



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO POLONCINGO (1203), ESTADO DE
GUERRERO**

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 Provincias fisiográficas.....	6
3.2 Clima.....	8
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1. Estratigrafía.....	12
4.2. Geología estructural.....	20
4.3. Geología del subsuelo.....	21
5. HIDROGEOLOGÍA.....	21
5.1 Tipo de acuífero.....	21
5.2 Parámetros hidráulicos.....	22
5.3 Piezometría.....	22
5.4 Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	22
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	23
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	25
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	26
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	26
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	27
7.1 Entradas.....	27
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	28
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	28
7.1.3. Recarga inducida (Ri).....	30
7.2 Salidas.....	31
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	31
7.2.2 Bombeo (B).....	31
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	32
7.2.4 Descarga de Manantiales (Dm).....	33
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	33
8. DISPONIBILIDAD.....	34
8.1. Recarga total media anual (R).....	35
8.2. Descarga natural comprendida (DNC).....	35
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	35
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	36
9. BIBLIOGRAFÍA.....	37

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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

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

1.1. Localización

El acuífero Poloncingo, definido con la clave 1203 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-norte del Estado de Guerrero, entre los paralelos 17° 47' y 18° 29' de latitud norte y los meridianos 99° 12' y 99° 37' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,680 km². Limita al norte con los acuíferos Buenavista de Cuéllar en el Estado de Guerrero y Zacatepec perteneciente al Estado de Morelos, al este con el acuífero Huitzucó, al oeste con el acuífero Iguala y al sur con el acuífero Chilapa, todos ellos pertenecientes al Estado de Guerrero (figura 1).

Geopolíticamente, comprende la mayor parte del municipio de Tepecoacuilco de Trujano y porciones pequeñas de los municipios Buenavista de Cuéllar, Eduardo Neri, Huitzuc de Los Figueroa, Iguala de La Independencia y Mártir de Cuilapan, del Estado de Guerrero.

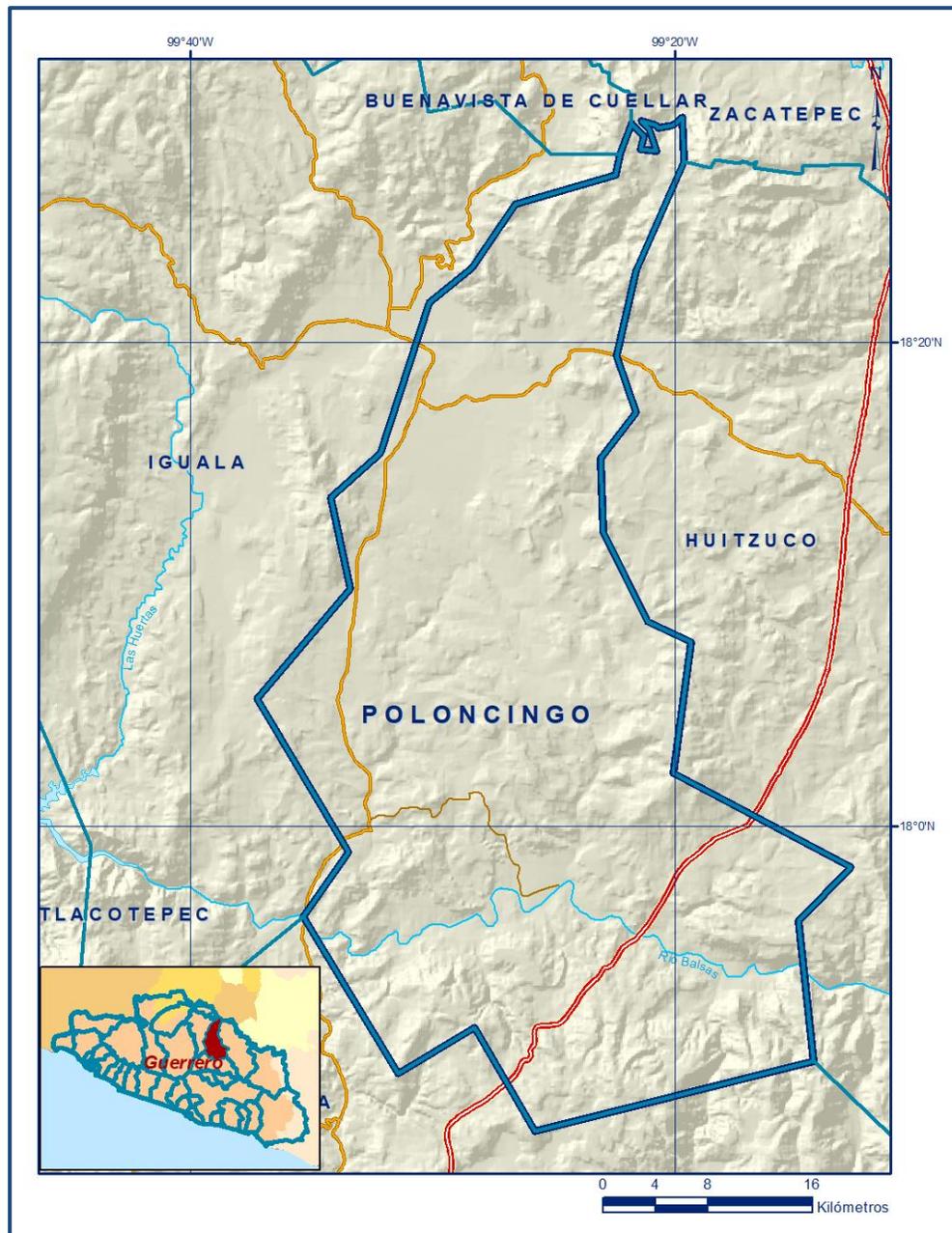


Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 1203 POLONCINGO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	21	48.1	18	29	3.7	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	99	19	39.0	18	27	29.4	
3	99	21	36.4	18	22	59.2	
4	99	22	24.6	18	19	26.8	
5	99	21	37.3	18	17	7.9	
6	99	23	3.7	18	15	13.4	
7	99	22	57.7	18	12	9.6	
8	99	21	8.2	18	8	27.7	
9	99	19	19.8	18	7	37.5	
10	99	20	5.3	18	2	13.2	
11	99	12	44.8	17	58	19.4	
12	99	14	53.8	17	56	5.8	
13	99	14	16.9	17	50	16.8	
14	99	25	47.8	17	47	24.4	
15	99	28	16.4	17	51	42.2	
16	99	31	25.1	17	49	47.4	
17	99	35	21.1	17	56	17.0	
18	99	33	28.8	17	58	56.1	
19	99	37	16.3	18	5	17.7	
20	99	33	25.5	18	9	49.2	
21	99	34	11.8	18	13	36.6	
22	99	32	9.9	18	15	26.9	
23	99	30	8.8	18	21	39.4	
24	99	28	24.2	18	23	5.6	
25	99	26	34.6	18	25	44.6	
26	99	22	28.2	18	26	56.8	
27	99	22	17.0	18	27	47.8	
1	99	21	48.1	18	29	3.7	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Poloncingo pertenece al Organismo de Cuenca Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Guerrero. Su territorio se encuentra parcialmente vedado; la mayor parte de su superficie está sujeto a la disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en los Municipios de Iguala de la Independencia, Taxco de Alarcón, Huitzuc de Los Figueroa, Tepecoacuilco de Trujano y Cocula, Gro.”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 20 de febrero de 1978. Esta veda se clasifica como tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones para usos domésticos.

En los extremos norte y sur no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Poloncingo, clave 1203, se encuentra sujeta 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 Diario Oficial de la Federación 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 uso principal del agua es público-urbano. El acuífero pertenece al consejo de cuenca “Río Balsas”, instalado el 26 de Marzo de 1999. Una pequeña área del extremo norte del acuífero se ubica en el Área Natural Protegida “Sierra de Huautla” decretada el 8 de Septiembre de 1999. En el territorio que cubre el acuífero no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios hidrogeológicos de evaluación a nivel regional, así como mediciones piezométricas. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL Y DE PROSPECCIÓN GEOHIDROLÓGICA EN LA ZONA DE IGUALA-COCULA, ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por EXYCO, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) en 1988.

Su objetivo principal consistió en determinar y evaluar las condiciones geohidrológicas que gobiernan la ocurrencia del agua subterránea, proponer un modelo hidrogeológico e identificar las zonas más adecuadas para la perforación de pozos exploratorios. Recomienda realizar estas perforaciones en los anticlinales Apipilulco y Metlapa.

MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS DE HUITZUCO, POLONCINGO, CHILAPA Y CHILPANCINGO, ESTADO DE GUERRERO, realizado por Laramide Ingenieros, S.A. de C.V. en 2005, para la Comisión Nacional del Agua. Los objetivos principales de estos trabajos consistieron en definir la red de pozos pilotos en estos acuíferos para realizar mediciones piezométricas y de calidad del agua (conductividad eléctrica temperatura y sólidos totales disueltos); así como conocer la posición de los niveles del agua subterránea mediante la elaboración de mapas de profundidad y elevación del nivel estático.

Con esta información y la que se refiere a las determinaciones *in situ* de parámetros hidrogeoquímicos, propone el modelo de funcionamiento hidrogeológico de estos acuíferos. En el acuífero Poloncingo registra la existencia de 22 aprovechamientos: 14 pozos, 7 norias y 1 manantial.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS TLAPA-HUAMUXTITLÁN, POLONCINGO, BUENAVISTA DE CUÉLLAR Y TLACOTEPEC, EN EL ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo S.A DE C.V., para la Comisión Nacional del Agua en 2011. El objetivo general de este estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos, 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, pruebas de bombeo, nivelación de brocales, sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincia Cuenca Balsas-Mezcala.

Esta subprovincia limita al norte con la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico y al sur con la subprovincia de la Vertiente del Sur, perteneciente a la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur.

La Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja, se encuentra constituida por una serie de montañas y sierras que presentan grandes desniveles. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte meridional, donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm. Es una cadena montañosa localizada en el sur de México que se extiende a lo largo de 1,200 km, desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Está orientada de manera paralela a la costa del Océano Pacífico y a la porción occidental del Eje Neovolcánico, del que es separada por la Depresión del Balsas.

El Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur se enlazan en el norte de Oaxaca, en el Escudo Mixteco. Su altitud media es de 2,000 msnm, el punto más alto es el cerro Quie Yelaag que está a una altura de 3,710 msnm, en el sur de Oaxaca.

En el occidente, esta sierra empieza como Sierra del Alo en los municipios de Tecalitlán y Pihuamo en Jalisco, posteriormente atraviesa Michoacán, donde se le conoce como sierra de Coalcomán. Después de cruzar el Río Balsas, entra al occidente de Guerrero donde se le conoce como Cumbres de La Tentación. Atraviesa todo Guerrero y en sus límites con Oaxaca es conocida como Sierra de Coicoyán. Es atravesada por numerosos ríos, los cuales forman profundos cañones, principalmente en Guerrero, donde las partes altas son conocidas como filos.

La Subprovincia Cuenca Balsas-Mezcala 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 3000 m de altura dándole a esta cuenca una topografía muy abrupta” (Raisz, 1964). En general presenta calizas y conglomerados en sus partes altas 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.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación hecha por Köppen, adaptada por E. García para las condiciones de la República Mexicana, predominan en la región los climas semicálido subhúmedo (A) C(wo) y cálido subhúmedo Aw1 y A)C(wo) en las regiones de mayor elevación topográfica.

En menor proporción, se presenta el clima semiárido cálido BS1 (h')w al sur del acuífero, en una franja que rodea al Río Balsas. En todos ellos la temperatura promedio es mayor a 22 °C, con régimen de lluvias en verano 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 4 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Iguala, Laguna de Tuxpan, San Juan Tetelcingo y Tonalapa del Sur, cuyo registro comprende un periodo de 57 años (1953 a 2010). Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **905 mm y 25 °C** respectivamente.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra dentro de la Región Hidrológica No.18 "Río Balsas", Subregión Hidrológica Medio Balsas, cuenca del Río Balsas-Mezcala; delimitada por las Sierras Madre del Sur y Juárez, así como por el Eje Neovolcánico, tiene la forma de una depresión muy alargada con valles muy angostos, cuyo territorio está formado en su mayor parte por elevaciones con fuertes pendientes y un arreglo geológico poco propicio para el control y almacenamiento de los escurrimientos.

El área del acuífero se encuentra comprendida dentro de la subregión Medio Balsas y en la cuenca hidrológica del Río Balsas-Mezcala, que es uno de los ríos de mayor extensión y caudal del país.

La cuenca de drenaje del Río Balsas comprende el 6% de la masa continental del territorio mexicano y abarca porciones de 8 estados del país: Estado de México, Tlaxcala, Puebla, Oaxaca, Morelos, Guerrero, Michoacán y Jalisco.

Su superficie hidrológica total es de 117,406 km², distribuida en tres subregiones: Alto Balsas 50,409 km², Medio Balsas 31,951 km² y Bajo Balsas 35,046 km². En su territorio existen dos ríos perennes Balsas y Tepecoacuilco.

El Río Balsas se conoce localmente como Río Mezcala; ingresa al acuífero por su extremo oriental y lo recorre de este a oeste, pasando por las comunidades de Ahuetlixpa hasta San Francisco Ozamatlán, en donde recibe el aporte del Arroyo Texopilco, siguiendo con su trayectoria pasa por San Miguel Tecuiciapan, San Agustín Oapan, San Marcos Oacatzingo, San Juan Tetelcingo y finalmente se une con el Río Tepecoacuilco y salen del área del acuífero a la altura de la comunidad Colonia Valerio Trujano y Mezcala.

El Río Tepecoacuilco nace en los límites septentrionales del acuífero y en sus orígenes se conoce como Arroyo El Zapote; inicia con un régimen intermitente hasta llegar a una pequeña presa llamada El Apache, aguas abajo pasa por la margen izquierda de la zona urbana de Tlaxmalac y adquiere los caudales de los arroyos Atexca y Xalarepara, en donde adquiere su régimen perenne y el nombre de Río Xihuatotla; para posteriormente almacenar sus aguas en el vaso de la presa Valerio Trujano donde es utilizada para la generación de energía eléctrica, sigue su trayectoria con el nombre de Río Tepecoacuilco, pasando por las localidades Barrio de San Gabrielito y Barranca Colorada donde se suma el caudal del arroyo La Víbora, siguiendo el cauce del río este recorre las localidades Rincón de La Cocina, Acayahualco, Las Tunas, Xalitla y finalmente confluye al Río Balsas.

3.4 Geomorfología

El área del acuífero presenta distintos rasgos geomorfológicos entre los que destacan las sierras, barrancas profundas y valles intermontanos. Las laderas de las barrancas y valles definen pendientes mayores de 35%.

Las sierras están representadas por elevaciones máximas de poco más de 2,500 msnm que se asocian con las zonas de cabalgaduras, pliegues anticlinales y al emplazamiento de rocas intrusivas y volcánicas. Las cabalgaduras y pliegues fueron originados durante la deformación compresiva de la Orogenia Laramide, evento tectónico que generó el plegamiento de las carpetas sedimentarias mesozoicas.

Por otra parte, de manera menos trascendente, la actividad ígnea extrusiva e intrusiva, ocasionó modificaciones en el relieve asociado al plegamiento, en donde estos procesos exógenos (vulcanismo) y endógenos (intrusiones) rejuvenecieron las características topográficas de la región en donde ocurrió su emplazamiento, configurando la unidad geomorfológica de sierras.

El factor litológico también tiene implicaciones directas en la presencia de los contrastes geomorfológicos: las rocas competentes (calizas, conglomerados, areniscas, andesitas, riolitas, granitos y rocas metamórficas) tienen un comportamiento más resistente a los agentes erosivos y tienden a configurar patrones de drenaje de tipo sub-paralelo y paralelo; en tanto que las rocas incompetentes (representadas por las secuencias tipo flysch de lutitas y areniscas, o bien, lutitas y margas), así como por la secuencia de tobas y materiales piroclásticos asociados con un vulcanismo explosivo (flujos de piroclastos, depósitos de caída); se encuentran bien caracterizadas por el desarrollo de un sistema de drenaje dendrítico, derivado de la gran facilidad con que son erosionadas. Los sistemas de fracturas y fallas ejercen también influencia dentro de la formación de depresiones, cañadas y barrancas derivados del rompimiento súbito de la continuidad longitudinal de fragmentos homogéneos y su disección lineal.

El paisaje geomorfológico que exhibe la región es consecuencia principalmente de las estructuras plegadas, que ocasionaron el engrosamiento estructural asociado con fallas de cabalgadura y pliegues anticlinales y sinclinales, en donde los altos topográficos (sierras) corresponden con cabalgaduras y anticlinales y los bajos estructurales conforman valles y lomeríos que se alojan en los anticlinales.

4. GEOLOGÍA

A nivel regional, las diferentes unidades litológicas comprenden rocas metamórficas, sedimentarias marinas tanto de plataforma como de cuenca, rocas ígneas extrusivas y en menor proporción rocas ígneas intrusivas, las cuales en ocasiones se encuentran en contacto ya sea por medio de fallas de cabalgadura o bien por fallas laterales inversas, que le confieren una gran complejidad estructural. En la figura 2 se presenta la geología regional del acuífero.

Desde el punto de vista de los Terrenos Tectonoestratigráficos, definidos por Campa y Coney (1983), el acuífero pertenece a los Terrenos Guerrero y Plataforma Morelos-Guerrero (cubierta del Terreno Mixteco).

Con la información recabada en los últimos años, tanto en la Plataforma Morelos-Guerrero-Morelos como en la Cuenca de Tlaxiaco, las interpretaciones geológicas originales se han replanteado en cuanto al origen, desarrollo y evolución tectónica.

No obstante que existen dos modelos conceptuales de la zona; uno propuesto por Cserna y otro por Campa, ambos coinciden en cuanto a las series sedimentarias de la Plataforma (Campa *et. al.*, 1981) pero difieren sustancialmente en cuanto a la interpretación de la relación que guardan entre sí los terrenos localizados al poniente y norponiente de la zona, ya que Cserna los relaciona principalmente por cambios de facies y Campa por contactos tectónicos y gran movilización.

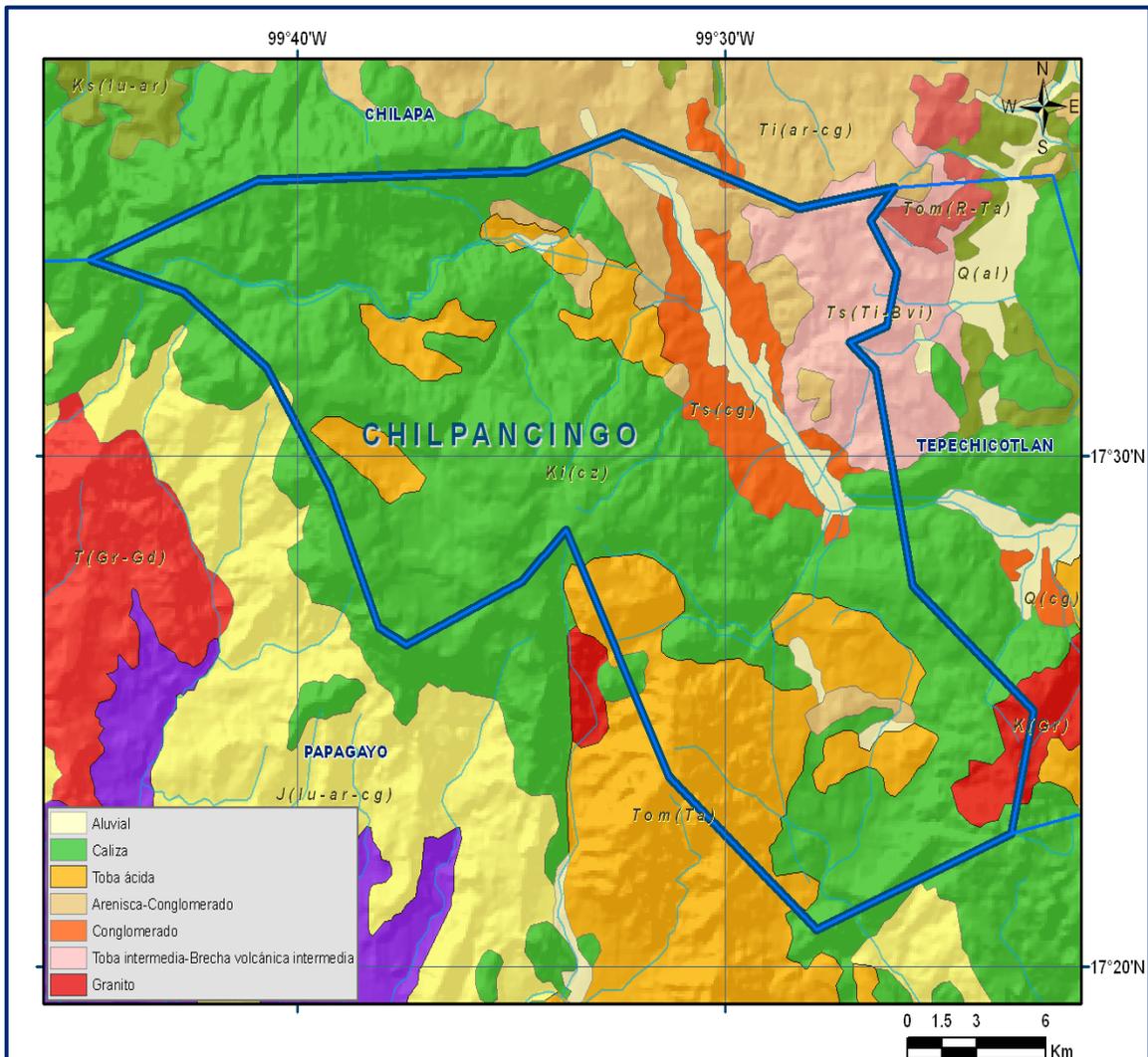


Figura 2. Geología general del acuífero

Las rocas de mayor distribución comprenden las depositadas durante el Cretácico Temprano en una cuenca sedimentaria somera, lo que originó el desarrollo de un extenso depósito de calizas de plataforma, conocida como Plataforma Guerrero-Morelos (Fries, 1960).

Aunque en la superficie cubierta por el acuífero no aflora a base de la columna sedimentaria, las rocas más antiguas corresponden a evaporitas que afloran al NE, en el área de Huitzucó y calizas arcillosas de la Formación Chilacachapa, a las que se les asigna la misma edad correspondiente al Cretácico Inferior.

4.1. Estratigrafía

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias marinas, continentales y lacustres, cuerpos intrusivos y rocas volcánicas, así como depósitos aluviales, cuyo registro estratigráfico comprende del Cretácico Inferior al Reciente. A continuación, se presenta la descripción de cada una de ellas, de la más antigua a la más reciente.

Cretácico Inferior

Formación Chilacachapa

Definida formalmente por Campa (1976), representan las rocas más antiguas que afloran debajo de la Formación Morelos. Está conformada por calizas arcillosas de estratificación delgada y color oscuro que afloran en el núcleo del Anticlinal Chilacachapa. Se encuentran fuertemente plegadas y contrasta su deformación con la que muestra las calizas de la Formación Morelos, debido a que esta última es más competente.

Forman lomeríos alineados que en ocasiones muestran pendientes abruptas; ocasionalmente se presentan coronadas por crestones calcáreos de la Formación Morelos. La edad de esta formación fue asignada por Ontiveros (1973) como Aptiano Superior, basado en relaciones estratigráficas y en microfauna.

Anhidrita Huitzucó

Definida formalmente por Cserna (1980) para referirse al miembro inferior, de facies lagunares, de la Formación Morelos originalmente subdividida por Fries (1960). Está conformada esencialmente de anhidritas, así como por eventuales capas delgadas de dolomías; los sulfatos en afloramientos intemperizados, se presentan como yesos.

Al fresco, la roca es de color blanco y muestra generalmente un bandeamiento gris oscuro con espesor laminar; debido a su carácter plástico presenta estructuras boudinage.

Aflora principalmente en la región comprendida entre Huitzucó y Tlapala, donde está relacionada con yacimientos de mercurio y antimonio. También se presenta en la porción occidental del valle de Poloncingo y al oriente de Apipilulco, en donde ha sido explotada como banco de materiales para la elaboración de yeso.

Dado que los yesos son muy solubles, fácilmente son atacados por el agua y desarrollan una topografía típica de carst. No se observó su contacto inferior, pero se supone que en esta área es discordante con rocas precretácicas sepultadas. El contacto superior, con la Formación Morelos, es transicional, pero también puede ser tectónico o por intrusión.

Por su posición estratigráfica, Fries le asigna una edad Albiano Inferior; sin embargo, Cserna establece la posibilidad de que su alcance estratigráfico inferior pueda extenderse hasta el Aptiano en algunos sitios.

Se correlaciona con la Formación Zicapa en los estados de Puebla y Oaxaca, con la cual se interdigita, y con la Formación Amatepec, hacia el poniente, así como con la Formación Chilacachapa, con la que también se interdigita.

Formación Morelos

Nombre propuesto por Fries (1960) para referirse a una secuencia de calizas de plataforma. De acuerdo con Campa (*op. cit.*), se caracteriza por estar conformada por calizas en estratos delgados con bandas y lentes de pedernal negro, bancos arrecifales y capas gruesas de calizas de color gris claro, crema y gris oscuro, las cuales en muchos casos tienden a formar biostromas, con predominio de rudistas.

Su espesor es desconocido; sin embargo Tarango, (1973) midió 1430 m, en tanto que Fries, (1960) reportó un espesor 900 m. De acuerdo con su contenido faunístico, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Subyace por medio de un contacto concordante a las rocas de la Formación Mezcala y se encuentran cabalgadas por las rocas del Subterreno Teloloapan, por medio de un contacto tectónico.

Se correlaciona en edad con las formaciones Cipiapa y Orizaba de la porción central de Puebla, con la caliza El Doctor de Querétaro oriental, en el Estado de San Luis Potosí con las formaciones El Abra y Tamaulipas Superior (en la Sierra Madre Oriental).

Formación Cuautla

Nombre propuesto por Fries en 1960, quien propone a las inmediaciones de la Ciudad de Cuautla como localidad tipo de una caliza que consta de tres facies principales: Facies de banco calcáreo o “bahamita”, capas de calizas laminadas de estratificación delgada a media con nódulos y bandas de pedernal; por último, una sucesión muy delgada de capas de caliza clástica de estratificación delgada a mediana.

Las dos primeras facies presentan características muy similares a las de la Formación Morelos, pero menor desarrollo de carsticidad; la tercera facies se presenta como interestratificaciones de caliza arcillosa y margas en estratos delgados a laminares de color gris claro a oscuro.

Su contacto inferior con la Formación Morelos tanto Fries que la definió, como Cserna, indican que en algunos sitios está marcado por un conglomerado basal, mientras que en otros resulta difícil definirlo con precisión. Lo cierto es que ambas formaciones se encuentran separadas por un hiatus durante del cual la cima de la Formación Morelos quedó levemente truncada por una superficie de erosión.

Su contacto superior es siempre transicional con el flysch de la Formación Mexcala, que la sobreyace. Por su contenido faunístico Fries le asignó una edad Cenomaniano Tardío-Turoniano Tardío. Se correlaciona con la Formación Petlalcingo de la porción suroccidental de Puebla y Oaxaca, al occidente de Puebla con las formaciones Escamela y Maltrata; en la porción central del Estado de Querétaro con la Formación Soyatal, mientras que en los estados de Hidalgo y San Luis Potosí se correlaciona con la Formación Agua Nueva.

Formación Mexcala

Definida por Fries en 1960 quien la describe como una secuencia de intercalaciones de lutitas calcáreas y areniscas. Tiene una amplia distribución, aflora en los valles formando sinclinales o en los flancos de anticlinales. Los sitios donde muestra sus más amplios afloramientos son los valles sinclinales Balsas-Tonalapa. Representa un flysch calcáreo que evidencia la interrupción del patrón de sedimentación de las calizas de plataforma de la Formación Morelos, a la cual sobreyace de manera concordante.

En el área del acuífero presenta tres miembros: inferior calcáreo-arcilloso, medio arcilloso y superior areno-arcilloso, en los cuales cambia gradualmente de granulometría fina a gruesa. Su espesor total se desconoce; sin embargo, en el valle de Iguala, se considera del orden de 200 a 400 m, mientras que al sur, Bonnenberger (1955) reportó una sección incompleta de 1220 m en su localidad tipo. Descansa sobre la Formación Cuautla en contacto transicional, aunque hacia el oriente, Pantoja-Alor (in Cserna *op. cit.*) reporta que descansa con ligera discordancia sobre la Formación Cuautla.

Su contacto superior es siempre en discordancia angular y/o erosional con rocas más jóvenes; le cubren indistintamente las formaciones Tetelcingo, Grupo Balsas y Oapan principalmente, así como aluviones y conglomerados recientes. Su edad parece tener límites variables dependiendo de la localidad. La base varía entre Turoniano Tardío y Coniaciano Temprano.

Se ha podido establecer que su alcance estratigráfico superior es más amplio de oriente a poniente, es decir que mientras al poniente se restringe al Coniaciano, en la parte central de la cuenca de depósito la acumulación continuó hasta el Maestrichtiano (Cserna *et. al., op. cit.*). Esta relación puede indicar que la línea costera del Cretácico Tardío migró con el tiempo de oeste a este como consecuencia del levantamiento y la retirada de los mares hacia el oriente. Se correlaciona con la porción superior de la Formación Escamela Superior de la porción centro-oriental del Estado de Puebla; en la porción oriental de Querétaro y centro occidental de Hidalgo, y con la Lutita Méndez; al sureste de San Luis Potosí con la Formación San Felipe.

Formación Tetelcingo

Nombre propuesto por Ortega Gutiérrez (1980) para referirse a una secuencia de tobas brechoides, brechas volcánicas y coladas de edad Maestrichtiano que fueron inicialmente incluidas por Fries (1960) dentro del Grupo Balsas, como facies volcánicas. La localidad tipo se estableció a 5 km aguas abajo, sobre el Río Balsas, en la población de San Juan Tetelcingo, en el Cerro Coamanco.

Su espesor total es incierto debido a la erosión; sin embargo, se han medido espesores incompletos de 400 m por Ortega y de 530 m por Aguilera y Palacios (1983); otros autores estiman un espesor completo de 1000 m.

Descansa en discordancia angular y erosional sobre la Formación Mezcala y a su vez se encuentra cubierta, también por discordancia, por la Formación Oapan.

La relación estructural que guarda con el Grupo Balsas es incierta, por un lado Ortega la separa de dicho grupo estableciendo que pudiera ser discordante, mientras que Aguilar y Palacios mencionan que se interdigitan en la zona comprendida entre Xalitla y Amayaltepec. Su edad fue establecida en el Maestrichtiano por J. E. Harakal, por el método de K-Ar, lo cual implica un vulcanismo explosivo al final del Cretácico Tardío, cuando aparentemente ya habían cesado los esfuerzos comprensivos de la Orogenia Laramie y la región se encontraba emergida.

Cenozoico. Terciario

Grupo Balsas

Nombre asignado por Fries (1960) para referirse a una secuencia continental constituida principalmente por conglomerados, calizas lacustres, arcosas, areniscas y limolitas, así como brechas volcánicas, tobas y lavas que se presentan en la cuenca del Río Balsas. Más tarde Ortega (*op. cit.*) separa del grupo a una unidad vulcanoclástica constituida por tobas, brechas volcánicas y lavas, que aflora en el área de San Juan Tetelcingo. En el área está constituido por un conglomerado polimíctico que incluye clastos de caliza, arenisca, rocas metamórficas, rocas volcánicas y cuarzo, incluidos en una matriz limo-arenosa de color rojo. Aflora generalmente en bajos topográficos formando amplios valles en las faldas de las sierras.

Aunque puede dividirse en varios miembros o formaciones, en la zona se presentan dos miembros distintivos: el inferior es conglomerático y compacto; mientras que el superior es de carácter limo-arcilloso, semicompacto y suave. Representa una sedimentación molasse postorogénica. Los materiales finos se presentan en estratos delgados en tanto que los conglomerados se disponen en capas gruesas y bancos masivos. Campa (*op. cit.*) reporta que dada su naturaleza de relleno de valles-fosa, en algunos lugares se ha calculado un espesor de 500 m.

De acuerdo con las relaciones estratigráficas, Fries (*op. cit.*) establece una edad Eoceno Tardío-Oligoceno Medio; sin embargo, Ortega (*op. cit.*) con base en datación radiométrica obtenida en rocas de la Formación Tetelcingo, sugiere que se amplíe su alcance al Paleoceno-Oligoceno.

No se han encontrado fósiles en estas capas rojas; sin embargo, su edad se establece con base en su correlación con el Conglomerado Rojo de Guanajuato, en donde se fecharon los restos de un roedor del Eoceno Tardío-Oligoceno (Edwards, 1965 y Fries, et. al 1955).

Se correlaciona con el Conglomerado El Morro que aflora en el área de Zimapán y con el Conglomerado Guanajuato que aflora en la porción central del país, así como con las Formaciones Huajuapán, Yanhuitlán y Cuicatlán en el Estado de Oaxaca.

Rocas Ígneas Intrusivas ácidas

Se presentan al sur en ambas márgenes del Río Balsas y en el área comprendida entre las poblaciones El Municipio y Ahuehuepan, en donde se presentan como un dique que afecta a las calizas. Su edad se asignó al Paleógeno debido a que afectan a calizas previamente plegadas de la Formación Morelos.

Rocas Ígneas Extrusivas

El vulcanismo en el acuífero se inicia en el Terciario (Eoceno) y se manifiesta de manera aislada como coladas de lavas, asociadas con rechas volcánicas también de carácter andesítico (SGM, 2000).

Estas rocas son consideradas producto de la actividad de la Sierra Madre Occidental, de tal forma se les ha considerado una edad Eoceno (CRM, 1998). Localmente, se asocian a las formaciones Tepoztlán y Buenavista.

Rocas Volcánicas del Eoceno-Oligoceno y Oligoceno

Estas rocas se distribuyen en el área de manera aislada, manifestando la continuidad de la actividad volcánica.

El vulcanismo continúa siendo de tipo andesítico presentándose en forma de derrames y brechas con algunos niveles dacíticos, la secuencia se encuentra cubriendo de forma discordante a la unidad basal de andesitas y simultáneamente se encuentran sobreyacidas por cuerpos tabulares de dacitas y riolitas; hacia su cima varía a Ignimbritas y riolitas.

La edad reportada para esta secuencia volcánica es del Oligoceno-Mioceno (SGM, 2000).

Riolita Tilzapotla

Con este nombre Fries se refirió a una secuencia de brechas riolíticas que afloran ampliamente en las cercanías de Tilzapotla, al sur del Lago Tequesquitengo y del Río Amacuzac. Sus afloramientos más extensos se presentan al norte y sur de Huitzuco, así como en las inmediaciones de Coacoyula. Su composición varía de riolita a riodacita. Presenta características que varían de un lugar a otro, siendo notable en todos ellos su carácter masivo.

En la zona de Huitzuco se presenta como una toba muy sana de color rosado que muestra ferromagnesianos y cuarzo en una matriz criptocristalina de feldespatos, de espesor masivo; presenta fracturamiento subvertical de orientación oriente-poniente.

En otras localidades se presenta en forma de lavas y tobas de composición dacítica y riodacítica. Su espesor total es variable pero en su localidad tipo es del orden de 240 m. Descansa sobre el Grupo Balsas en contacto aparentemente paralelo, aunque puede ser discordante. También descansa, en discordancia, sobre formaciones más antiguas (Morelos, Cuautla y Mezcala). A su vez está cubierta en discordancia, por la Formación Oapan y por materiales cuaternarios (aluvión y conglomerados). Con base en edades radiométricas, Fries le asignó una edad de Oligoceno Tardío. Se correlaciona con la serie volcánica Xochitepec de la Cuenca de México, así como con el Grupo Pachuca y con las rocas volcánicas Las Espinas del Estado de Hidalgo.

Formación Oapan

El nombre fue utilizado informalmente por Nájera (1965) para las capas lacustres de areniscas tobáceas, yesos y arcillas, que afloran en el Valle de San Agustín Oapan, en ambos márgenes del Río Balsas; su localidad tipo es el Cerro Misuehue. Más tarde, Cserna, et al. (op. cit.) las correlaciona con otros afloramientos de la cuenca del Alto Río Balsas y considera que deben ser incorporadas formalmente como formación. Litológicamente está constituida de areniscas, yesos y calizas lacustres.

Las areniscas forman la base de la formación y son de color verde, de textura fina a gruesa, compuestas por fragmentos de toba (lo cual le da un carácter híbrido), cuarzo, feldespatos, ferromagnesianos y calcita, en una matriz cementada; el espesor de sus capas varía de delgado a grueso, en total presenta aproximadamente 40 m de espesor.

Los yesos descansan sobre las areniscas, su coloración característica es roja, pero varía verticalmente hacia arriba a tonos gris claro, presentan cantidades variables de arcilla que ocasionalmente llegan a ser lutitas rojizas.

La parte superior de la formación se encuentra coronada por capas de caliza lacustre, cubiertas casi totalmente por caliche que protegen de la erosión a toda la secuencia. Descansa en discordancia angular y erosional sobre los conglomerados del Grupo Balsas y solo está cubierta por materiales recientes como caliche y aluviones cuaternarios. Por su litología y extensión, así como por sus relaciones estructurales y estratigráficas, se ha interpretado que su depósito tuvo lugar en una cuenca lacustre formada por un fallamiento en bloques que afectó al Grupo Balsas (Nájera, 1965). Por su posición estructural y estratigráfica se le asignó una edad Mioceno Tardío. Se correlaciona con las Margas Sabana Grande que describió Bonnenberger (1955), al sur del poblado Sabana Grande.

Cuaternario

Conglomerado Reciente

Con este nombre se designa a la unidad litológica constituida por guijas, gravas y bloques rodados, en tamaños de 40 a 60 cm de diámetro, empacados en una matriz areno-arcillosa, semicompactos y en ocasiones débilmente cementados por caliche, que afloran en los flancos calizos que delimitan a los valles.

En general, representan abanicos aluviales y depósitos de talud, producto de la degradación de los cerros calcáreos y, en menor grado, de los materiales que conforman el Grupo Balsas. Su espesor máximo es de 40 m. Cubre indistintamente, en discordancia angular y erosional, a las unidades más antiguas. Por relaciones estratigráficas se les asignó una edad cuaternaria.

Depósitos Aluviales

Corresponden con sedimentos transportados por las principales corrientes fluviales y están constituidos por gravas y arenas, en menor proporción por limos y arcillas; también incluyen acarreo fluvial y, posiblemente, depósitos lacustres recientes. Ocupan las partes topográficamente más bajas, rellenando valles o sobre el cauce de las principales corrientes superficiales. Su espesor es desconocido y variable, se considera que en general varía entre 10 y 20 m; sin embargo, es posible que su máximo espesor de hasta 50 m se presente en la porción central de los valles.

4.2. Geología estructural

El origen de las estructuras geológicas dentro del acuífero tiene un régimen compresivo asociado con la margen pacífica, que dentro de sus principales efectos está la deformación dúctil de la carpeta sedimentaria del Terreno Mixteco, así como la aloctonía y yuxtaposición de una carpeta de materiales vulcanosedimentarios depositada en otro ambiente geológico (Terreno Guerrero).

La geología estructural de la zona donde se encuentra el acuífero está conformada por estructuras plegadas con direcciones que varían entre NNW a NNE, además de fallas y fracturas que desplazan y cortan a las unidades litológicas.

Existen también discordancias que evidencian los cambios y fases tectónicas que afectaron y dieron origen a las cadenas montañosas de la región.

Como rasgos principales se identificaron cinco fallas: Chilacachapa, El Triunfo, Tuxpan, Comaltepec y Xochipala-Tecuaxiapan que separan diferentes sectores; las estructuras plegadas presentan características especiales en cuanto a la orientación de sus ejes o líneas charnelas y morfología, además que definen propiedades geohidrológicas singulares como se indican a continuación.

Entre la Falla Tuxpan y los afloramientos de la Riolita Tilzapotla, las calizas de la Formación Morelos están intensamente afectadas por dolinas y sumideros que evidencian la cercanía de los yesos de la Anhidrita Huitzucó, que también afloran en las cercanías y que corresponderían a las rocas más antiguas de la zona cartografiada (junto con las calizas arcillosas de la Formación Chilacachapa).

La Falla El Triunfo se intersecta con la Falla Tuxpan, al norte de la Ciudad de Iguala, en donde aparentemente la primera termina o es desplazada en sentido izquierdo por la segunda.

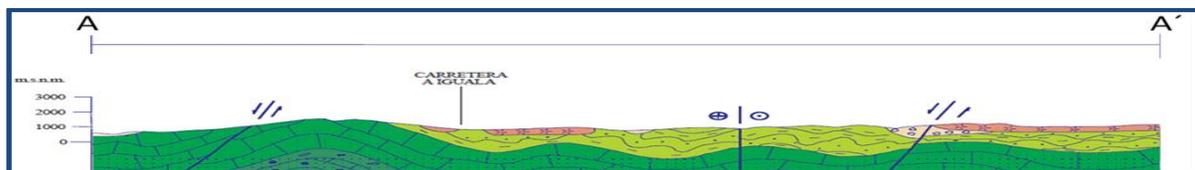
Sin embargo, el efecto que se desarrolla por el desplazamiento transcurrente de estas dos fallas hacia el sur de estas, debe corresponder a una respuesta tensional, provocando un sistema de fallas normales paralelas a las principales que forman un arreglo de Horsts y Grabens, actualmente sepultados por sedimentos de las Formaciones Balsas y recientes en donde se aloja el valle de Iguala.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que se encuentran restringidos a los cauces de los arroyos, así como en las areniscas, conglomerados polimícticos y tobas, que tienen varios cientos de metros de espesor hacia el centro de los valles. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, representadas por las calizas y areniscas de las formaciones Morelos y Mexcala, respectivamente, así como rocas volcánicas, con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución de las calizas.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas, al desaparecer el fracturamiento a profundidad, y por rocas ígneas intrusivas y metamórficas (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera "Chilpancingo" E148. Esc.: 1:250,000 (SGM, 1998)

Figura 3. Sección geológica esquemática

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, constituido, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como areniscas, conglomerados polimícticos, tobas, brechas y depósitos vulcanoclásticos, que presentan un espesor de varias decenas de metros hacia el centro de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas, principalmente calizas y areniscas de la Formación Morelos y rocas volcánicas; todas ellas con permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calcáreas.

Estas rocas pueden presentar condiciones de confinamiento y semiconfinamiento debido a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades de campo realizadas en el estudio de 2011, se ejecutaron 8 pruebas de bombeo de corta duración (2 y 12 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, 7 en pozos y 1 en noria, distribuidos en las zonas de explotación de los valles.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **9.0×10^{-7} a $1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (0.08 s 146.9 m²/d)**. Los valores más altos corresponden a los depósitos granulares gruesos de los cauces de los arroyos y los más bajos a los sedimentos arcillosos. De acuerdo con el espesor saturado la conductividad hidráulica varía de **$8.8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ (0.008 m/d) a $3.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (31.1 m/d)**.

Las pruebas de bombeo no contaron con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento. Para el balance de aguas subterráneas se considera un rendimiento específico de **0.02**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información piezométrica para los años 2005 y 2011. Debido a que en ambas configuraciones del nivel estático no se muestran cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea, únicamente se describen las correspondientes al 2011.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2011 registra valores que varían de 2 a 40 m, aumentando gradualmente a lo largo del cauce de los ríos y arroyos, conforme se asciende topográficamente. Los valores más profundos (20 a 40 m) se registran en la porción occidental del acuífero, en las inmediaciones de la localidad Sabana Grande; mientras que lo más someros (menores de 10 m) se ubican en las inmediaciones de la Presa Valerio Trujano (figura 4).

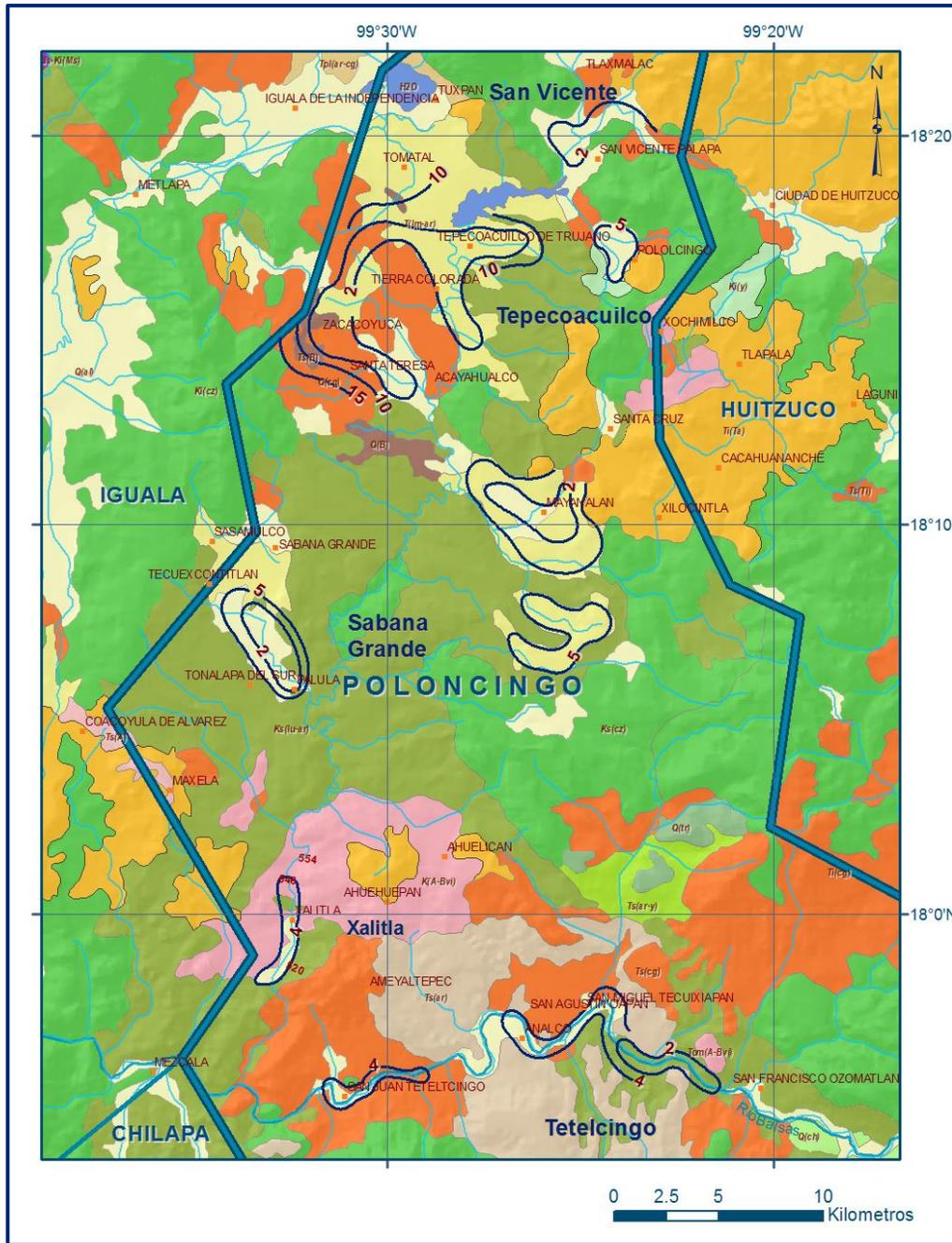


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2011)

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo a la elevación del nivel estático para el año 2011, se registran valores de carga hidráulica que varían de 950 a 478 msnm, decreciendo desde las partes altas del acuífero, mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando las direcciones preferenciales del flujo subterráneo (figura 5).

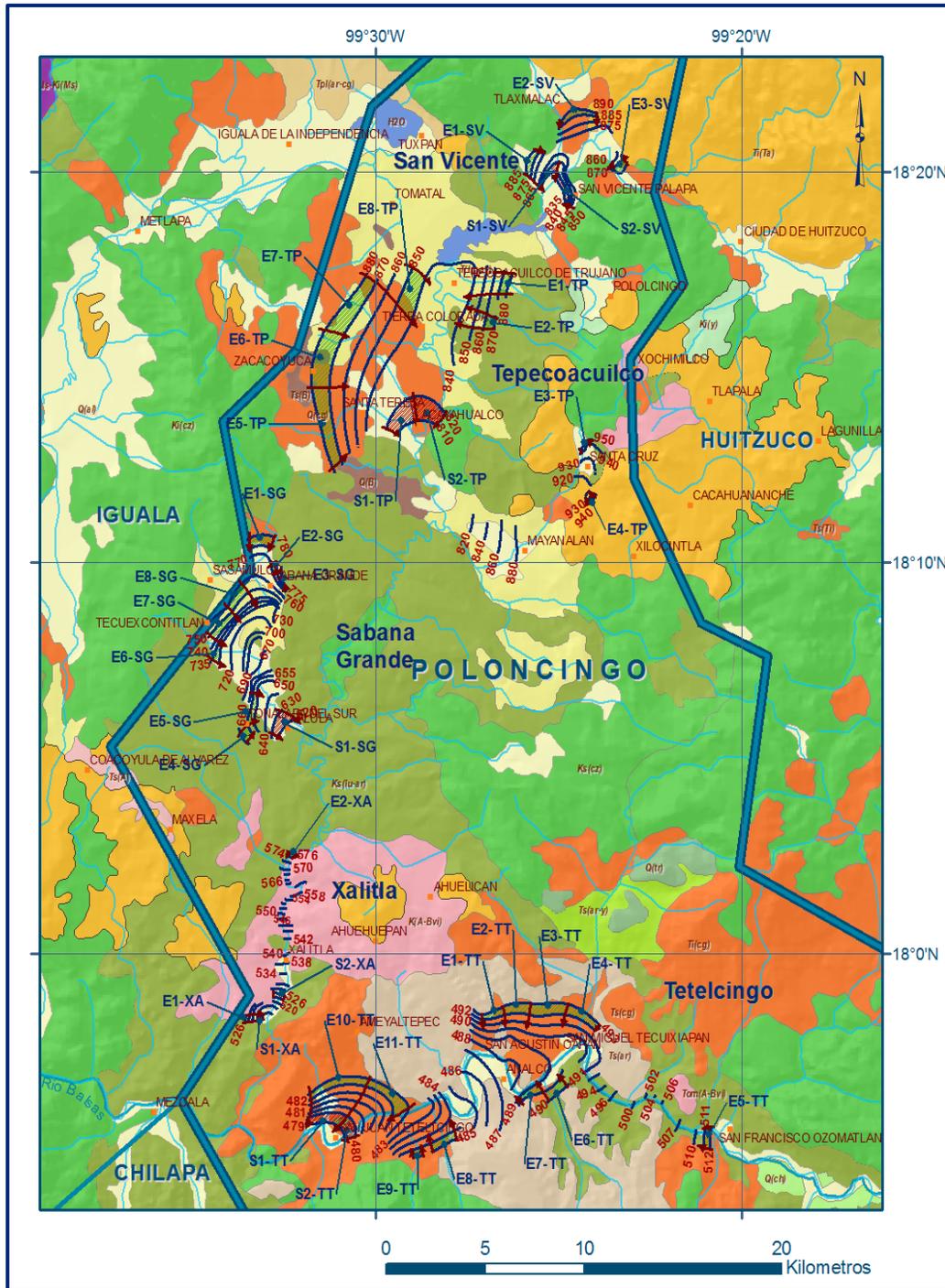


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

Las mayores elevaciones se registran en la porción norte del acuífero, en las zonas de San Vicente y Tepecoacuilco y disminuyen gradualmente hacia la presa Valerio Trujano. Las menores elevaciones se presentan al sur del acuífero, en la zona de Tetelcingo, a lo largo del Río Mezcala.

El flujo subterráneo no presenta ninguna deformación o cono de abatimiento que sea causado por la extracción de los aprovechamientos existentes, sigue manifestando su condición natural, es decir en la misma dirección de los escurrimientos superficiales.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, para el periodo 2005-2011 se registran abatimientos extremos de 3.0 a 0.2 m, que representan un ritmo anual de 0.5 a 0.03 m; sin embargo, para la mayor parte de las diferentes zonas del acuífero el abatimiento varía de 0.6 a 1.0 m, es decir de 0.1 a 0.2 m anuales (figura 6).

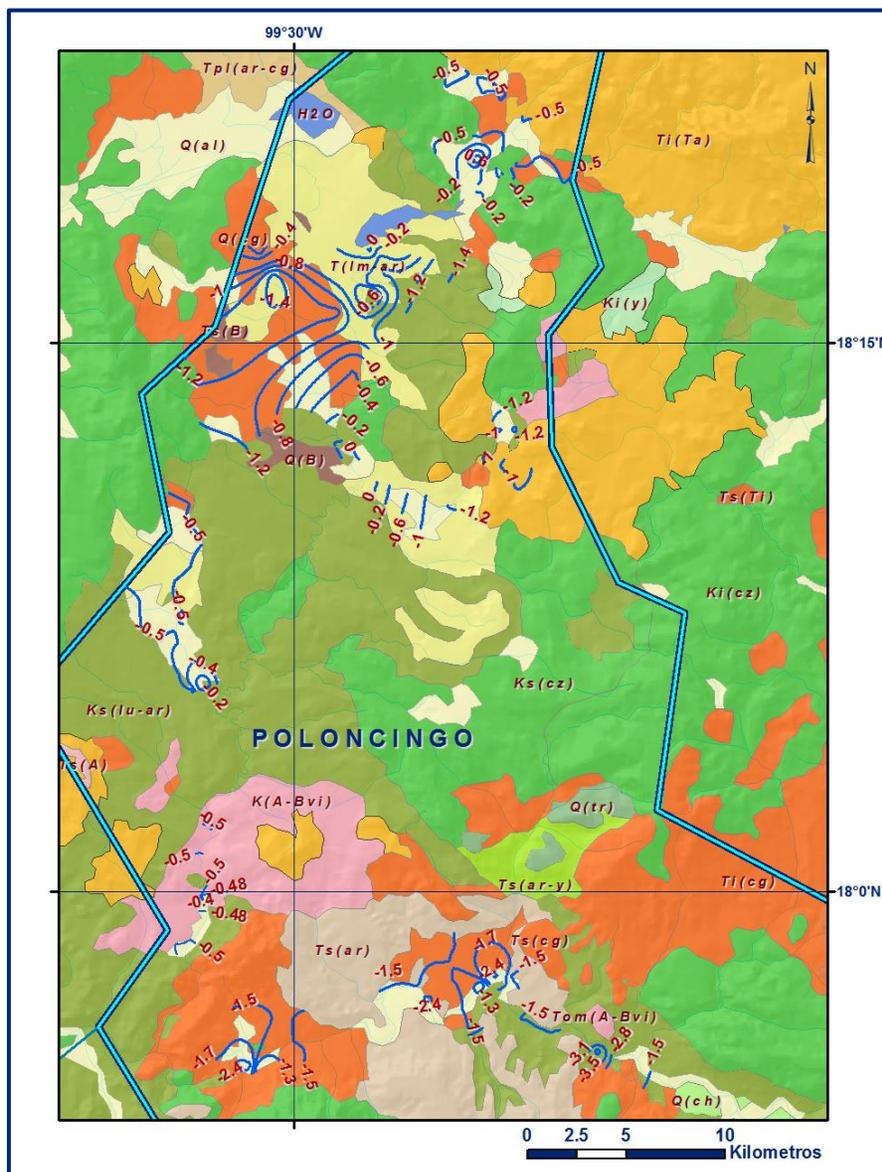


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2005-2011)

No se observan alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción. Por ello, 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.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el 2011, se tomaron 22 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente, 13 pozos, 8 norias y 1 manantial. Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), potencial redox (Eh), nitratos, dureza, sólidos totales disueltos (STD) y dureza total

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la modificación a la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. de STD. La concentración de sólidos totales disueltos varía de 281 a 715 mg/lit, sólo dos muestras superan el límite máximo permisible de 1000 mg/l de STD que establece dicha NOM para el agua potable, relacionadas con la presencia de yesos. Los valores de conductividad eléctrica varían de 530 a 1170 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como la familia dominante a la sulfatada-cálcica, que refleja la importante presencia de unidades evaporíticas y calcáreas

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2011, se registró la existencia de 74 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 32 son pozos, 36 norias y 6 manantiales, de estos aprovechamientos 59 son activos y 15 inactivos.

El volumen de extracción conjunto se ha estimado en **2.7 hm³ anuales**, de los cuales 2.5 hm³ (92.6%) se destinan al uso público-urbano y 0.1 hm³ (3.7%) para uso doméstico-pecuario y 0.1 hm³ (3.7%) para usos industrial y agrícola.

Adicionalmente, a través de **manantiales** se descarga un caudal de 12 lps, que representa un volumen anual de **0.4 hm³**, destinando en su totalidad al uso público-urbano.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2005-2011, en una superficie de **193 km²** del acuífero, en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos, dividida en 5 áreas: San Vicente (21 km²), Tepecoacuilco (87 km²), Sabana Grande (23 km²), Xalitla (5 km²) y Tetelcingo (57 km²).

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 en el acuífero:

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos de los arroyos, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en la red de distribución de agua potable, constituye otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Para el caso del acuífero Poloncingo, sólo se considera el volumen de las fugas en la red de agua potable debido a que el volumen destinado al uso agrícola es muy pequeño.

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 ($\Delta V(S)$), 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
- D_m :** Descarga a través de manantiales
- ETR :** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$:** 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 el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2011, mostrada en la figura 5.

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:

$$Q = B * i * T$$

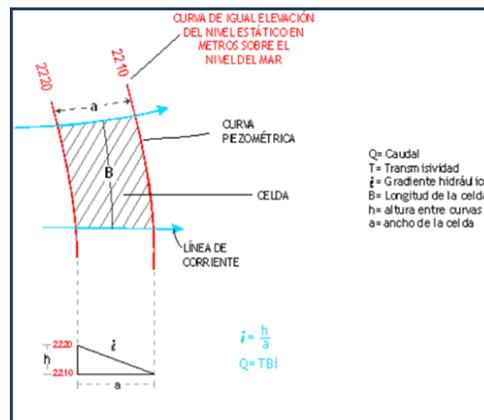
Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

B = Largo del canal de flujo (m);

i = Gradiente hidráulico (adimensional);

T = Transmisividad (m^2/s);



La recarga total por flujo 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 asciende a **3.1 hm³/año**.

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.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h2-h1 (m)	GRADIENTE i	TRASMISIVIDAD T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
SAN VICENTE							
E1	1,365	280	10	0.035714	0.0000872	0.0043	0.13
E2	1,975	220	5	0.022727	0.0001744	0.0078	0.25
E3	940	305	10	0.032787	0.0002616	0.0081	0.25
TEPECOACUILCO							
E4	1,005	380	10	0.026316	0.000030	0.0008	0.03
E5	640	460	10	0.021739	0.0000	0.0007	0.02
E6	625	165	10	0.060606	0.00001	0.0003	0.01
E7	660	175	10	0.057143	0.00001	0.0003	0.01
E29	3,740	655	10	0.015267	0.00008	0.0047	0.15
E30	2,710	910	10	0.010989	0.00003	0.0009	0.03
E31	3,085	755	10	0.013245	0.00004	0.0018	0.06
E32	2,015	870	10	0.011494	0.00001	0.0002	0.01
TETELCINGO							
E8	1,035	305	1	0.003279	0.002	0.0075	0.24
E9	1,722	560	1	0.001786	0.002	0.0068	0.21
E10	1,104	535	0.5	0.000935	0.002	0.0023	0.07
E11	1,175	550	1	0.001818	0.002	0.0047	0.15
E12	1,190	351	0.5	0.001425	0.002	0.0037	0.12
E13	1,280	470	1	0.002128	0.002	0.0057	0.18
E14	1,101	305	1	0.003279	0.002	0.0076	0.24
E15	1,301	385	0.5	0.001299	0.002	0.0037	0.12
E16	516	365	0.5	0.001370	0.002	0.0016	0.05
E17	2,250	590	0.5	0.000847	0.002	0.0044	0.14
E18	2,945	355	0.5	0.001408	0.002	0.0095	0.30
XALITLA							
E19	350	175	2	0.011429	0.001	0.0022	0.07
E20	310	235	2	0.008511	0.001	0.0015	0.05
SABANA GRANDE							
E21	525	530	5	0.009434	0.0000	0.0001	0.00
E22	1,427	280	5	0.017857	0.0000	0.0006	0.02
E23	905	260	5	0.019231	0.0000	0.0008	0.03
E24	1,528	320	10	0.031250	0.0000	0.0023	0.07
E25	1,240	390	10	0.025641	0.0000	0.0015	0.05
E26	850	160	5	0.031250	0.0001	0.0019	0.06
E27	460	245	5	0.020408	0.0001	0.0007	0.02
E28	1,085	520	5	0.009615	0.0001	0.0007	0.02
TOTAL						3.1	

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 que el volumen destinado al uso agrícola es incipiente, no se considera recarga por retornos de riego.

Por otra parte, el rango de pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y de alcantarillado varía, en términos generales, de 20 al 45 %.

Para este caso se consideró que el 15% de los 2.9 hm³ anuales destinados al uso público-urbano (2.5 hm³ de agua subterránea y 0.4 hm³ de agua de los manantiales) se infiltra como recarga efectiva al acuífero. Por lo tanto, la recarga inducida de esta manera es de **2.9 hm³ anuales**.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por flujo subterráneo horizontal (Sh), bombeo (B), a través de manantiales (Dm) y por evapotranspiración de niveles freáticos someros (ETR).

7.2.1 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 para el año 2011 (figura 5). El valor estimado es de **7.9 hm³/año**, tal como se muestra en la tabla 3.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	GRADIENTE i	TRASMISIVIDAD T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
SAN VICENTE							
S1	1,380	230	5	0.021739	0.0001	0.0026	0.08
S2	1,575	205	5	0.024390	0.0001	0.0033	0.11
TEPECOACUILCO							
S3	1,710	885	10	0.011299	0.0008	0.0155	0.49
S4	1,495	965	10	0.010363	0.0008	0.0124	0.39
TETELCINGO							
S5	895	615	1	0.001626	0.041573	0.0605	1.91
S6	1,710	490	1	0.002041	0.041573	0.1451	4.58
XALITLA							
S7	315	250	1	0.004000	0.0004	0.0006	0.02
S8	560	215	2	0.009302	0.0004	0.0023	0.07
SABANA GRANDE							
S9	1,210	540	10	0.018519	0.000333	0.0075	0.24
						TOTAL	7.9

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción por bombeo es de **2.7 hm³ anuales**.

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

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

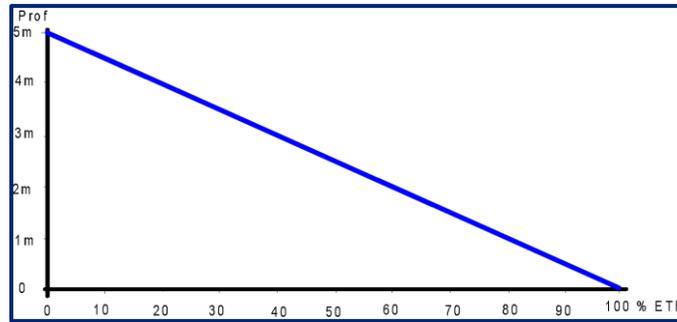
Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real). Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación considerando el valor promedio anual de temperatura (25°C) y precipitación (905 mm):

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

T (°C) =	25		
P(mm) =	905	p ² =	819025
L =	1706.25	L ² =	2911289.0625
ETR (mm)	832.7		

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 evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior.

Tomando en cuenta una superficie de 82 km² en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m y una lámina de evapotranspiración real obtenida de 832.7 mm, de acuerdo con la gráfica anterior le corresponde el 40% de la lámina de ETR obtenida.: $ETR = 82.0 \text{ km}^2 (0.8327\text{m}) (0.4) = 27.3 \text{ hm}^3$.

Por lo tanto, **ETR = 27.3 hm³/año.**

7.2.4 Descarga de Manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, se identificaron 6 pequeños manantiales dentro de la zona, que en conjunto descargan 12 lps, es decir un volumen estimado de **0.4 hm³ anuales.**

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2005-2011 (figura 6). Con base en ella y considerando un rendimiento específico S_y de 0.02, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 193 km², mediante la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento en el período analizado;

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h= Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Tomando en cuenta que en la superficie de balance de 193 km² se registró un abatimiento promedio anual de 0.2 m y un rendimiento específico de 0.02, se obtiene:

$$\Delta V(S) = 193 \text{ km}^2 (-0.2 \text{ m}) (0.02) = -0.8 \text{ hm}^3.$$

Por lo tanto, **$\Delta V(S) = -0.8 \text{ hm}^3$ anuales**

Solución a la ecuación de 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:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + Dm + ETR \pm \Delta V(S) - E_h - R_i \\ R_v &= 2.7 + 7.9 + 0.4 + 27.3 - 0.8 - 3.1 - 0.4 \\ R_v &= 34.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R_t &= R_v + E_h + R_i \\ R_t &= 34.0 + 3.1 + 0.4 \\ R_t &= 37.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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 (R) corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como de recarga inducida. Para el caso del acuífero Poloncingo su valor es de **37.5 hm³/año**.

8.2. Descarga natural comprendida (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 particular, se considera una descarga comprometida de **14.1 hm³/anuales**, que corresponden a la descarga por manantiales y la evapotranspiración, para preservar el ecosistema ribereño.

No se considera comprometido el volumen de las salidas por flujo subterráneo horizontal porque éstas ocurren dentro del acuífero

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **2,516,988 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 37.5 - 14.1 - 2.516988 \\ \text{DMA} &= 20.883012 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **20,883,012 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2011. Estudio Geohidrológico para determinar la disponibilidad de los acuíferos Tlapa-Huamuxtlán, Poloncingo, Buenavista de Cuéllar y Tlacotepec, en el estado de Guerrero. Realizado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1988. Estudio Geológico-Estructural y de Prospección Geohidrológica en la Zona de Iguala-Cocula, Estado de Guerrero. Realizado por EXYCO, S.A