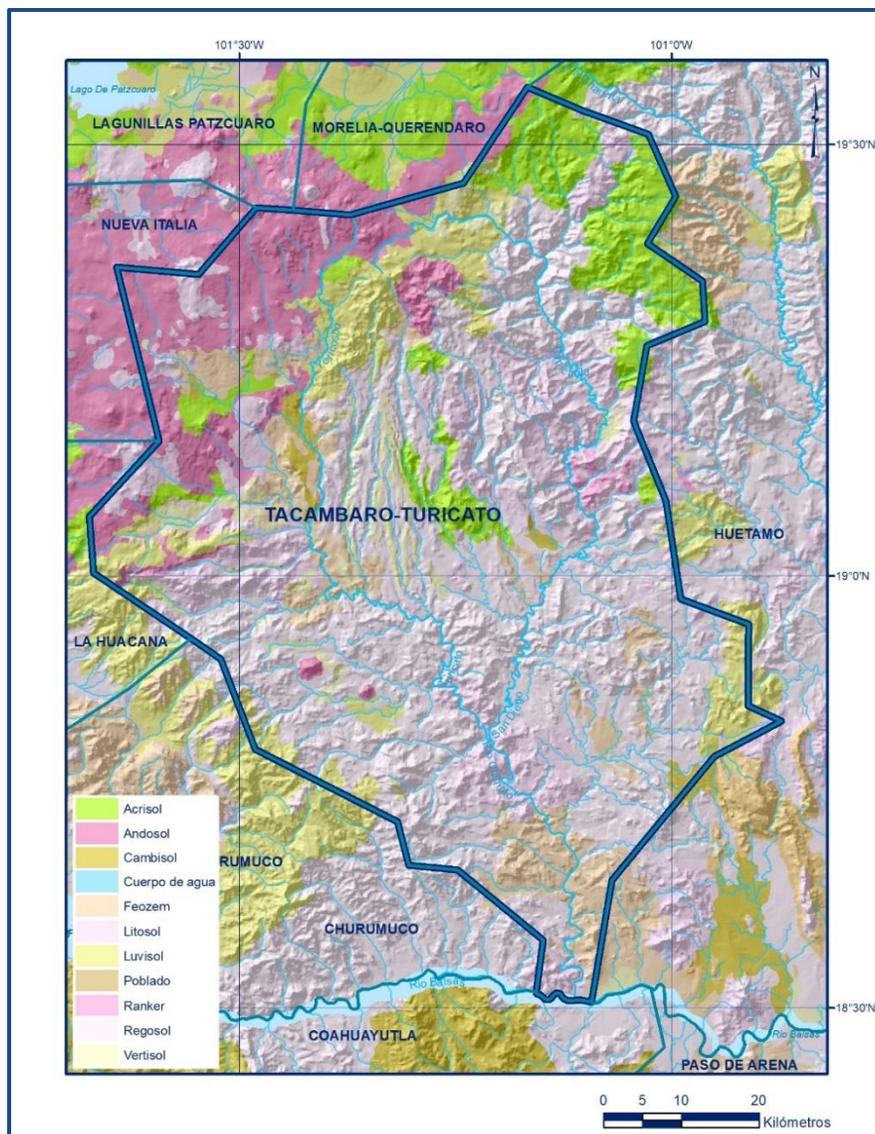


Figura 4. Tipo de suelo

En cuanto al uso de suelo, de acuerdo con la cartografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) escala 1: 250,000 en el área donde se localiza el acuífero hay al menos siete usos de suelo diferentes: agricultura, asentamientos humanos, bosque, cuerpos de agua, otros tipos, pastizal y selva (figura 5).

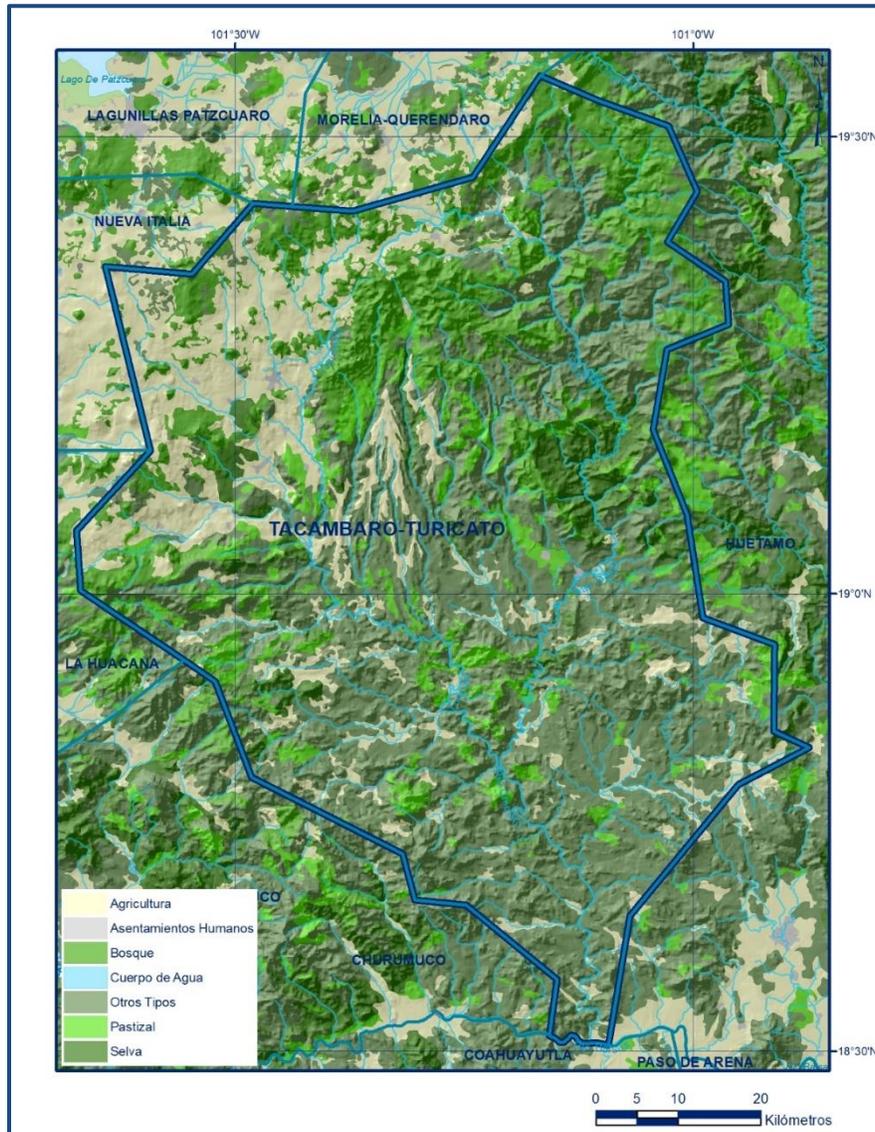


Figura 5. Uso de suelo

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.28, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ):

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

$$C_e = 0.183$$

Aplicando este coeficiente de escurrimiento al valor de la lluvia se obtiene el volumen del escurrimiento:

$$V_{ESC} = 0.183 (5,106.3 \text{ hm}^3) = 934.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se obtiene lo siguiente:

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC} \text{ (2)}$$

$$V_{INF} = 5,106.3 - 3,944.3 - 934.5$$

$$V_{INF} = 227.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es 5,106.3 hm<sup>3</sup>/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.0446. De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 227.5 hm<sup>3</sup>/año en los 5,445.4 km<sup>2</sup> de superficie del acuífero.

Por lo que la **Rv = 227.5 hm<sup>3</sup> anuales**

## 5.2 Salidas

Las salidas de agua subterránea estimadas en este balance son las siguientes:

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por flujo base drenado por el río Tacámbaro y por la descarga de los manantiales (Dm) existentes.

### 5.2.1 Bombeo (B)

De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **15.6 hm<sup>3</sup> anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022.

### 5.2.2 Descarga por flujo base (Dfb)

De acuerdo con la información registrada por la estación hidrométrica Los Pinzanes, ubicada en la cota más baja de la cuenca Río Tacámbaro, se estima que el flujo base drenado por el río es de **150.7 hm<sup>3</sup> anuales**, equivalente al caudal mínimo transitado en el mes más seco.

### 5.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con información de 2017, se identificó la existencia de 1,085 manantiales, que en conjunto descargan **33.6 hm<sup>3</sup> anuales**.

## 6 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:

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

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

### 6.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde a la suma de los volúmenes que ingresan al acuífero en forma de recarga vertical. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de **227.5 hm<sup>3</sup> anuales**.

### 6.2 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, su valor es de **184.3 hm<sup>3</sup> anuales**, que corresponde a la descarga por flujo base y de manantiales.

### **6.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)**

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **15,649,783 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos e Agua (REPGA) de la subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre del 2022**.

### **6.4 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 aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 227.5 - 184.3 - 15.649783 \\ \text{DMA} &= 27.550217 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **27,550,217 m<sup>3</sup> anuales** para otorgar nuevas concesiones.

## **7 BIBLIOGRAFÍA**

Servicio Geológico Mexicano, 2008. Carta Geológico-Minera E14-A43 "Carácuaro". Escala: 1:50 000.

Servicio Geológico Mexicano, 2008. Carta Geológico-Minera E14-A53 "Acuyo". Escala: 1:50 000.

Servicios de Ingeniería e Investigación del Medio Ambiente, S.C., 2007, Actualización de mediciones piezométricas en las unidades hidrogeológicas de: Tacámbaro-Turicato, La Huacana, Lázaro-Cárdenas y Playa Azul, en el estado de Michoacán.

FAO Base referencial mundial del recurso suelo, 2008.