

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO TEPECHICOTLÁN (1229), ESTADO DE GUERRERO

Contenido

1.	GENERALIDADES	2
Ante	cedentes	2
1.1	Localización	2
1.2	Situación administrativa del acuífero	3
2.	FISIOGRAFÍA	5
2.1	Provincia fisiográfica	5
2.2	Clima	5
2.3	Hidrografía	6
2.4	Geomorfología	6
3.	GEOLOGÍA	6
3.1	Estratigrafía	7
3.2	Geología estructural	10
3.3	Geología del subsuelo	10
4.	HIDROGEOLOGÍA	11
4.1	Tipo de acuífero	11
5.	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	12
5.1	Entradas	13
5.	1.1 Recarga vertical (Rv)	13
5.2	Salidas	19
5.	2.1 Bombeo (B)	19
5.	2.2 Descarga por flujo base (Dfb)	19
5.	2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)	19
6.	DISPONIBILIDAD	19
6.1	Recarga total media anual (R)	20
6.2	Descarga natural comprometida (DNC)	20
6.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	20
6.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	21
7.	RIRI IOGPAFÍA	22

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la "NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-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 Tepechicotlán, definido con la clave 1229 en la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción este del estado de Guerrero, entre las coordenadas geográficas 17° 36' y 17° 17' de latitud norte y 99° 04' y 99° 27' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 694.99 km².

Limita al norte con el acuífero Chilapa, al sur con Papagayo y al oeste con Papagayo (figura 1).

Geopolíticamente, comprende parte de la superficie de los municipios Chilpancingo de los Bravo, Tixtla de Guerrero, Chilapa de Álvarez, Mochitlán y Quechultenango.

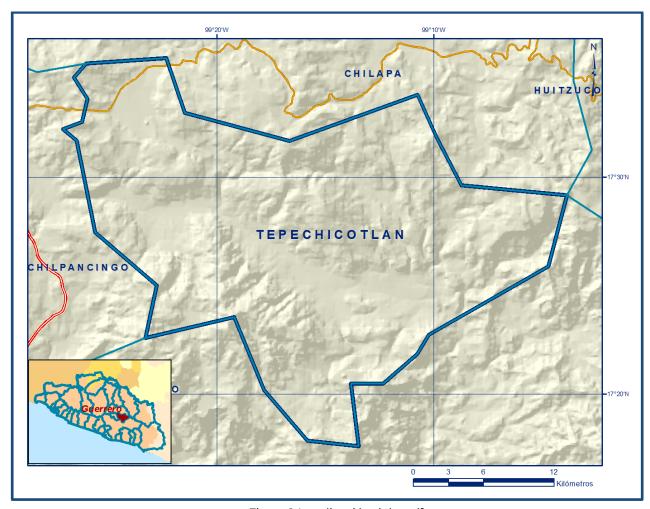


Figura 1. Localización del acuífero

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

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Tepechicotlán pertenece a la Región Hidrológica Administrativa V "Pacifico Sur" y al Consejo de Cuenca "Costa de Guerrero". El acuífero se encuentra parcialmente vedado. Una parte de su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del "Decreto que declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos de los Municipios de Acapulco, Coyuca de Benítez, Juan R. Escudero, San Marcos, Mochitlán y

Chilpancingo; Gro", publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 13 de febrero de 1975. Este decreto se clasifica como tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

VEDTICE		LONGITUD OESTI	Ē	LATITUD NORTE		
VERTICE	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	99	22	46.3	17	25	0.7
2	99	25	36.2	17	27	27.5
3	99	26	28.4	17	31	41.9
4	99	27	5.1	17	32	12.8
5	99	26	13.2	17	32	32.4
6	99	25	58.7	17	33	36.1
7	99	26	35.9	17	34	35.9
8	99	26	1.7	17	35	14.8
9	99	22	20.4	17	35	29.6
10	99	21	28.8	17	32	57.7
11	99	16	39.5	17	31	40.0
12	99	10	44.9	17	33	47.7
13	99	9	52.9	17	31	50.8
14	99	8	43.6	17	29	38.2
15	99	3	53.0	17	29	10.7
16	99	4	43.2	17	25	53.4
17	99	10	14.0	17	22	44.6
18	99	10	47.3	17	21	50.6
19	99	12	20.1	17	20	29.5
20	99	13	49.3	17	20	28.9
21	99	13	28.8	17	17	36.4
22	99	15	50.0	17	17	52.2
23	99	17	49.6	17	20	12.1
24	99	19	13.0	17	23	33.2
25	99	23	17.9	17	22	36.3
1	99	22	46.3	17	25	0.7

La porción no vedada del acuífero Tepechicotlán, clave 1229, se encuentra sujeto a las disposiciones del "ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican", publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del 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 lo establecido por 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.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 4. El principal uso del agua subterránea es el público - urbano. No se ha constituido hasta la fecha ningún Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. FISIOGRAFÍA

2.1 Provincia fisiográfica

El acuífero se encuentra dentro de la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre del Sur, abarcando parte de la subprovincia Cordillera Costera del Sur.

La provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur se extiende a lo largo de la costa del Pacífico con una dirección noroeste-sureste, su altitud en promedio es de poco más de dos mil metros, en ella se originan varias corrientes que desembocan en el Océano Pacífico (INEGI, 2008). Es la provincia de mayor complejidad geológica pues contiene rocas ígneas, sedimentarias y en mayor abundancia metamórficas, el choque de las placas tectónicas de Cocos y Norteamericana, provocó el levantamiento de esta Sierra y ha determinado en gran parte su complejidad (INEGI, 2008).

La subprovincia Cordillera Costera del Sur constituye la franja central de la Provincia Sierra Madre del Sur y se caracteriza por estar constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Representa la zona de transición entre las subprovincias internas Depresión del Balsas y Sierras y Valles Guerrerenses, y la subprovincia Costas del Sur en la zona costera. La cordillera está orientada de manera paralela a la línea de costa, abarca parte del Estado de Colima, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca.

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 siete tipos de climas, el semicálido subhúmedo A(C)w1(w) y A(C)w2(w), y en menor proporción templado subhúmedo C(w2)(w) al norte; al este cálido subhúmedo Aw1(w),

cálido subhúmedo Aw2(w) en la parte central, templado subhúmedo (A)C(w2)(w) y C(w2)(w) al sur.

Para la determinación de las condiciones climatológicas, se utilizaron los datos de 3 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero, Tixtla (DGE), Tixtla (SMN) y Colotlipa en Guerrero. Con un periodo de registro que comprende 1961-1987 y utilizando el método de polígonos de Thiessen, se determinaron que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación potencial son 22.2°C y 1,131.4 mm, respectivamente.

2.3 Hidrografía

El acuífero se localiza en la región hidrológica no. 20 Costa Chica de Guerrero y no. 18 Balsas, abarca las cuencas Río Petaquillas, Río Omitlán y Río Bajo Atoyac; pertenece a las subcuencas R. Azul, R, Balsas – San Juan Tetelzingo, R. Tetlanapa y R. Omitlán. Los escurrimientos son escasos, sin embargo, existen varias corrientes que drenan directamente al Río Azul, afluente del Río Papagayo, el cual descarga al Océano Pacífico, en las inmediaciones de la Laguna Tres Palos.

2.4 Geomorfología

Entre las geoformas características de la región donde se ubica el área pueden distinguirse sierras, lomeríos y llanuras aluviales. Estos rasgos del relieve están controlados por la litología, las estructuras geológicas y los agentes erosivos. La expresión geomorfológica de la región está representada por sierras altas de pendiente abrupta constituidas por rocas calizas y lomeríos redondeados, conformados principalmente por rocas volcánicas. Uno de los fenómenos más importantes que afectan el relieve en esta región, es la disolución de rocas carbonatadas, conocido como karsticidad. Las llanuras aluviales se encuentran en la región central y noroeste del área.

3. GEOLOGÍA

La superficie del acuífero está compuesta principalmente por rocas sedimentarias de tipo calizas, calizas-lutitas, lutitas-areniscas, areniscas-conglomerados y conglomerados, rocas ígneas extrusivas, material aluvial que se encuentra principalmente en el centro del acuífero en los lechos de los ríos, y de pequeños afloramientos de rocas metamórficas y rocas ígneas intrusivas. La distribución general de las distintas unidades litológicas se muestra en la figura 2.

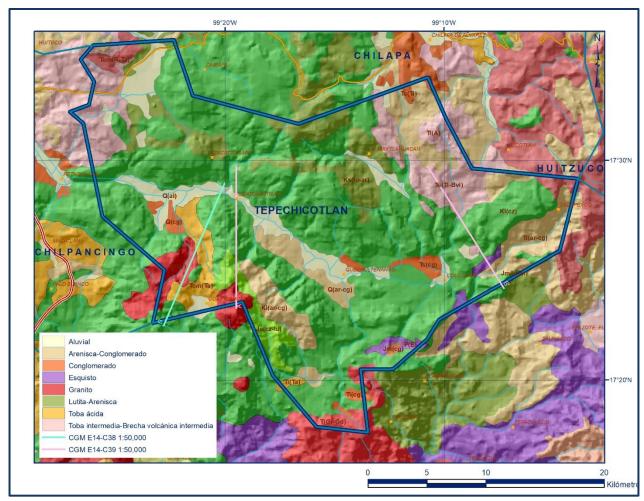


Figura 2. Geología general del acuífero

3.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica está conformada por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, cuyo registro comprende edades que varían del Devónico Inferior al Cuaternario. A continuación, se presenta de manera breve la descripción de la más antiqua a la más reciente:

DEVÓNICO

Formación Cosoltepec

Es la unidad más antigua del complejo, se encuentra distribuida hacia la porción sureste del acuífero, está constituida por esquistos, cuarcitas, filitas, metareniscas y filitas carbonosas, su edad está comprendida entre el Devónico Inferior (Pragiano) y el Mississíppico Medio (Viseano). El ambiente de depósito de esta formación se ha interpretado como marino pelágico, de baja energía, con manifestaciones de

vulcanismo básico. Se correlaciona con el terreno Xolapa al igual que con los esquistos ricos en biotita de la Chazumba.

JURÁSICO

Formación Chapolapa

Compuesta en su mayor parte de conglomerados y cantidades menores de tobas riolíticas y dacíticas, pizarra y arenisca, metamorfizada; de edad Jurásico medio. De la misma edad, se presenta una alternancia rítmica de arenisca, lutita, limolita y en menor proporción conglomerados polimícticos del Grupo Tecocoyunca. El ambiente de depósito de esta formación está constituido por sucesiones marinas formadas durante un período de regresión, asociado con un régimen de extensión; relacionado a un ambiente continental conformado por el Terreno Mixteco. Sobreyace discordantemente a la Formación Cosoltepec, y su contacto superior se registra con las Formaciones Papagayo, Alquitrán Acahuizotla, Morelos, Taberna y con el Conglomerado Cualac.

CRETÁSICO

Formación Zicapa

Se compone por conglomerados, areniscas, lutitas, lentes de caliza, tobas andesíticas y riolíticas, interestratificadas; del Cretácico Inferior (Hauteriviano-Aptiano). El ambiente de depósito de esta formación es considerado entre continental y marino, donde la creación de espacio para su depósito está directamente relacionada con actividad tectónica. Su contacto superior es transicional a las calizas de la Formación Morelos.

Formación Morelos

Está compuesta de rocas calcáreas arrecifales de edad Albiano – Cenomaniano, que sobreyacen de forma transicional a la Formación Zicapa. A partir de las características sedimentológicas y el conjunto fósil, se reconoció la existencia de facies de supramarea, intermarea y submarea, y se infiere un ambiente de plataforma interna (epirítica) en condiciones semi-restringidas. Se correlaciona con la caliza El Doctor, las formaciones El Abra, Tamaulipas Superior y Taninul, pues son equivalentes litológica y temporalmente; subyace concordantemente a la Formación Mezcala.

Formación Mezcala

Sobreyace transicionalmente a la Formación Morelos, está constituida por una alternancia rítmica de areniscas y lutitas en estratos delgados del Cenomaniano-Mastrecciano. Su ambiente de depósito está representado principalmente por corrientes de turbidez de baja densidad y relativamente diluidas, o bien corresponde a depósitos pelágicos-hemipelágicos, de acuerdo a un análisis de facies, al considerar la litología y la fauna encontrada, se infiere que la Formación Mezcala se depositó en un mar epipelágico, con la influencia de sedimentación carbonatada, en condiciones relativamente profundas de baja energía, en aguas de temperaturas frías.

PALEÓGENO

Formación Tetelcingo

El magmatismo de la Sierra Madre del Sur está representado por las rocas volcánicas de esta Formación de edad Paleoceno, la cual está constituida por brecha volcánica andesítica, dacita, toba riolítica y aglomerados que se intercalan con conglomerados calcáreos, con niveles de arenisca y material volcánico correspondientes a la porción inferior de la unidad Balsas de edad Paleoceno-Eoceno. El paquete de rocas de esta Formación se originó en un ambiente volcánico continental asociado a zonas de cizalla frágil, producto de un arco magmático continental, el cual se desarrolló cuando los esfuerzos compresivos de la orogenia Laramide habían cesado y la región se encontraba emergida. Los contactos inferior y superior de esta formación son siempre discordantes; el límite inferior es discordante angular con las rocas de las Formaciones Mezcala y Morelos, y el límite superior está en discordancia erosional con los conglomerados de la Formación Chilpancingo, además se puede encontrar subyaciendo o interdigitada con la unidad Balsas.

Se identificaron varios afloramientos de cuerpos ígneos instrusivos de composición variada, como son un granito del Paleoceno y pórfidos andesíticos del Eoceno.

Formación Alquitrán

Está compuesta de ignimbritas y riolitas de edad Oligoceno-Mioceno. Su ambiente de depósito es de tipo volcánico continental y cubre la unidad Balsas y la Formación Morelos.

NEÓGENO

Formación Chilpancingo

Está constituida por una secuencia de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillas, de edad Plioceno, y está conformada por una serie de abanicos aluviales parcialmente disectados, que se localizan en el valle de Quechultenango. Considerando las estructuras primarias presentes, se interpreta que el ambiente de depósito se efectúo por medio de corrientes de agua, y los horizontes calcáreos con estratificación uniforme son indicadores de condiciones lacustres temporales. Su contacto superior se encuentra cubierto por aluvión del Cuaternario.

CUATERNARIO

Aluvión

Es la unidad más joven, restringida a las partes más bajas y consiste de material arcilloso-arenoso no consolidado y retrabajado. Se encuentra principalmente en el área central de la zona de estudio con una dirección NW-SE.

3.2 Geología estructural

Estructuralmente la región se caracteriza por la presencia de anticlinales, sinclinales, fallas, fracturas, cabalgaduras y estructuras volcánicas. La deformación dúctil está registrada en la foliación de la Formación Cosoltepec pues presenta diferentes tipos de superficies asociadas a plegamiento, crenulación y desarrollo de bandas "kink"; el dominio dúctil-frágil está representado por un sistema de pliegues y cabalgaduras, entre ellas la cabalgadura Amate Amarillo.

Las estructuras de deformación frágil están representadas por fallas de tipo normal y lateral, una de las fallas normales es la Xiloxuchicán con dirección NW-SE, falla lateral El Rincón con dirección NE-SW, y las fallas laterales El Naranjo, El Molino y Coaxtlahuacán con dirección NW-SE.

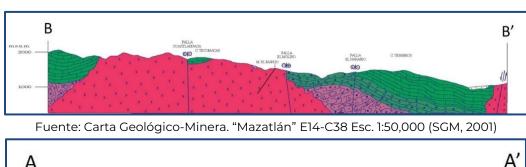
3.3 Geología del subsuelo

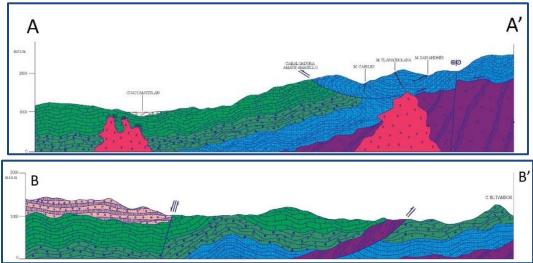
De acuerdo con la información geológica recabada en el acuífero, por correlación con acuíferos vecinos, y las evidencias de la geología superficial, es posible definir la existencia de dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado.

El medio poroso constituye la unidad superior y está conformado por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que constituyen el lecho y la llanura de

inundación del Río Azul, así como por conglomerados, areniscas y tobas. El medio fracturado se encuentra en una secuencia de rocas calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución. Los pozos perforados en las calizas en el acuífero han comprobado su potencial.

Las fronteras de flujo subterráneo están representadas por las rocas arcillosas de la Formación Mezcala, rocas volcánicas, intrusivas y metamórficas. El basamento geohidrológico regional está constituido por las mismas rocas sedimentarias al desaparecer el fracturamiento a profundidad y por rocas metamórficas. En la figura 3 se presentan dos secciones geológicas esquemáticas que muestran la disposición de las unidades geológicas del subsuelo.





Fuente: Carta Geológico-Minera. "Quechultenango" E14-C39 Esc. 1:50,000 (SGM, 2001) Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

4. HIDROGEOLOGÍA

4.1 Tipo de acuífero

De acuerdo con la información geológica y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y fluviales de

granulometría variada que constituyen el lecho y la llanura de inundación del Río Azul, así como por conglomerados, areniscas y tobas.

El medio poroso constituye la unidad superior y está conformado por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que constituyen el lecho y la llanura de inundación del Río Azul, así como por conglomerados, areniscas y tobas. El medio fracturado se encuentra en una secuencia de rocas calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución. Los pozos perforados en las calizas en el acuífero han comprobado su potencial. En su porción inferior se aloja en una secuencia de rocas calizas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución.

5. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

No existe información piezométrica actual ni histórica en la superficie que cubre el acuífero. La escasa información disponible, procedente de recorridos de campo, es puntual e inconsistente de tal manera que no es posible extrapolarla para elaborar configuraciones del nivel estático que permitan el planteamiento de un balance de aguas subterráneas.

Por estas razones, se optó por plantear el balance hidrometeorológico en la superficie de **690.8 km²** del acuífero para estimar 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:

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:

Recarga total - Descarga total = Cambio de almacenamiento

5.1 Entradas

Las entradas al acuífero Tepechicotlán están integradas básicamente por la recarga natural que se produce por la infiltración de la Iluvia (Rv).

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:

$$V_{LL} = V_{ETR} + V_{ESC} + V_{INF}$$
 (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:

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

El volumen de lluvia que se precipita en la superficie cubierta por el acuífero se obtiene al multiplicar su área (690.8 km²) por la lámina de precipitación media anual (1,131.4 mm):

$$V_{LL} = 690.8 \text{ km}^2 (1,131.4 \text{ m}) = 781.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando el valor medio anual de precipitación de 1,131.4 mm y temperatura de 22.2 °C.

Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas para todos los climas del mundo, reporta la expresión siguiente:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real, en mm;

P = Precipitación media anual, en mm;

L = 300 + 25T + 0.05T3;

T = Temperatura media anual, en °C;

La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc, es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L (280.6). En caso contrario se obtiene una ETR > P y para estos casos se debe considerar a ETR = P. De acuerdo con lo anterior, se obtiene un valor de lámina de evapotranspiración de **908 mm anuales.** Por lo tanto, el volumen de ETR es:

$$V_{ETR}$$
 = 690.8 km² (0.908 m) = 627.2 hm³ 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:

VOLUMEN ANUAL DE

ESCURRIMIENTO

NATURAL DE LA

CUENCA

PRECIPITACION

AREA DE LA

COEFICIENTE DE

CUENCA

CUENCA

CUENCA

CUENCA

El coeficiente de escurrimiento (Ce) 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, Geografía e Informática y de visitas de campo, 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.

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 (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes, en la que P es la precipitación media anual expresada en mm:

Donde:

P = Precipitación anual;

Ce = Coeficiente de escurrimiento anual;

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

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

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO	TIPO DE SUELO
USO DE SUELO	Α	В	С
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
Pastizal:			
% 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		
А	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loes poco compactos		
В	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad; loes algo más compactos que los correspondientes a los suelos Tipo A; terrenos migajosos		
С	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loes muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		

De acuerdo con la 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 Tepechicotlán, predominan los siguientes tipos de suelo: Cambisol, Litosol, Luvisol, Regosol y Rendzina, que se clasifican en dos tipos de suelo: A, B y C (figura 4).

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 seis usos de suelo diferentes: agricultura, asentamientos humanos, bosque, cuerpos de agua, otros tipos y pastizal (figura 5).

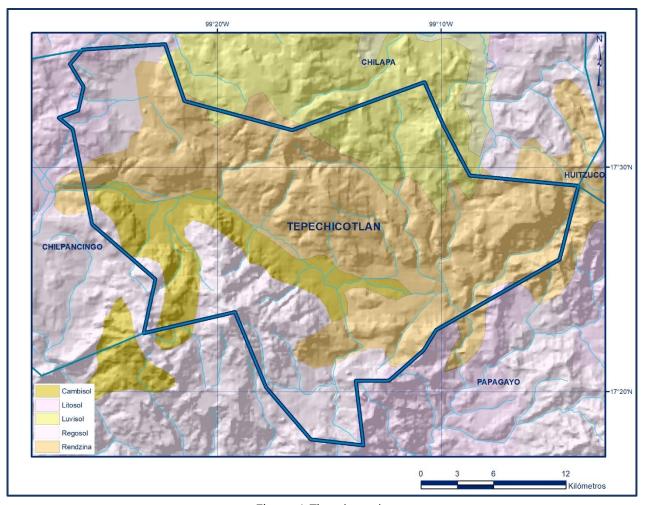


Figura 4. Tipo de suelo

De esta manera, el valor de K se obtuvo como promedio ponderado y es igual a 0.227, valor que se aplicó en la siguiente ecuación para obtener el coeficiente de escurrimiento (Ce):

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

Ce = 0.151

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

 $V_{ESC} = 0.151 (781.5 \text{ hm}^3) = 118 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$

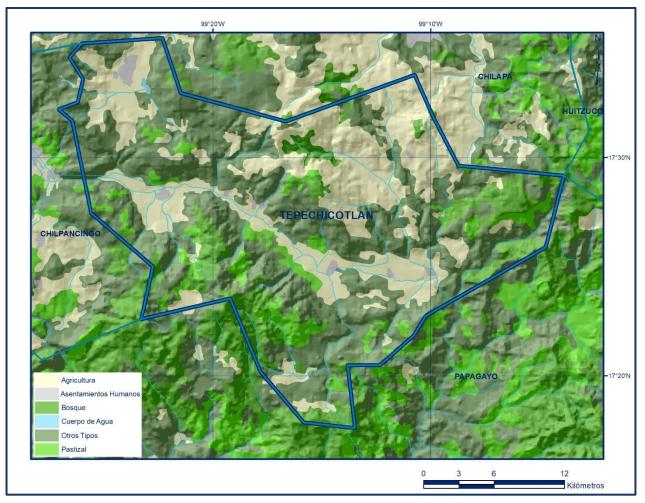


Figura 5. Uso de suelo

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

$$V_{INF} = V_{LL} - V_{ETR} - V_{ESC}$$
 (2)
 $V_{INF} = 781.5 - 627.2 - 118$
 $V_{INF} = 36.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$

Al dividir el volumen promedio anual infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es 781.5 hm³/año, se obtiene el coeficiente de infiltración de 0.0464.

De acuerdo con lo anterior, el volumen susceptible de infiltrarse es de 36.6 hm³/año en la superficie del acuífero.

Por lo que la Rv = 36.3 hm³ 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) 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 **3.2 hm³ 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 Colotlipa, ubicada en la cota más baja de la cuenca Río Azul, afluente del Río Papagayo, se estima que el flujo base drenado por el río es de aproximadamente **14.3 hm³ anuales**, equivalente al caudal mínimo transitado.

5.2.3 Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con la información de 2017, se identificó la existencia de 34 manantiales, que en conjunto descargan **3.2 hm³ 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:

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

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 **36.3 hm³** 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 el caso de este acuífero, su valor es de 15.4 hm³ anuales.

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 (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 **3,206,896** m³ anuales, que reporta el Registro Público de Derechos e Agua (REPDA) 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.

DMA = R - DNC - VEAS

DMA = 36.3 - 15.4 - 3.206896

DMA = 17.693104 hm³ anuales

El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **17,693,104 m³ anuales** para otorgar nuevas concesiones.

7. BIBLIOGRAFÍA

Institutito Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2008. Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. México

Servicio Geológico Mexicano (SGM). Léxico Estratigráfico de México.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2001. Carta Geológico-Minera Mazatlán E14-C38. Escala 1:50,000. Pachuca, Hgo.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2001. Carta Geológico-Minera Quechultenango E14-C39. Escala 1:50,000. Pachuca, Hgo.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2006. Carta Geológico-Minera Chilpancingo E14-C28. Escala 1:50,000. Pachuca, Hgo.

Diario Oficial de la Federación (DOF), 2020. ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican; a la fecha de corte 20 de febrero de 2020.

Diario Oficial de la Federación (DOF), 2001, ACUERDO por el que se establece y da a conocer al público en general la denominación única de los acuíferos reconocidos en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, por la Comisión Nacional del Agua, y la homologación de los nombres de los acuíferos que fueron utilizados para la emisión de los títulos de concesión, asignación o permisos otorgados por este órgano desconcentrado.