



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ZACATEPEC (1703), ESTADO DE
MORELOS**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	8
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía.....	10
4.2 Geología estructural	15
4.3 Geología del subsuelo.....	16
5. HIDROGEOLOGÍA.....	16
5.1 Tipo de acuífero.....	16
5.2 Parámetros hidráulicos.....	17
5.3 Piezometría.....	17
5.4 Comportamiento hidráulico.....	17
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	17
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	18
5.4.3 Evolución del nivel estático	19
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	20
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	20
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
7.1 Entradas.....	21
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	22
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	22
7.1.3 Recarga inducida (Ri)	24
7.2 Salidas	24
7.2.1 Extracción por bombeo (B).....	24
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	24
7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)	25
7.2.4 Evapotranspiración (ETR)	25
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	26
8. DISPONIBILIDAD	27
8.1 Recarga total media anual (R).....	28
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	28
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	28
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	29
9. BIBLIOGRAFÍA	30

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 Zacatepec, definido con la clave 1703 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la parte central del país, en la porción suroeste del estado de Morelos, entre los paralelos 18° 20' y 18° 45' de latitud Norte y los meridianos 99° 30' y 99° 9' de longitud Oeste, cubriendo una superficie aproximada de 1,279 km². Limita al norte con el acuífero de Cuernavaca, al este con el acuífero Cautla-Yautepec, pertenecientes al estado de Morelos; al sur limita con los acuíferos Huitzucó, Poloncingo y Buenavista de Cuellar, pertenecientes al estado de Guerrero y al oeste limita con el acuífero de Tenancingo, perteneciente al estado de México (figura 1).

Geopolíticamente, el área del acuífero cubre totalmente los municipios Amacuzac, Zacatepec de Hidalgo, Mazatepec, Puente de Ixtla, Coatlán del Río, Jojutla y Tetecala; parcialmente los municipios Tlaquiltenango, Xochitepec, Tlaltizapán, Temixco y Miacatlán. Todos ellos pertenecen al estado de Morelos.

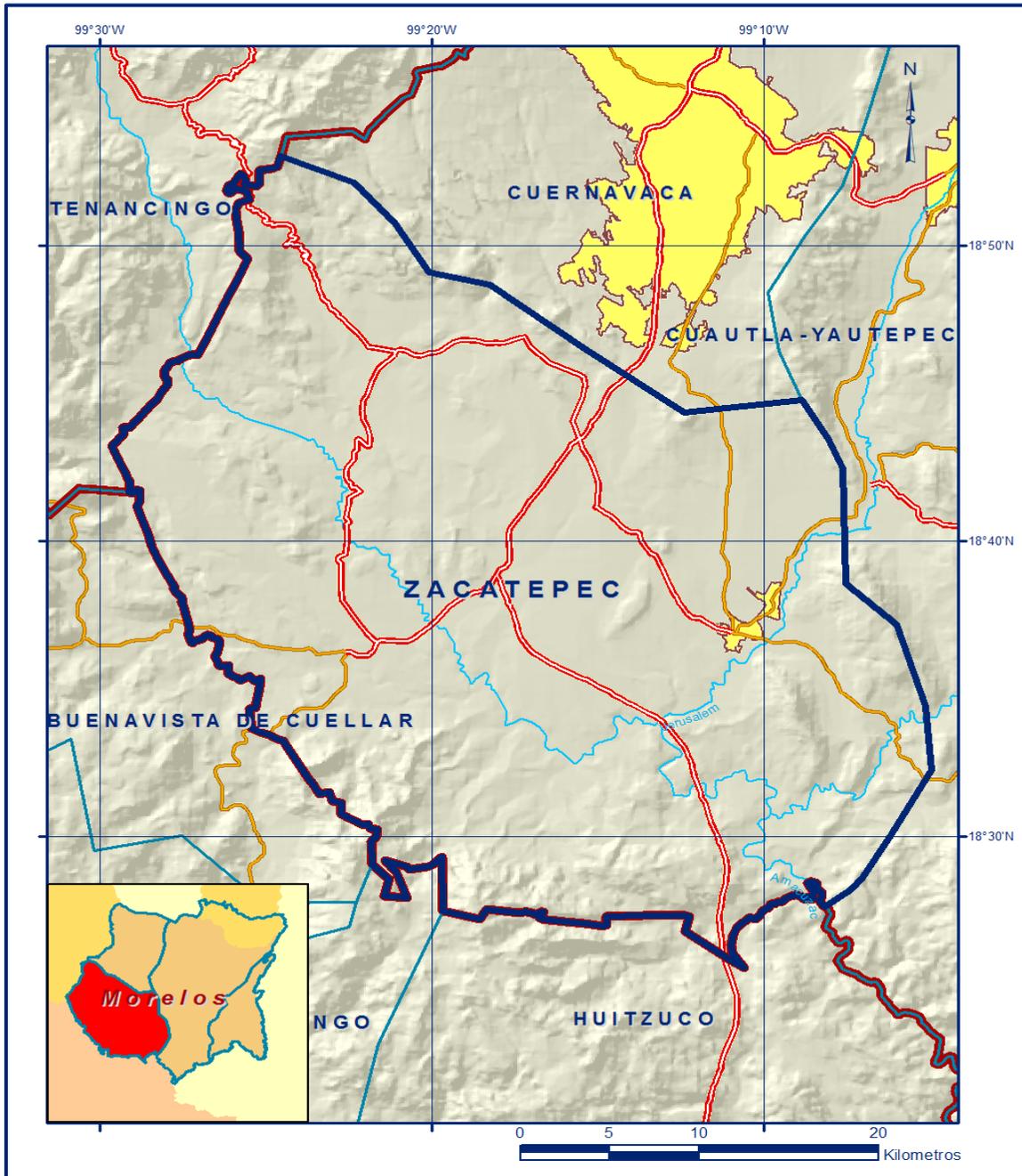


Figura 1. Localización del acuífero

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 1703 ZACATEPEC							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	8	9.7	18	27	38.0	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	99	19	39.0	18	27	29.4	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL
3	99	21	48.1	18	29	3.7	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	99	29	7.6	18	41	38.1	DEL 4 AL 5 POR EL LIMITE ESTATAL
5	99	24	32.6	18	53	1.2	
6	99	22	19.1	18	52	7.0	
7	99	21	6.6	18	50	44.1	
8	99	20	4.4	18	49	5.6	
9	99	18	15.7	18	48	39.7	
10	99	15	24.7	18	46	30.2	
11	99	12	23.4	18	44	20.7	
12	99	8	51.0	18	44	46.6	
13	99	8	4.4	18	43	28.9	
14	99	7	38.5	18	42	26.8	
15	99	7	33.3	18	38	33.6	
16	99	6	0.0	18	37	10.8	
17	99	5	8.2	18	34	25.0	
18	99	4	57.9	18	32	15.5	
19	99	6	10.4	18	30	6.0	
20	99	7	2.2	18	28	37.9	
21	99	7	22.9	18	28	12.0	
1	99	8	9.7	18	27	38.0	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Zacatepec pertenece al Organismo de Cuenca Balsas. Su territorio completo se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero rige en la porción norte y sur-oeste del acuífero y es el *“Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona no vedada del estado de Morelos, para el mejor control de las extracciones, uso o aprovechamiento de aguas del subsuelo de dicha región”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de Julio de 1973. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos y de abrevadero.

El segundo rige en la porción central del acuífero a través del *“Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona comprendida dentro de los límites del Distrito de Riego número 16, del Estado de Morelos”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 23 de junio de 1960. Esta veda es tipo III, en la 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. El uso principal es el público urbano. En su territorio se encuentra establecido el Distrito de Riego No. 16 “Estado de Morelos”. No se ha constituido hasta la fecha Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional, a continuación, se mencionan los más importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DEL VALLE DE ZACATEPEC, ESTADO DE MORELOS”, realizado por TACSA en 1981 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. El estudio tuvo como objetivos el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero, definir su geometría, determinar la magnitud y procedencia de la recarga, cuantificar su disponibilidad, determinar el volumen de extracción adicional que no cause efectos perjudiciales y localizar las áreas más favorables para la perforación de explotación.

Para ello se realizaron actividades de campo que incluyeron el censo de aprovechamientos, piezometría, nivelación de brocales, ejecución de pruebas de bombeo y muestreo de agua subterránea para análisis fisicoquímicos.

Concluye que el agua subterránea es en general de buena calidad y que el acuífero se encuentra en equilibrio. Recomienda la instalación de estaciones hidrométricas en la confluencia de los ríos Yautepec, Apatlaco y Amacuzac.

Ubica zonas favorables para la perforación al oeste y sureste de Tequesquitengo y propone la perforación de 2 pozos a 250 m de profundidad.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS CUERNAVACA, CUAUTLA-YAUTEPEC, TEPALCINGO-AXOCHIAPAN Y ZACATEPEC, EN EL ESTADO DE MORELOS, elaborado por la Universidad Autónoma de Chapingo, para la Comisión Nacional del Agua, en el 2010. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos y recabar información para 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, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este trabajo constituye la base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el área del acuífero Zacatepec se encuentra ubicado en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, dentro de la Subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses.

La Provincia Sierra Madre del Sur abarca parte de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, México, Morelos, Puebla, Oaxaca, Veracruz, Nayarit y todo el estado de Guerrero, cubriendo una superficie de 258,274 km². Limita al norte con la Faja Volcánica Transmexicana; al sur con el Océano Pacífico, al oriente, con las provincias de Sierras y Valles del Sureste y la porción sur de la Planicie Costera del Golfo (Velázquez y Ordaz, 1992).

Su región más angosta forma un espinazo montañoso marginal hacia la costa. Su altitud media es de 2000 msnm, siendo el punto más alto el Cerro Nube (Quie Yelaag en Zapoteco), a una altura de 3710 msnm, ubicado en el sur de Oaxaca. La subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses, localizada al oeste, ocupa 2,110 km², 43.3 % del territorio morelense, e incluye los municipios del sur del estado.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante en la zona del acuífero Zacatepec es el cálido subhúmedo (Awo), con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm, lluvias de verano con índice precipitación/temperatura menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5 % al 10.2 % del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **890 mm** y **23.7 °C** respectivamente.

De igual manera, con respecto a la evapotranspiración, se obtuvo un valor de **803.7 mm anuales**.

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de julio a septiembre que correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos y otro de lluvias invernales que abarca de octubre a enero, con precipitaciones menos significativas, las cuales son provocadas principalmente por los frentes fríos que afectan la región.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 18 “Río Balsas”, Subregión Hidrológica “Medio Balsas”, cuenca del Río Amacuzac. Comprende las subcuencas hidrográficas de los ríos Tembembe, Apatlaco, Yautepec y Cuautla.

La región hidrológica comprende el 6% de la masa continental del territorio mexicano, entre los paralelos 17 00' y 20 00' de latitud norte y los meridianos 97°30' y 103°15' de longitud oeste, abarca porciones de varias regiones económicamente importantes del centro-occidente y centro-sur de México, a través de ocho estados de la república.

La infraestructura hidráulica incluye 29 presas derivadoras que abastecen parcialmente a 14,400 ha de tres módulos de riego, más una tercera parte del módulo Alto Apatlaco, pertenecientes al Distrito de Riego No. 16.

El patrón de drenaje que se define en todo el valle es de tipo dendrítico, principalmente en las zonas donde afloran depósitos clásticos continentales de la Formación Cuernavaca. Además, en esta área también se encuentra el único lago morelense del sistema de drenaje del Alto Amacuzac, el lago de Tequesquitengo; el mayor cuerpo de agua de la entidad.

3.4 Geomorfología

Los rasgos morfológicos son reflejo de las características litológicas y tectónicas de las formaciones existentes. Los productos vulcanoclásticos del Terciario y Cuaternario, al depositarse sobre una topografía muy accidentada, originaron el Valle de Zacatepec.

A través del tiempo geológico el estado de Morelos ha sido afectado por períodos orogénicos y tectónicos, actividades que han dado lugar a la presencia de una gran variedad de geofomas. Los límites geomorfológicos del acuífero Zacatepec son: al norte la Serra de Xochicalco, al poniente la prolongación de la Sierra Zempoala, al oriente la Sierra de Tepoztlán-Tlaltizapán o anticlinal de Ticumán y la Sierra de Huautla, al sur La sierra de Buenavista de Cuéllar.

En el área de estudio se desarrollaron planicies en las que se acumularon productos vulcanoclásticos del Terciario y Cuaternario, al depositarse sobre una topografía muy accidentada, originaron valles construccionales.

Del paisaje morfológico sepultado existen ventanas-testigos, tales como los afloramientos de los troncos intrusivos de Tlaica, cerca del poblado de Jonacatepec.

4. GEOLOGÍA

La geología superficial de la cuenca de Zacatepec muestra unidades litológicas principalmente de origen sedimentario y volcánico, producto de una sucesión de acontecimientos naturales que modelaron la corteza terrestre; constituida de forma general por rocas sedimentarias marinas, continentales y rocas ígneas (figura 2).

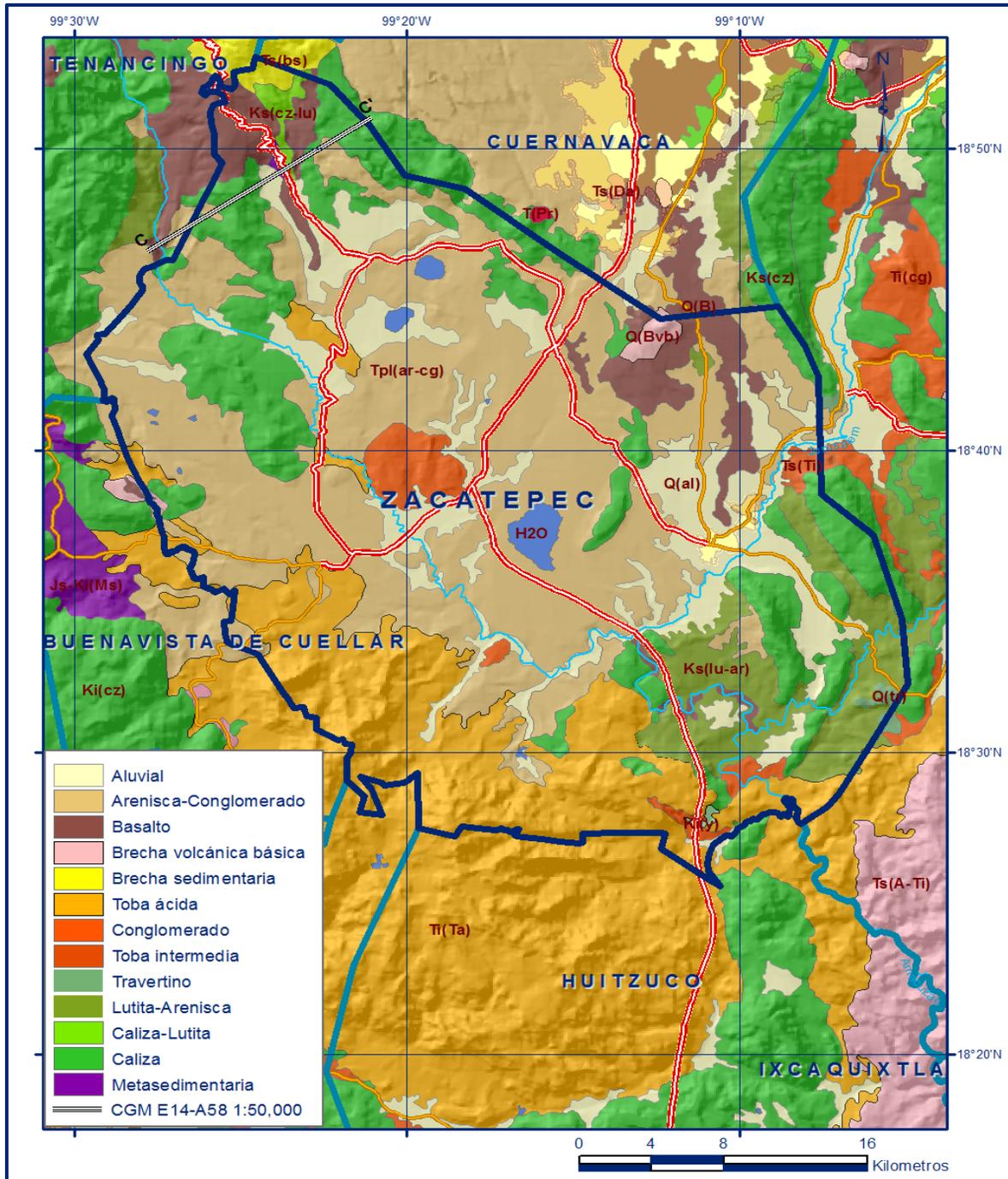


Figura 2. Geología general del acuífero

Desde el punto de vista tectónico, la región se ubica en el límite entre los Terrenos Guerrero y Mixteco (Campa M.F., 1981). El Terreno Guerrero se encuentra conformado por basaltos y andesitas en forma de coladas y almohadillas. La edad de esta secuencia es cretácica, aunque podría ser jurásica superior; está cubierta transicionalmente por conglomerados, brechas volcánicas, grauvacas y pelitas tobáceas.

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Cretácico Inferior al Reciente. A continuación, se describen de la más antigua a la más reciente:

MESOZOICO (CRETÁCICO)

Formación Xochicalco

Estas rocas del período Cretácico Inferior, son las más antiguas y afloran en las inmediaciones de la zona arqueológica de Xochicalco, están conformadas por una sucesión de capas de calizas de espesor delgado a medio, de color que varía de gris a negro con nódulos y pequeñas capas de pedernal intercaladas.

Formación Morelos

Fue propuesta por Carl Fries en 1960 para designar una gran secuencia de horizontes de calizas y dolomitas, de edad cretácica que afloran en gran parte del estado de Morelos y zonas circunvecinas, sobre todo en los límites de los estados de México y Guerrero.

Según Fries, dentro de esta formación se pueden identificar plenamente dos miembros; el primero carbonatado, representado por estratos potentes de caliza y dolomitas y el segundo llamado anhidrita por contener estratos de este material.

En términos generales esta formación consta esencialmente de una sucesión de horizontes calcáreos y dolomíticos con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos y lentes, la parte más antigua está representada por el miembro Anhidrita.

El color cambia de una capa a otra, variando de gris claro a negro, estas últimas deben su color a la mayor abundancia de materia carbonosa; de manera general los estratos presentan un espesor que varía de 20 a 60 cm. Su espesor medido en varias secciones en el estado varía entre 450 y 900 m.

Dentro de la zona de estudio se puede observar un gran afloramiento en la porción occidental, hacia el poniente de la localidad de Buenavista de Cuellar otros afloramientos son los situados al sur oriente casi en los límites del estado de Morelos en donde se presentan bancos de calizas, generalmente son de color oscuro y de textura calcarenítica.

Existen otros afloramientos aislados en las inmediaciones de Zacatepec y de Jojutla de Juárez que forman estructuras anticlinales con dirección general de NW-SE, la edad asignada a estas rocas es Albiano-Cenomaniano.

Formación Cuautla

El nombre de la Formación Cuautla fue propuesto por Carl Fries (1960) para referirse a las calizas que afloran en las proximidades de Cuautla en el estado de Morelos.

Esta formación consta de tres facies predominantes: una sucesión gruesa de capas de caliza de estratificación medio a gruesa de tipo de banco calcáreo; una sucesión más delgada de capa de caliza laminares de estratificación delgada y una sucesión muy delgada de capas de caliza clásica de estratificación delgada a mediana. La facies que predomina en la zona es la caliza densa en estratos gruesos o bien en algunas ocasiones masiva compuesta por calcilimolita y calcarenita de tipo banco calcáreo en estratos gruesos, frecuentemente algunos de ellos presenten nódulos de pedernal. Su espesor supera en algunas localidades los 700 m.

En la zona de estudio puede observarse a esta formación en pliegues anticlinales al oriente de las localidades de Jojutla de Juárez y el Higuerón, en donde se manifiesta en capas de calizas, que varían de unos cuantos centímetros a 1 m de espesor, estas calizas manifiestan una textura microcristalina, de color gris claro y con pequeños horizontes de composición arcillosa. La edad asignada por Fries es del Cenomaniano-Turoniano.

Formación Mexcala

También propuesta por Fries (1960) para designar una sucesión de estratos de areniscas, limolitas y lutitas que se encuentran sobreyaciendo en forma concordante a la Formación Cuautla. La localidad tipo se ubica en las proximidades del poblado Mexcala, en Guerrero. Está constituida principalmente, por lutitas y limolitas, con escasos horizontes de areniscas que hacia la base se hacen más calcáreas. La intensa erosión sobre esta formación propició el depósito de rocas paleógeno-neógenas en forma discordante.

En la zona de estudio existe un gran afloramiento hacia el sur y suroriente de Jojutla de Juárez en la parte baja de un sinclinal, en el que se observan lutitas calcáreas de color oscuro que intemperizan en un color amarillo verdoso, dispuestas en estratos de 3 a 40 cm de espesor, intercalados con areniscas en estratos de 40 cm de potencia.

En algunas ocasiones es común encontrar material carbonoso intercalado con los horizontes de lutitas.

Debido al intenso plegamiento que exhibe, no se ha podido establecer una secuencia litológica detallada ni conocer su espesor real; sin embargo, se ha reportado un espesor hasta superior a 1000 m. Por su contenido fósil, Fries le asignó una edad correspondiente al Conaciano Campaniano.

Cronológicamente se correlaciona con las formaciones Malpaso, Petlalcingo, Soyatal y Agua Nueva. Sus afloramientos se extienden en el estado de Morelos y otros estados vecinos como Guerrero, México, Puebla y Oaxaca;

CENOZOICO

Grupo Balsas

Los primeros depósitos del Paleógeno-Neógeno que descansan sobre las rocas cretácicas consisten en un grupo de sedimentos clásticos, volcánicos y lacustres, no marinos, que se denomina Grupo Balsas.

Se le ha designado como Grupo, ya que las unidades que lo conforman tienen litología muy variable, cada una de las cuales podría constituirse, por sí misma, como unidad con características propias, aunque en algunos lugares presenta facies que se interdigitan y en otras quedan superpuestas.

El nombre de grupo Balsas fue propuesto por Fries en 1960 para designar a una gran variedad de unidades litológicas que afloran en la cuenca del río Balsas, este grupo incluye una gran diversidad de materiales como anhidritas, yesos, calizas lacustres, conglomerados calcáreos y volcánicos, areniscas, materiales tobáceos, derrames ígneos, brechas etc., su compactación es igualmente variable por lo que no es factible determinar su grado de compactación, dependiendo del material y tipo de depósito. En la zona de estudio los principales afloramientos se encuentran situados en las porciones nororiental y noroccidental, en donde se observa un conglomerado calcáreo empacado en material arcilloso de color rojizo con cementante también calcáreo, los fragmentos provienen de las formaciones cretácicas.

El Grupo Balsas en la zona de estudio se encuentra descansando sobre las formaciones cretácicas, principalmente sobre la Formación Mexcala y en algunas ocasiones en discordancia angular sobre la Formación Cuautla y la Formación Morelos.

De forma general los afloramientos más extensos se localizan en los valles altos que han quedado protegidos de los agentes erosivos, cabe hacer mención que la gran mayoría de estos afloramientos presentan fracturas y fallas. Su espesor es muy variable debido a que se depositó en una superficie plegada, de acuerdo a su posición estratigráfica se le asigna una edad del Eoceno-Oligoceno.

Se correlaciona con el Grupo El Morro.

Riolita Tilzapotla

El nombre de Riolita Tilzapotla fue propuesta por Carl Fries para designar a los afloramientos de material tobáceo, derrames y brechas de composición riolítica que afloran hacia la porción sur del río Amacuzac.

En el área de estudio se encuentra un afloramiento en la porción sur y centro, representado por tobas de composición riolítica de color gris, de textura granular, en lo que puede observarse cristales de cuarzo, feldespatos y micas en calidad de accesorio, una característica de esta unidad en la zona, es que forma bloques de gran tamaño.

Generalmente descansa sobre el grupo Balsas coronado las partes altas. Su edad es del Oligoceno tardío de acuerdo con determinaciones radiométricas y el espesor es sumamente variable, alcanzando en algunas localidades hasta 500 m.

Andesita Buenavista

Carl Fries en 1960 propone este nombre para designar una sucesión de materiales de tipo volcánico grueso, compuesto generalmente de corrientes lávicas, brechas y en algunas ocasiones tobas de composición predominantemente andesítica, que forman un gran macizo montañoso situado en la porción sur del río Amacuzac y al oriente de la carretera Amacuzac-Buenavista de Cuéllar.

La localidad tipo se encuentra al oriente del poblado de Buenavista de Juárez, donde puede observarse una intercalación de rocas de composición andesítica que se encuentran descansando sobre los derrames de composición riolítica de la Formación Tilzapotla. De acuerdo a su relación estratigráfica, se le ha asignado o una edad correspondiente al Mioceno.

Formación Cuernavaca

Carl Frías en 1965 propone este nombre para designar los depósitos clásticos transportados por agua, bien expuestos y muy extensos sobre los que se construyó la Ciudad de Cuernavaca. La constitución de esta formación es muy variada, observándose conglomerados formados por fragmentos de basaltos redondeados y cementados en una matriz arenarcillosa medianamente compacta, así como capas de limos y arenas bien estratificadas y algunas calizas lacustres.

Dentro de la zona se observan grandes afloramientos de esta formación principalmente en la porción central y en los alrededores del lago de Tequesquitengo. Una de las características particulares de esta unidad en el área es que se manifiesta en capas horizontales que no han sido afectadas por tectonismo.

Con base en la información de afloramientos y pozos perforados sobre esta formación, se considera que su espesor en el área de estudio es del orden de 150 m. Por correlación estratigráfica, se le asigna una edad correspondiente al Pleistoceno Temprano.

CUATERNARIO

Grupo Chichinautzin

Carl Fries en 1965 propone este nombre para identificar a las corrientes lávicas, tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados de composición andesítica y basáltica que descansan en discordancia angular sobre la Formación Cuernavaca, señalando su localidad tipo al cerro de Chichinautzin, ubicado en el límite entre el estado de Morelos y Distrito Federal.

Dentro del área de estudio se encuentran afloramientos de este grupo en la porción norte en las inmediaciones de Zacatepec en donde el basalto es vesicular, de color negro, en coladas hasta de 5 m de espesor, con intercalaciones de escorias de color rojizo y amarillento, resulta común encontrar pequeños conos cineríticos que aportaron exclusivamente cenizas de color rojo y negro.

Las unidades litoestratigráficas que están cubiertas parcialmente por los basaltos son: las Formaciones Cuernavaca y Tepoztlán, el Grupo Balsas y las lutitas y calizas del Cretácico; su espesor alcanza aproximadamente los 1500 m. Las rocas de la Formación Chichinautzin son correlacionables con las del Volcán Parícutín y su edad corresponde al Pleistoceno-Holoceno.

Depósitos clásticos

Sobreyaciendo a todas las rocas anteriores, se encuentran en esta unidad depósitos clásticos continentales formados por materiales poco consolidados que varían en tamaño de gravas hasta limos y arcillas, así como cantidades menores de margas, turba, ceniza volcánica, loess, travertino y tufa.

Finalmente, la secuencia estratigráfica se completa con depósitos aluviales cuaternarios del periodo Holoceno, integrados por depósitos sedimentarios clásticos continentales con menor proporción de elementos volcánicos que el estrato anterior.

Su espesor es reducido y se extienden en pequeñas aéreas y en las vegas de los ríos, donde están constituidos principalmente por arenas, gravas y boleos. Resulta difícil en algunas aéreas diferenciarlos de la Formación Cuernavaca.

4.2 Geología estructural

A través del tiempo geológico, el estado de Morelos ha sido afectado por períodos orogénicos y tectónicos, que han dado lugar a la presencia de una variedad de geoformas. De manera simple se puede clasificar las geoformas en sierras y valles, las primeras son producto de una intensa actividad tectónica y las segundas son el resultado de las diferentes fuerzas modeladoras de la superficie terrestre.

La geología estructural de la zona determina el tipo de red hidrográfica y la dirección de flujo de las aguas subterráneas, dando lugar a una dirección preferencial en sentido noroeste-sur, como lo manifiestan el río Apatlaco o río Cuernavaca y el río Yautepec.

El lago de Tequesquitengo (según Ortega, 1988) es una fosa tectónica de más de 130 metros de profundidad que se formó como consecuencia del colapso del techo de grandes cavernas de disolución de la caliza que forman el basamento.

Como consecuencia, la cuenca superficial del lago es cerrada y aislada superficialmente, abarcando una extensión sólo un poco mayor que la abertura exterior de la fosa.

Esto significa que el lago no recibe alimentación natural de ningún río importante. El autor también concluye que existe una relación muy estrecha entre los niveles del lago y los del acuífero que lo subyace.

El valle de Zacatepec presenta sensiblemente una orientación noreste–suroeste, reflejando hacia sus bordes las estructuras de las rocas de edad cretácica que forman los sinclinales.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y fluviales que conforman el cauce y la llanura de inundación de los ríos Apatlaco, Chalma, Amacuzac y otros arroyos tributarios, así como los depósitos clásticos continentales de origen volcánico de tipo conglomerático con intercalaciones de basaltos y andesitas, que rellenan los valles con espesores variables que alcanzan hasta 150 metros.

Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias carbonatadas, principalmente calizas de las formaciones Morelos y Cuautla, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución y que pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento hidrogeológico del acuífero están representadas por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad y por las rocas arcillosas de la Formación Mexcala.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero tipo libre, heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido vertical como horizontal, constituido en su porción superior por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como areniscas y conglomerados intercalados con basaltos y andesitas.

El espesor de los sedimentos puede alcanzar algunas centenas de metros hacia el centro de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de calizas marinas de

las formaciones Morelos y Cuautla que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y/o disolución.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas calcáreas al desaparecer el fracturamiento a profundidad.

Esta unidad puede presentar condiciones de **semiconfinamiento o confinamiento** debido a que se encuentra sobreyacida por las lutitas y limolitas de la Formación Mexcala.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se llevaron a cabo 4 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación. Adicionalmente existe información de pruebas realizadas en estudios anteriores.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se puede establecer que los valores de transmisividad varían de 4.82×10^{-3} a 1.21×10^{-2} m²/s (416 m²/día a 1,045 m²/día), con un promedio de **8.46×10^{-3} m²/s** (731 m²/s).

Los valores más bajos se registran en la parte baja del acuífero, específicamente en La Colonia Santa María, mientras que el valor más alto se presentó en la comunidad de Ahuehuetzingo. Con respecto a la conductividad hidráulica, los valores oscilan entre **5.63×10^{-6} m/s a 1.44×10^{-4} m/s** (4.8 m/día a 12.4 m/día).

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

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, únicamente se cuenta con la información recabada de las actividades del estudio realizado en 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010, se observa que los valores varían de 5 a 80 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de las inmediaciones del río Yautepec y de Coatetelco hacia las sierras que

delimitan los valles. Los más someros se localizan cerca de las localidades de Miacatlán y Mazatepec, mientras que los más profundos se registran al norte de San José Vista Hermosa (figura 3).

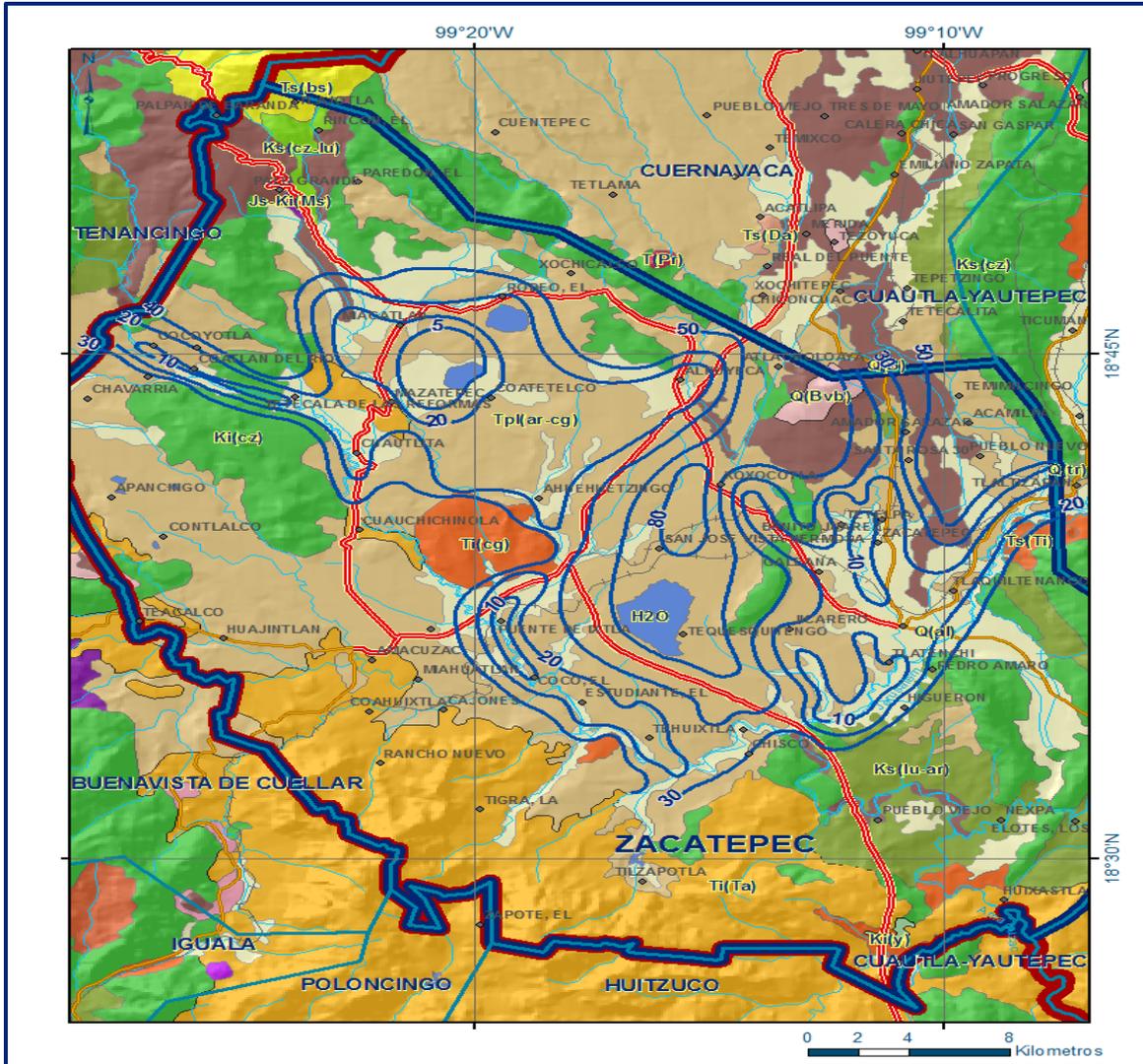


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2010)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, presenta valores que varían de 1100 a 890 msnm, descendiendo gradualmente desde el extremo norte hacia el sur, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y la dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur. Los valores más altos se registran en la porción norte, en el límite con el acuífero Cuernavaca, y las más bajas en el sur (figura 4).

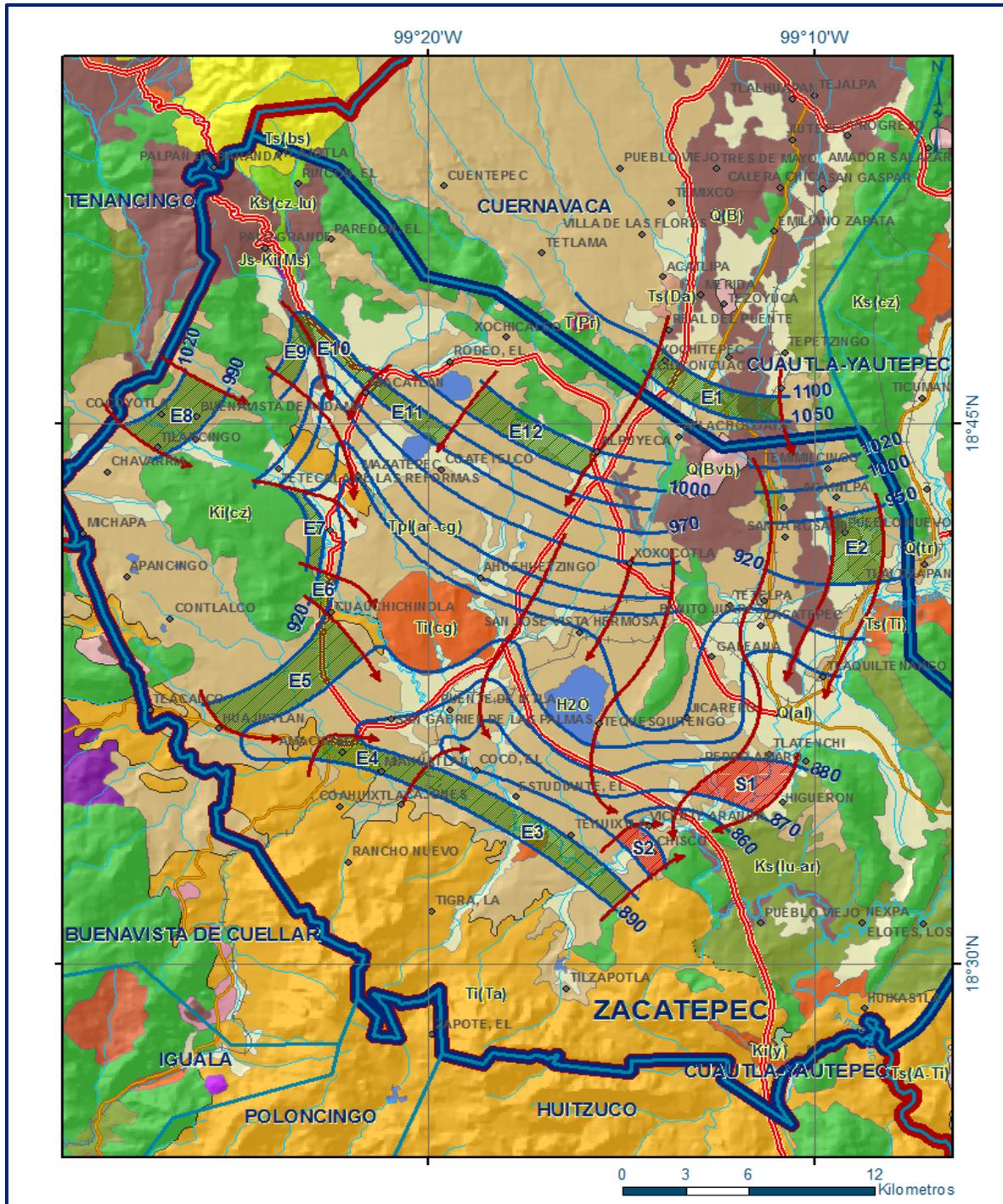


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2010)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se logró una correlación puntual de los pozos en los que existe información piezométrica histórica que permita la configuración de evolución.

Las escasas mediciones piezométricas recabadas en los recorridos de campo se

encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Además, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de pozos.

Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Las mediciones realizadas en 2010 serán el punto de partida para el establecimiento del monitoreo de los niveles del agua subterránea.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 20 muestras de agua de los pozos piloto distribuidos en la zona de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron: temperatura (°C), potencial de hidrogeno (pH), iones principales, conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$), y sólidos totales disueltos (mg/l), para identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero. De manera general, las concentraciones no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Con respecto a los sólidos totales disueltos (STD), los valores varían entre 250 y 950 ppm.

Las concentraciones más bajas se ubican en la porción noroeste del acuífero, en las inmediaciones de los poblados Miacatlán, Tetecala, Coatlán del Río y Xochitepec; y las mayores se registran de manera puntual en el municipio de Puente de Ixtla, con concentraciones de sólidos de 570 a 950 ppm.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el año 2010, apoyado con la información del REPDA, se registraron un total de 328 obras en el acuífero que aprovechan el agua subterránea, de las cuales 244 son pozos, 67 norias y 17 manantiales.

Del total de obras, 294 se encuentran activas y 34 inactivas; 98 son para uso agrícola, 152 para uso público-urbano, 59 para actividades domésticas y 19 para uso industrial.

El volumen total de extracción asciende a 55.4 hm³/año, de los cuales, 26.8 hm³ (48.4 %) se destinan al uso público urbano, 17.0 hm³ (30.7 %) al uso agrícola, 4.4 hm³ (7.9 %) para servicios, 4.3 hm³ (7.8 %) al uso industrial, 0.9 hm³ (1.6 %) al uso doméstico y 2.0 hm³ (3.6%) para otros usos.

Adicionalmente, a través de manantiales se descarga un volumen estimado de **8.0 hm³ anuales**, destinados al uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el 2010; en una superficie de 750 km² del acuífero que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan la mayoría de los aprovechamientos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Entradas} & & \text{Salidas} & & & & \\ \text{(E)} & - & \text{(S)} & = & & & \text{Cambio de masa} \end{array}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento:

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

7.1 Entradas

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

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

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

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

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

Donde:

R_v = Recarga vertical;

E_h = Entradas por flujo subterráneo horizontal;

R_i = Recarga inducida;

B = Bombeo;

S_h = Salidas por flujo subterráneo horizontal;

ETR = Evapotranspiración;

D_m = Descarga de manantiales;

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

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para 2010, mostrada en la figura 4. Con base en esta configuración se seleccionaron canales de

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

$$Q = B * i * T$$

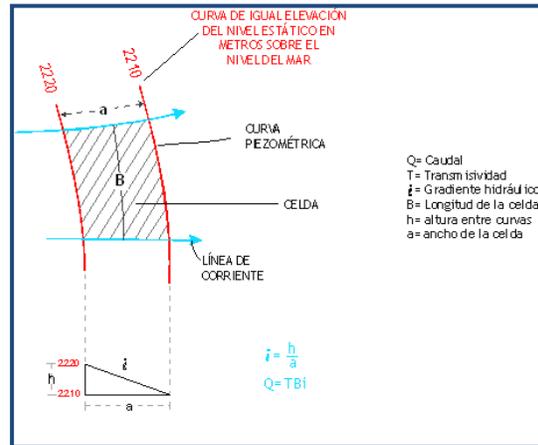
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)

T = Transmisividad (m²/s)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

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

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **65.8 hm³/año.**

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2010)

CANAL	LONGITUD L (m)	ANCHO B (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i (m)	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	5790	1655	50	0.0302	0.004	0.6997	22.1
E2	2740	3370	30	0.0089	0.004	0.0976	3.1
E3	11370	1260	10	0.0079	0.001	0.0902	2.8
E4	5050	1470	10	0.0068	0.001	0.0344	1.1
E5	8000	2525	20	0.0079	0.002	0.1267	4.0
E6	1685	1050	10	0.0095	0.002	0.0321	1.0
E7	3580	735	20	0.0272	0.002	0.1948	6.1
E8	3580	2735	30	0.0110	0.004	0.1571	5.0
E9	2945	1450	20	0.0138	0.004	0.1625	5.1
E10	3580	840	20	0.0238	0.002	0.1705	5.4
E11	4840	1050	20	0.0190	0.002	0.1844	5.8
E12	6525	1895	20	0.0106	0.002	0.1377	4.3
Total entrada							65.8

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

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

Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, se aplicó un balance hidrometeorológico para obtener un coeficiente de infiltración.

Para este caso su valor es de 4.2 % (OCB, 2012). El volumen total de agua destinada a la agricultura es de 128 hm³ anuales, de los cuales 17.0 hm³ corresponden a la extracción de agua subterránea, 8.0 hm³ es agua superficial procedente de la descarga de manantiales dentro del acuífero y 103 hm³ de manantiales que se localizan en el acuífero Cuernavaca.

Si consideramos que el 4.2 % del volumen aplicado al uso agrícola retorna como recarga efectiva al acuífero, su valor es de 5.4 hm³/año. Por otra parte, al aplicar el 4.2 % al volumen de agua para uso público-urbano de 26.8 hm³/ año, arroja un valor de infiltración de 1.1 hm³/año. Por lo tanto, el volumen total **por recarga inducida** asciende a **6.5 hm³/año**.

7.2 Salidas

Las descargas del acuífero ocurren principalmente por bombeo (B), salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR), descarga por flujo base de los ríos (Dfb) y por descargas de manantiales (Dm).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el valor estimado de la extracción por bombeo es del orden de **55.4 hm³/año**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 4, tal como se muestra en la tabla 3, donde se puede observar

que el volumen total estimado de salidas por flujo subterráneo asciende a **9.0 hm³ anuales**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2010)

CANAL	LONGITUD L (m)	ANCHO B (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i (m)	T m ² /s	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	3160	2735	10	0.0037	0.01	0.1155	3.6
S2	2525	1475	10	0.0068	0.01	0.1712	5.4
Total salidas							9.0

7.2.3 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con los aforos, el volumen promedio de descarga de los manantiales asciende a **8.0 hm³ anuales**.

7.2.4 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema.

Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real).

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

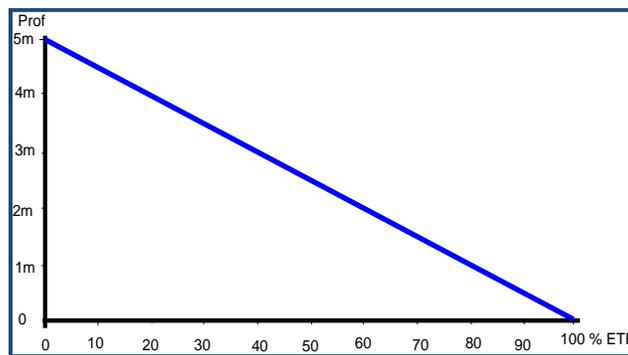
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) = 23.7
P(mm) = 890 P² = 792100
L = 1558.10265 L² = 2427683.87
ETR (mm) = 803.7

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior. Considerando que en una superficie de 40 km² a lo largo de los ríos Amacuzac y Apatlaco la profundidad media al NE es de 3 m, así como en las áreas que rodean a los lagos Tequesquitengo y El Rodeo, según la relación lineal mostrada en la figura anterior, le corresponde un % de ETR de 40%. $ETR = (40) (0.8037) (0.4) = 12.9$. Por lo tanto, **ETR = 12.9 hm³/año.**

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Como se menciona en el apartado de evolución del nivel estático, no se dispone de información piezométrica para elaborar la configuración de la evolución del nivel estático para un periodo de tiempo. Los registros existentes recabados en recorridos de campo se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Por otra parte, debido a que el volumen de extracción es menor a la recarga que recibe el acuífero, todavía no se registran alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento.

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

Solución a la ecuación del balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + Dm + ETR \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 55.4 + 9.0 + 8.0 + 12.9 + 0.0 - 65.8 - 6.5 \\ R_v &= 13.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 13.0 + 65.8 + 6.5 \\ R &= 85.3 \text{ hm}^3/\text{años} \end{aligned}$$

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:

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

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. Para este caso, su valor es de **85.3 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

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 está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida es de **17.0 hm³ anuales**, que corresponden a la descarga de los manantiales y a la salida por flujo subterráneo horizontal en la que está incluida parte de la descarga por flujo base de los ríos Apatlaco y Amacuzac.

8.3 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 **59,244,146 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 85.3 - 17.0 - 59.244146 \\ \text{DMA} &= 9.055854 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **9,055,854 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2010. Actualización Geohidrológica de los Acuíferos Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Tepalcingo-Axochiapan y Zacatepec, en el Estado de Morelos, elaborado por la Universidad Autónoma de Chapingo.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981. Estudio Geohidrológico preliminar del Valle de Zacatepec, estado de Morelos. Realizado por Técnicos Asesores y Constructores, S.A. (TACSA)