



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL
ACUÍFERO ARCELIA (1209), EN EL 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 REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3. FISIOGRAFIA.....	7
3.1. Provincia fisiográfica.....	7
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrología superficial.....	9
3.4. Geomorfología.....	10
4. GEOLOGÍA.....	12
4.1. Estratigrafía.....	16
4.2. Geología estructural.....	23
4.3. Geología del subsuelo.....	25
5. HIDROGEOLOGÍA.....	26
5.1. Tipo de acuífero.....	26
5.2. Parámetros hidráulicos.....	26
5.3. Piezometría.....	26
5.4. Comportamiento hidráulico.....	27
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	30
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	31
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS.....	31
7.1. Entradas.....	32
7.2. Salidas.....	36
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	39
8. DISPONIBILIDAD.....	40
8.1. Recarga total media anual (R).....	40
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	41
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	41
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	41
9. BIBLIOGRAFÍA.....	43

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 (REPD). 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 Arcelia, definido con la clave 1209 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción noroccidental del Estado de Guerrero, en el límite con el Estado de México; entre los paralelos 18°10' 55" a 18°45' 07" de latitud norte y los meridianos 99°47'03" a 100°31'25" de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 2,701 km². Limita al norte y oeste con el acuífero Altamirano-Cutzamala, al este con Iguala y al sur con el acuífero Tlacotepec, todos ellos pertenecientes al Estado de Guerrero. Al noreste, limita en una porción con el acuífero Tenancingo del Estado de México (figura 1).

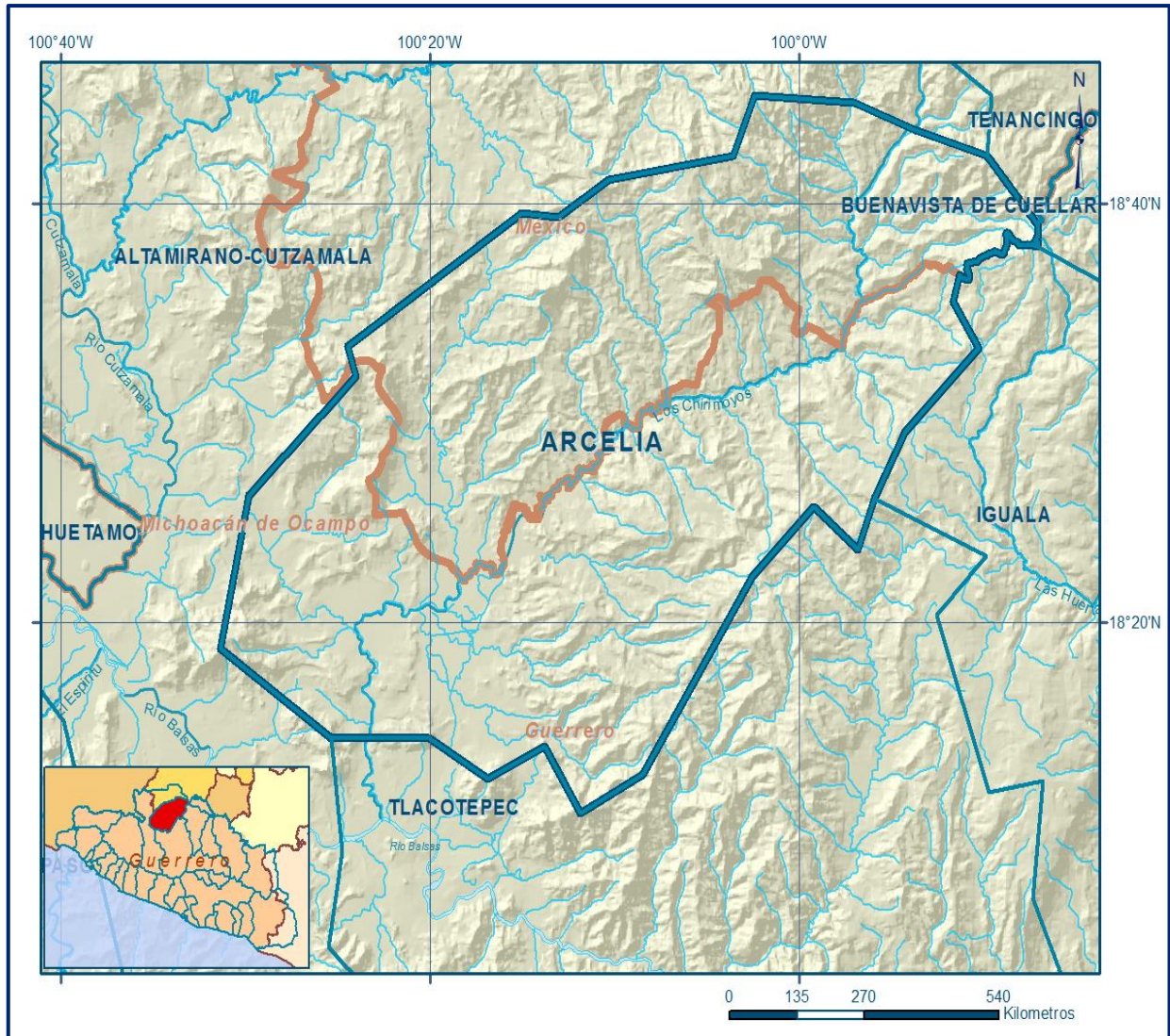


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente comprende en su totalidad el municipio General Canuto A. Neri y parcialmente Arcelia, Tlalchapa, Tlapehuala, Teloloapan y Pedro Ascencio de Alquisiras, pertenecientes al Estado del Guerrero. En el Estado de México abarca la mayor parte del municipio de Tlatlaya y parcialmente Sultepec, Amatepec y Zacualpan.

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 1209 ARCELIA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	51	18	18	36	34.1	
2	99	51	38.9	18	35	19.1	
3	99	50	16.3	18	33	2.8	
4	99	54	15.9	18	29	1.2	
5	99	55	55.8	18	25	55.7	
6	99	56	48.7	18	23	29.8	
7	99	59	10.9	18	25	30.8	
8	100	2	33.6	18	22	8	
9	100	8	30.5	18	12	44.3	
10	100	11	53.3	18	10	54.8	
11	100	13	46.9	18	14	5.4	
12	100	16	53.4	18	12	32.1	
13	100	20	2.7	18	14	30.2	
14	100	25	22.9	18	14	29.6	
15	100	31	22.3	18	18	45.7	
16	100	29	49.3	18	26	2.7	
17	100	24	1.5	18	31	44.1	
18	100	24	28.2	18	33	10.5	
19	100	15	1.3	18	39	31.1	
20	100	13	3.5	18	39	20.8	
21	100	10	18.3	18	41	6.1	
22	100	3	34.5	18	42	14.1	
23	100	2	24.8	18	45	7.2	
24	99	56	59.9	18	44	48.2	
25	99	53	44.7	18	43	29.4	
26	99	49	49.2	18	42	15.5	
27	99	47	2.6	18	38	54.7	DEL 27 AL 28 POR EL LIMITE ESTATAL
28	99	47	6	18	37	57.1	DEL 28 AL 1 POR EL LIMITE ESTATAL
1	99	51	18	18	36	34.1	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Arcelia pertenece al Organismo de Cuenca Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guerrero. Su territorio se encuentra parcialmente vedado, la porción norte, nororiental y noroccidental están sujetas a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro de los límites geopolíticos del Estado de México, que no quedaron en las vedas impuestas mediante Decretos Presidenciales de 7 de diciembre de 1949, 21 de julio de 1954, 10 de agosto de 1965 y 14 de abril de 1975 y Acuerdo presidencial de 11 de julio de 1970”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 10 de julio de 1978. Este decreto es tipo II, que solo permite extracciones para uso doméstico.

En la mayor parte de su superficie no rige ningún decreto de veda para la extracción del agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Arcelia, clave 1209, 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 usuario principal del agua subterránea es el público-urbano. El acuífero pertenece al consejo de cuenca “Río Balsas”, instalado el 26 de marzo de 1999; en su superficie no se localiza Distrito o Unidad de Riego alguna, ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que cubre el acuífero no se han realizado estudios geohidrológicos, sólo se cuenta con trabajos geológicos de alcance regional e información geohidrológica de algunos acuíferos de la región Costa Grande fuera de la zona de estudio.

A continuación, se presenta un resumen de los trabajos consultados:

PROSPECCIÓN Y LEVANTAMIENTO GEOLÓGICO Y GEOFÍSICO EN LA PORCIÓN NORESTE Y ZONA COSTERA DE GUERRERO. Realizado por GEOPE, S.A. en 1977 para la Secretaría de Recursos Hídricos (SRH). El estudio tuvo como objetivo conocer las condiciones hidrogeológicas de los principales valles, así como la distribución y continuidad de los sedimentos lacustres del Cenozoico, la presencia y tipo de acuíferos y la calidad del agua subterránea.

A partir del conocimiento de las distintas zonas, identifica las áreas más adecuadas para la perforación y extracción de agua subterránea. Como parte del estudio se realizaron recorridos hidrogeológicos, censos de aprovechamientos subterráneos, análisis petrográfico y paleontológico de muestras de rocas y toma de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímico.

ROCAS METAVOLCÁNICAS E INTRUSIVOS PALEOZOICOS DE LA REGIÓN DE PETATLÁN, ESTADO DE GUERRERO. Elaborado por Zoltan de Cserna del Instituto de Geología de la UNAM, en 1978. En este estudio se describe la litología de área cercana al municipio de Petatlán, así como los principales rasgos estructurales y el significado geológico regional.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS LA UNIÓN, PETATLÁN Y TECPAN EN EL ESTADO DE GUERRERO. Realizado por Consultoría BETSCO en 2009. Los objetivos principales fueron: Elaborar un censo de captaciones de agua subterránea; determinar el volumen de extracción de aguas subterráneas para los diferentes usos, cuantificar la magnitud de los componentes de la recarga, obtener los valores de los parámetros físicos e hidráulicos regionales, afinar el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero y elaborar el balance hidrometeorológico de los acuíferos.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS CHILAPA, ALTAMIRANO-CUTZAMALA, ARCELIA, PASO DE ARENA Y COAHUAYUTLA, EN EL ESTADO DE GUERRERO. Realizado en 2013 por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S. A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, 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. FISIOGRAFIA

3.1. Provincia fisiográfica

El área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur (Raisz, 1964). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 1991), se ubica en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur; las porciones norte, sur y occidental en la Subprovincia Depresión del Balsas y su extremo oriental en la Subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses.

La Sierra Madre del Sur se originó por el choque de las placas tectónicas Cocos y Norteamericana, está caracterizada por ser un sistema montañoso complejo disectado por corrientes fluviales que en su trayectoria labran valles y llanuras con cañadas, cuyas alturas varían de 150 msnm (presa Infiernillo y la ribera del Río Balsas), hasta 2,650 msnm, en las serranías más elevadas (cerro La Bufa). Se localiza al sur de México y se extiende a lo largo de 1,200 km, desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, con una dirección preferencial de noroeste a sureste; en ella nacen varias corrientes que desembocan en el Océano Pacífico y en su vertiente interior se localizan las cuencas de los ríos Balsas, Verde y Tehuantepec. Es la provincia de mayor complejidad geológica, en ella se encuentran rocas ígneas, sedimentarias y en mayor abundancia rocas metamórficas. Su representación dentro del acuífero se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte meridional, en donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm.

La Subprovincia Depresión del Balsas (o Cuenca Balsas-Mezcala) tiene como límites al norte la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, al sur está bordeada por la Subprovincia Vertiente Meridional, al oeste la Subprovincia Altiplano Septentrional y al este la Subprovincia de la Altiplanicie Oaxaqueña (INEGI, 1991).

Está conformada por *“profundos y sinuosos valles a lo largo de los cuales los ríos Balsas y Tepalcatepec han ido labrando las sierras en algunas partes de 3000 m de altura dándole a esta cuenca una topografía muy abrupta”* (Raisz, 1964). En general en las regiones topográficamente más altas está conformada por calizas y conglomerados que muestran un aspecto redondeado, con drenaje ampliamente espaciado; mientras que, por otro lado, los valles, laderas y partes bajas están constituidas por lutitas, areniscas, limolitas y rocas ígneas que conforman lomeríos con pendientes muy suaves y con un drenaje bien desarrollado.

La Subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses comprende parte de los estados de Guerrero, México y Morelos, separada de la Cuenca del Balsas por el levantamiento metamórfico. Está constituida por clásticos del Jurásico y Cretácico Inferior, Calizas del Cretácico Medio, así como por clásticos, calizas y evaporitas del Cretácico Superior.

3.2. Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para las condiciones de la República Mexicana por E. García, se determina que en la superficie que cubre el acuífero predomina el tipo de clima cálido (A) y A(C) semiáridos con lluvias en verano, con temperatura media anual mayor de 22 °C, porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2%, con algunas variantes que, en orden de importancia son: Aw0(w) cálido subhúmedo, que se registra en la mayor parte del acuífero, en la partes topográficamente más bajas ubicadas en la porción central, hasta las estribaciones de la Sierra Madre del Sur. El clima A(C)w2(w) semicálido subhúmedo se presenta en la zona de transición ubicada en la porción norte, marcando una franja que delimita la porción baja y la de mayor altitud, temperatura media anual mayor de 18°C, del mes más frío menor de 18°C y del mes más caliente mayor de 22°C.

El clima Aw1(w) cálido subhúmedo se caracteriza por la temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C, además presenta precipitación del mes más seco menor de 60 mm. Por último, el clima A(C)w1(w) semicálido subhúmedo se presenta al oriente del acuífero, en la zona de transición, con temperatura media anual mayor de 18°C, del mes más frío menor de 18°C y del mes más caliente mayor de 22°C.

Para la determinación de las variables climatológicas, se cuenta con información de 15 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Arcelia, Nuevo Copaltepec, Tlalchapa, Palos Altos, Acapetlahuaya, San Carlos, El Naranjo, Moctezuma, San Pedro Limón, Corral de Piedra, Tlatlaya, Amatepec, Peña Lisa, La Goleta y San Miguel Totolmoloya; con diferentes periodos de registro, el más completo es 1981-2010. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **1,159 mm y 27.1 °C** respectivamente. En cuanto a la evaporación potencial media, su valor es de **1,850 mm anuales**.

3.3. Hidrología superficial

El Acuífero Arcelia se ubica en la Región Hidrológica 18 “Balsas”, Subregión Hidrológica Medio Balsas, cuencas de los Río Balsas-Zirándaro y Río Cutzamala, delimitadas 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. La superficie de la región hidrológica 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.

El área del acuífero se encuentra comprendida dentro de la subregión Medio Balsas; este río es uno de los ríos de mayor extensión y caudal del país, se conoce también con el nombre local de Río Mezcala. Se localiza en el extremo norte del acuífero y constituye el límite con el Estado de Michoacán. 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.

La cuenca Río Balsas-Zirándaro se encuentra delimitada al norte por las cuencas de los ríos Cutzamala, Tacámbaro y Amacuzac, al sur por Ixtapa, Coyuquilla y Atoyac y al oeste y este por las cuencas Balsas-Infiernillo y Balsas Mezcala, respectivamente. Su extensión asciende a 12,648 km², sus afluentes más importantes son los ríos Poliutla, Ajuchitlán, Tarétaro, Placeres del Oro y Amuco. En su territorio existe tres presas para riego, que son: La Calera, cuyo afluente es el Río Placeres del Oro; la presa La Comunidad alimentada por el Río Ajuchitlán, y la presa Vicente Guerrero que recibe las aguas del Río Poliutla.

La cuenca se encuentra delimitada al norte por las cuencas de los ríos Lerma-Toluca y Pátzcuaro-Cuitzeo; al sur Balsas-Zirándaro; al oeste Tacámbaro y al este la cuenca Río Grande Amacuzac. Su extensión es de 13,730 km². El Río Cutzamala se forma de la unión de los ríos Zitácuaro, que desciende del Eje Neovolcánico en la vertiente occidental de las sierras de Anganguero y Zitácuaro en el estado de Michoacán, y del río Tilostoc que se origina en el Estado de México, a la altura de Valle de Bravo, Méx. En su recorrido final estos dos ríos representan el límite natural entre los estados de Michoacán y Guerrero, cuya confluencia ocurre a una altitud de 425 m.s.n.m.

Después de efectuarse dicha confluencia la corriente resultante se conoce con el nombre de Río Cutzamala que fluyen con una dirección hacia el sur, penetrando en una zona boscosa y de topografía accidentada que condiciona su carácter sinuoso. Pasa por los poblados Cutzamala de Pinzón, Guerrero; 12 km aguas abajo sirve como límite natural entre los estados de Michoacán y Guerrero, conservando esta cualidad política a lo largo de 15 Km hasta su confluencia con el río Balsas, la cual tiene lugar a 5 km aguas abajo de Ciudad Altamirano, Guerrero.

El patrón de la red de drenaje es del tipo dendrítico y sus principales afluentes perennes son el Arroyo Grande o Tlalchapa y el Río Poliutla; ambos son afluentes del Río Balsas.

El Arroyo Grande o Tlalchapa, se origina al nor-noreste del poblado Tlalchapa, en los límites entre los estados de México y Guerrero a una altitud de 500 m.s.n.m. y desciende por la vertiente suroeste del cerro de Quimichitanguio con un rumbo inicial hacia el suroeste, pasando por los poblados Villa Madera, y Tlalchapa, Gro. Confluye al Río Poliutla por su margen derecha en el poblado San Miguel Tecomatlán, Gro., 12 km al oeste de Arcelia, Gro.

El Río Poliutla tiene su origen en la Sierra de Sultepec, en el Estado de México, descendiendo desde una altitud de 2,000 msnm con rumbo suroeste; en su cuenca alta se le conoce con el nombre de Río de La Montaña; a partir del poblado de San Miguel Ostumba representa el límite natural entre los estados de Guerrero y México a lo largo de 40 km aproximadamente, recibe por margen derecha al arroyo Acatempan o Río San Pedro y al Río Arcelia por la margen izquierda; pasa por Cuahulotitlán y San Miguel Tecomatlán Gro, en donde recibe por la margen derecha al Arroyo Tlalchapa y cambia de dirección hacia el sur pasando por Poliutla, Gro., para finalmente 15 km aguas abajo confluir al Río Balsas, por su margen derecha, a 1.5 km al nor-noreste de San Miguel Totolapan, Gro.

3.4. Geomorfología

La identificación de los elementos homogéneos de terrenos a partir de sus características litológicas, origen, edad, drenaje y geometría, permiten definir las unidades geomorfológicas en términos cartográficos.

Las características morfológicas del terreno son de gran importancia en la determinación de los parámetros que controlan el flujo de las aguas superficiales y subterráneas de una región. El paisaje geomorfológico de la zona se caracteriza por estar constituido por sierras, barrancas profundas y valles intermontanos estrechos; las laderas de las barrancas y valles definen pendientes mayores de 35%.

La región debe sus rasgos particulares estructurales y geológicos a la relación con la Placa de Cocos que es una de las más activas. En cuanto a las características geomorfológicas, se presentan diferentes grados de resistencia a la erosión, las unidades de menos resistencia se caracterizan por su morfología en forma de hondonadas y valles, mientras que las que presentan mayor resistencia constituyen las mayores elevaciones. Las rocas de composición riolítica tienen pendientes abruptas y aparecen coronando las mayores elevaciones de la región. Presentan un estado geomorfológico en etapa de juventud temprana con sus drenajes cortando estos relieves.

En general, las sierras muestran poca erosión como lo demuestran los relieves angulosos y abruptos. Los valles están constituidos generalmente por depósitos aluviales y vulcanoclásticos que presentan una topografía madura temprana en la que dominan los relieves planos con algunos lomeríos redondeados de pequeña altitud. En la superficie cubierta por el acuífero se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas:

Sierras Altas. Es la que comprende la mayor superficie dentro del área de estudio, corresponde con una serie de edificios montañosos constituidos por rocas afectadas por un metamorfismo de bajo grado (facies esquistos verdes) cuyo protolito es de rocas sedimentarias y volcánicas, las cuales pueden estar cubiertas por derrames de rocas volcánicas, e intrusionadas por cuerpos porfídicos hipabisales, domos riolíticos y rocas graníticas, que contribuyen a incrementar su relieve. Tiene un origen endógeno y se caracterizan en la imagen por presentar un paisaje geomorfológico constituido por barrancas profundas en donde sus laderas definen pendientes mayores de 35%. Las elevaciones máximas llegan a superar los 2,500 msnm y se asocian con el engrosamiento estructural de las rocas deformadas en las zonas de cabalgadura, a la presencia de pliegues anticlinales y al emplazamiento de rocas intrusivas y volcánicas. El drenaje que presenta esta unidad varía de radial a paralelo y subparalelo y llega a manifestar desniveles de 1,500 a 2,000 m, con respecto al terreno.

Sierras Bajas. Se encuentra ubicada en la franja oriental del área de estudio y está compuesta por una secuencia vulcano-sedimentaria metamorfizada y por rocas sedimentarias que presentan un estado avanzado de deformación, caracterizado por plegamientos y fallas de cabalgadura, estructuras que producen el engrosamiento estructural de la capas sedimentarias y su consecuente incremento en la elevación del terreno.

Su origen es endógeno y está asociado con la deformación compresiva de las rocas, las sierras presentan un característico elongamiento en una dirección sur-norte y alcanzan alturas de 600 a 900 con respecto al nivel del terreno y elevaciones de 1400 a 1600 msnm. Presenta un drenaje que varía de dendrítico en las rocas arcillosas a subparalelo en las rocas metamórficas y calcáreas.

Lomeríos y Valles. Se localiza en lo que geológicamente es una fosa tectónica, denominada Valle de Tierra Caliente. Está constituida por sedimentos aluviales y fluviales, que yacen a una elevación promedio de 400 msnm.

4. GEOLOGÍA

La Sierra Madre del Sur (SMS) está compuesta por bloques corticales distintos, delimitados por fallas principales y caracterizados por conjuntos litológicos diferentes (Campa y Coney, 1983). Con base en las variaciones litológicas, Campa y Coney (1983) y Sedlock et al. (1993) subdividieron la SMS en terrenos tectono-estratigráficos, caracterizados por historias sedimentarias y tectónicas diferentes, que fueron amalgamados sucesivamente, durante el Paleozoico y el Mesozoico, mediante acreciones múltiples, a lo largo de la margen continental pacífica de Norte América.

En la última década, el detalle creciente en la estratigrafía y las estructuras mayores del sur de México ha llevado muchos autores a modificar parcialmente la distribución y la nomenclatura de los terrenos del sur de México (Talavera-Mendoza y Guerrero-Suástegui, 2000; Dickinson y Lawton, 2001; Keppie, 2004; Talavera-Mendoza et al., 2007; Centeno-García et al., 2008). Es por esta razón que la extensión geográfica, el número, los límites y los nombres de los terrenos varían considerablemente dependiendo de los autores.

De acuerdo a la división de terrenos tectonoestratigráficos, la región en la que se ubica el acuífero pertenece al Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983), Subterreno Huetamo, que presenta una cubierta sedimentaria y volcánica generada durante el Cenozoico (figura 2)..

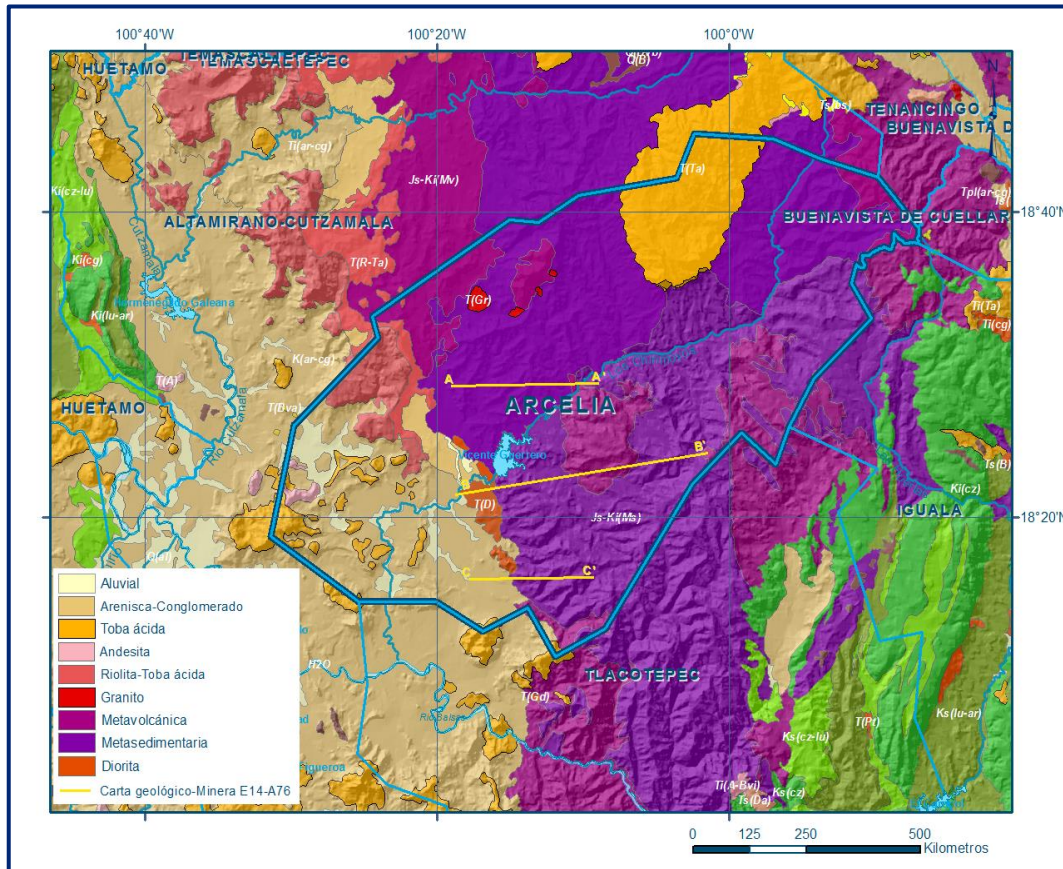


Figura 2. Geología general del acuífero

Las sucesiones vulcano-sedimentarias mesozoicas del Terreno Guerrero que afloran al oeste de la falla Teloloapan han sido comúnmente agrupadas dentro del Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983; Talavera-Mendoza y Guerrero-Suástegui, 2000; Dickinson y Lawton, 2001; Centeno-García et al., 2003 y 2008).

La mayoría de los autores concuerdan en considerar el Guerrero como un terreno compuesto o un super terreno, conformado por un número variable de subterrenos o terrenos, cuyo nombre y distribución varía dependiendo de los diferentes trabajos (Campa y Coney, 1983; Salinas-Prieto et al., 2000; Talavera-Mendoza y Guerrero-Suástegui, 2000; Centeno-García et al., 2003; Talavera-Mendoza et al., 2007; Centeno-García et al., 2008).

De acuerdo con la subdivisión adoptada por Centeno-García et al. (2008), en el sur de México, el Terreno Guerrero está conformado por tres Subterrenos principales que, desde este a oeste, son:

- i.) Subterreno Teloloapan (Subterreno Teloloapan (en Talavera-Mendoza y Guerrero-Suástegui, 2000);
- ii.) Subterreno Arcelia (Subterreno Arcelia-Palmar Chico en Talavera-Mendoza y Guerrero-Suástegui, 2000);
- iii.) Subterreno Zihuatanejo (Subterreno Huetamo-Zihuatanejo en Talavera-Mendoza y Guerrero-Suástegui, 2000).

La superficie del acuífero se localiza en los dos primeros Subterrenos y, de acuerdo con la clasificación de Campa y Coney (1983), la región se ubica también en el Subterreno Huetamo.

El Terreno Teloloapan consta de una sucesión vulcano-sedimentaria marina, desarrollada entre el Titoniano Superior y el Turoniano. El Subterreno Huetamo presenta una geometría ligeramente paralela al Subterreno Arcelia. Tiene un ancho de 80 km por un largo de 150 km. Se estima que su espesor es del orden de 7000 metros (Talavera-Mendoza et al; 1993).

Dada su naturaleza geológica y petrológica, se considera que este terreno representa una cuenca localizada detrás del arco, que se desarrolló sobre una corteza oceánica deformada.

El Subterreno Arcelia está compuesto en su base por rocas de la Unidad Arcelia que afloran en el noreste de la zona. Es un conjunto de rocas volcánicas de origen submarino de composición basáltico-andesítico con intercalaciones de sedimentos silíceos, areniscas y lutitas, con niveles calcáreos, que se encuentran intensamente deformadas y presentan evidencias de metamorfismo de bajo grado en facies esquistos verdes.

El conjunto litológico está conformado esencialmente por una secuencia sedimentaria ligeramente deformada, que consiste en depósitos vulcanoclásticos del Titoniano, conformados por lavas almohadilladas, poco comunes en la base de la secuencia, turbiditas vulcanoclásticas de grano grueso a fino, del Neocomiano, calizas arrecifales y lechos rojos del Aptiano-Albiano.

Son comunes en toda la sucesión litoestratigráfica gruesos depósitos de conglomerados que contienen abundantes bloques de lava.

Los basaltos almohadillados muestran características geoquímicas e isotópicas de series de arco insular intra-oceánico, mientras que los bloques de lava en depósitos conglomeráticos varían de toleíticos en la base a calcoalcalino en la parte media y shoshonítico en la cima (Talavera-Mendoza *et al*; 1993). Su límite septentrional está cubierto por el eje Neovolcánico y los contactos oriental y austral con los subterrenos Arcelia y Zihuatanejo, respectivamente, no se observan por estar cubiertos por depósitos cenozoicos.

En la región dentro de la cual se ubican las diferentes unidades hidrogeológicas estudiadas se manifiesta una diversidad de afloramientos asociados con rocas metamórficas, sedimentarias marinas tanto de plataforma como de cuenca, rocas ígneas extrusivas y en menor proporción rocas ígneas intrusivas, con una evolución sedimentológica independiente y relacionadas ya sea por medio de fallas de cabalgadura o bien por fallas laterales inversas, mostrando la gran dinámica estructural característica de esta región sur del país, con actividad tectónica en la actualidad.

Se considera que las relaciones que guardan esta diversidad de rocas asociadas a cada terreno tectonoestratigráfico definen su evolución dentro de un régimen de deformación compresiva. Es importante resaltar que el Estado de Guerrero está situado el borde sur occidental de la Placa Norteamericana, sitio en donde la Placa de Cocos es subductada bajo la corteza continental.

Durante el desarrollo de este fenómeno a lo largo de la historia geológica se han producido depósitos relacionados con arcos insulares y mares marginales creando secuencias sedimentarias y volcanosedimentarias dentro de un entorno geológico tectónico muy complejo. El Estado de Guerrero se encuentra dividido geológicamente en diferentes terrenos, caracterizados por estratigrafías variadas, pertenecientes a cuencas de depósito, unidades corticales y oceánicas de tamaño, litología, deformación y edad variables; así mismo se han desarrollado durante su historia geológica depósitos relacionados con arcos insulares y mares marginales, originando depósitos vulcano-sedimentarios, sedimentos marinos y continentales (Terrenos Guerrero, Mixteco y Xolapa).

4.1. Estratigrafía

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas intrusivas, volcánicas y metamórficas, cuyo registro estratigráfico comprende del Jurásico Superior al Reciente

A continuación, se describe de manera sencilla las distintas unidades identificadas, de la más antigua a la más reciente en cada uno de los subterrenos.

Subterreno Teloloapan

Jurásico Superior

Esquistos Tejupilco

Nombre asignado por De Cserna (1982) para referirse a una secuencia vulcanosedimentaria con metamorfismo de facies esquistos verdes constituida por pizarras, filitas y horizontes de metacalizas, metatobas y metaareniscas, cuyos afloramientos se encuentran extensamente distribuidos en la porción nororiental del acuífero.

Constituye el basamento de este subterreno y su edad se determinó mediante determinaciones radiométricas de 227.5, 185.3 y 156.3 Ma, realizadas en los depósitos de sulfuros masivos de Tizapa, considerando su naturaleza singenética y que se depositaron dentro de los Esquistos Tejupilco.

Se encuentran sobreyacidos por medio de una falla de cabalgadura por las rocas de la Formación Villa Ayala y a su vez están cubiertas por rocas riolíticas del Cenozoico.

Cretácico

Formación Villa Ayala

Esta formación en acuerdo con Guerrero S. M., (1991) constituye el macizo del arco volcánico insular de Teloloapan; consiste de una secuencia compuesta por flujos de lavas andesíticas, intercaladas con capas medias de areniscas (grauvacas) y estratos delgados de lutitas, materiales líticos que conjuntamente presentan un metamorfismo regional de bajo grado en facies esquistos verdes.

Así mismo de pueden incluir algunas tipos de gravas y también lavas, aglomerados y tobas arenosas.

Las lavas ocurren como derrames andesíticos, los aglomerados son de tipo explosivo y presentan fragmentos de 5 a 12 cm de diámetro embebidos en una mesóstasis vítrea. Las tobas arenosas son de grano fino, se presentan en capas de 5 a 25 cm de espesor, ocasionalmente con pizarras de color negro, donde se emplazó un cuerpo de composición riolítica.

De acuerdo con su posición estratigráfica que guarda con la Formación Amatepec, así como con la fauna de radiolarios que presenta, se le asigna una edad Neocomiano-Aptiano. Se encuentran subyaciendo discordantemente a los Esquistos Tejupilco y están cubiertas concordantemente (?) por las rocas de la Formación Acapetlahuaya.

Formación Acapetlahuaya

El Servicio Geológico Mexicano (2000) menciona que esta unidad fue inicialmente referida como tal, por Campa (1979) y posteriormente fue utilizado por Guerrero (1990). Se encuentra distribuida desde la región centro oriental hasta el límite suroriental del área estudio.

Está compuesta por una secuencia vulcanosedimentaria que se representa una fase de destrucción parcial del arco insular recientemente formado; consiste de metatobas, pizarras, metaareniscas, metalutitas con intercalaciones de metacalizas, así como derrames de rocas volcánicas de composición andesítica y riolítica. Guerrero (op. cit.) reporta además la presencia de cuerpos de conglomerados, brechas volcánicas, grauwacas y pelitas intercalados con la secuencia de tobas.

Se le asigna una edad correspondiente al Aptiano (Campa U.M.F., et al 1974), de acuerdo con la fauna de amonitas y radiolarios que contiene. Su espesor no está definido y se correlaciona con el miembro El Cajón de la Formación Comburindio del Subterreno Huétamo-Arcelia. Se encuentra en contacto tectónico con las rocas de la Formación Miahuatepec, a las cuales sobreyacen por medio de una falla de cabalgadura.

Formación Amatepec

Cubriendo concordantemente a la Formación Acapetlahuaya, esta unidad representa el inicio de una sedimentación calcárea, pero en un ambiente de cuenca. Está formada por metacalizas intercaladas con pizarras laminares y algunos horizontes de areniscas, dispuestas en estratos delgados.

Su edad Aptiano-Albiano se ha establecido con base en *Microcalamioides diversits*, *Calomiela recta* y *Coalcomanaramosi* (Campa et al., 1979 y Guerrero S.M. et al., 1991) Su depósito ocurrió en un medio ambiente de cuenca relativamente profunda. En el extremo suroriental del área aflora una secuencia de calizas de plataforma a las cuales Salinas (1994) las denomina Formación Teloloapan, que se manifiestan como afloramientos aislados.

Formación Miahuatepec o Pachivia

Esta Formación establece la interrupción de la sedimentación calcárea y se caracteriza por estar constituida por una secuencia tipo flysch, consistente de intercalaciones rítmicas de areniscas y lutitas, con evidencia de metamorfismo de bajo grado, con horizontes calcáreos intercalados y tobas que evidencian actividad volcánica. Aflora en una franja orientada en sentido norte-sur en el extremo occidental del área de estudio, en donde sobreyace por medio de una falla de cabalgadura a las rocas de la Formación Morelos, unidad que forma parte del Terreno Mixteco.

Subterreno Huetamo-Arcelia.

Cretácico

Formación Arcelia

Nombre informal que asigna el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2000) a una sección litológica vulcanosedimentaria constituida con lavas almohadilladas de composición basáltico-andesítica y horizontes de brechas volcánicas, sedimentos silíceos, arcillo-arenosos y en menor proporción calcáreos.

Se presentan cuerpos básicos y ultrabásicos con edades radiométricas de 79 y 79.7 Ma determinadas en gabros y de 101 y 92 ma en basaltos (Ortíz H.I. F., et al, 1991 y 1992; Elías H.M., et al., 1992 y 1993). Por fauna de radiolarios Salinas P.J.C., (1994) le asignó una edad correspondiente al Valanginiano-Albiano.

Aflora en la porción central y centro septentrional del acuífero en donde están en contacto tectónico con las rocas de la Formación Miahuatepec del Subterreno Teloloapan, a la cual sobreyace mediante una falla de cabalgadura. Se correlaciona con la Formación San Lucas que aflora en las inmediaciones de la Ciudad de Huetamo y en el extremo NE del área, a la cual Pantoja (1990) y Salinas (1994) le asignan un rango estratigráfico Neocomiano-Aptiano.

Formación Comburindio (Facies El Cajón)

Nombre propuesto por Campa y Ramírez (1979) y subdividida por el SGM (2000) en facies El Cajón. Campa (*op.cit*) menciona que esta unidad está compuesta por un conjunto de capas rojas de lutita, limolita, conglomerado calizo y conglomerado volcánico; el espesor de las capas varía desde algunos centímetros en las limolitas, hasta capas de 1 m en los conglomerados. La estratificación es gradual y comúnmente se observa estratificación cruzada. Se encuentra distribuida principalmente hacia la porción media occidental del área y no se determinó su espesor. Campa (*op. cit.*) establece que la edad de esta formación es Aptiano-Albiano, rango estratigráfico dado por la presencia de *orbitolina sp.* y *Hamites sp.* así como por su estilo de deformación. Sobreyace discordantemente a las rocas de la Formación Arcelia.

Formación Mal Paso

Nombre propuesto por Pantoja (1990) para nombrar a las rocas calcáreas que antes se consideraban como Formación Morelos y que se encuentran descansando sobre la Formación San Lucas, en el área de Huetamo, Michoacán. Aflora de manera aislada en el extremo noroccidental del área. El nombre fue tomado del cañón del mismo nombre, ubicado a 12 km al sureste de la Ciudad de Huetamo. Buitrón (1998) define dos miembros para esta unidad, el inferior corresponde con un prisma sedimentario integrado por secuencias clásticas deltáicas, en tanto que el superior se asocia con sedimentos calcáreos arrecifales y lagunares.

De acuerdo con las características litológicas, se considera que las rocas del miembro inferior corresponden con la facies El Cajón de la Formación Comburindio. De esta manera, la porción basal consta de capas delgadas a medias de areniscas líticas (grauvacas) y cuarzo-feldespáticas en donde los fragmentos de madera son comunes.

Los clastos son de rocas metamórficas e ígneas (andesitas, dacitas y riolitas) y los granos llegan a ser muy gruesos hasta constituir conglomerados polimícticos de estructura masiva, en los que es posible observar clastos de caliza. Hacia la parte superior de este miembro se presentan cuerpos lenticulares de calizas de hasta 20 m de espesor con abundantes fósiles (biostromas), que en la cima cambian a intercalaciones con lutitas, areniscas y limolitas de la unidad.

El miembro arrecifal consta en su base de intercalaciones de calizas arcillosas con capas de limolitas y lutitas que gradúan hacia la cima a una secuencia de calizas biógenas intercaladas con bancos de lutitas y areniscas. Su espesor estimado es de 750 m. De acuerdo a su posición estratigráfica y sus determinaciones micropaleontológicas, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano, de tal forma que se correlaciona con la Formación Morelos de la Plataforma Guerrero-Morelos. Sobreyace de manera concordante a las facies El Cajón de la Formación Comburindio.

Formación Cutzamala

Con este nombre por Campa y Ramírez (1979) definen una espesa sucesión continental, que se encuentra ampliamente expuesta a lo largo de la cuenca del Río Cutzamala, al oriente del poblado San Lucas y hacia el norte hasta las cercanías del poblado Tzitzio.

Las rocas de esta formación fueron estudiadas en detalle por Altamira-Areyán (2002), quien las describió como una asociación de facies sedimentarias depositadas en un ambiente fluvial; cubren en contacto estratigráfico discordante a la mayoría de las formaciones anteriormente descritas (Altamira-Areyán, 2002; Morales-Gámez, 2005).

Su edad ha sido ampliamente discutida por varios autores. Con base en la diversidad de algunos palinomorfos, Altamira-Areyán (2002) asigna una edad del Paleoceno Tardío. Sin embargo, los Grupos *Momipites microcoriphaeous* y *Momipites temipolus*, encontrados por este autor, presentan sus primeras ocurrencias a partir del Maastrichtiano (Nicholls, 1973), por lo que no es posible excluir una edad del Cretácico Tardío para estas rocas.

En la Barranca Los Bonetes, cerca del poblado El Limón de Papatzingán, Benammi et al. (2005) reportaron el hallazgo de huesos de dinosaurio bien preservados en las rocas clásticas de esta formación.

Los autores asignan los fósiles a la familia Hadrosauride, lo que apoyaría una edad del Cretácico Tardío para estas rocas. Finalmente, Mariscal-Ramos et al. (2005) obtuvieron una edad $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ de ~ 84 Ma para un derrame andesítico intercalado en esta sucesión, lo que corrobora una edad del Cretácico Tardío para las rocas de la Formación Cutzamala

Cenozoico (Neógeno)

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 (1980.) 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 del acuífero aflora en el extremo centro oriental del área conformando un afloramiento aislado y localizado en una pequeña fosa tectónica; 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 están dispuestos 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, Yanhuatlán y Cuicatlán de Oaxaca.

Rocas Ígneas Intrusivas

Estos cuerpos graníticos representan la actividad magmática que se manifestó durante el Cenozoico Inferior, sus afloramientos se encuentran distribuidos de manera aislada asociados con mineralización que actualmente se explota en distritos mineros. En el subsuelo se considera que constituyen cuerpos de dimensiones batolíticas. De acuerdo al SGM (2000), la edad del emplazamiento de estos cuerpos es de 30 Ma.

En el área del acuífero se identifican dos pequeños cuerpos intrusivos. El primero es de composición diorítica y se denomina Tinoco por localizarse en las inmediaciones del poblado del mismo nombre y en la Ranchería San Vicente; el segundo, de composición granodiorítica, se denomina El Lloroso y se ubica en la porción centro-sur y está emplazado en la terminación del cierre periclinal del anticlinal La Gavia

Rocas Ígneas Extrusivas

Andesitas del Eoceno

De acuerdo con el SGM (op. cit.) el vulcanismo en la región se inicia en el Cenozoico (Eoceno) y se manifiesta de manera aislada hacia el extremo suroccidental del área en forma de coladas de lavas, asociadas con brechas volcánicas también de carácter andesítico.

Estas rocas son consideradas como el producto de la actividad efusiva de la Sierra Madre Occidental, de tal forma que se les asigna una edad correspondiente al Eoceno.

Rocas Volcánicas del Eoceno-Oligoceno

Estas rocas se distribuyen dentro del área de estudio tanto hacia en la región occidental como en el extremo nororiental, manifestando la continuidad de la actividad volcánica de la Sierra Madre Occidental en la región. El vulcanismo continúa siendo de tipo andesítico presentándose en forma de derrames y brechas con algunos niveles dacíticos.

Esta secuencia se encuentra cubriendo de forma discordante a la unidad basal de andesitas y simultáneamente sobreyacidas por cuerpos tabulares de dacitas y riolitas, secuencia volcánica que hacia su cima varía a ignimbritas y riolitas. La edad de esta secuencia volcánica se asigna al Oligoceno-Mioceno, de acuerdo con dataciones que oscilan entre 33.4 a 14.1 Ma, realizadas por el SGM (2000).

Basaltos del Holoceno

Se presentan en forma de coladas de basaltos en el extremo nororiente del área, fuera del límite del acuífero. Se considera que son testigos de la actividad del Eje Neovolcánico, cuya edad se asigna al Holoceno.

Depósitos Aluviales

Corresponden con sedimentos continentales transportados por las principales corrientes fluviales y están constituidos principalmente por arenas, arcillas y limos, producto de la desintegración de las rocas preexistentes. Se presenta en forma de delgadas capas en los cauces de ríos y arroyos y en la porción suroriental del acuífero. Su espesor máximo es de 30 m.

4.2. Geología estructural

Las rocas de los subterrenos mencionados están afectadas por dos fases de deformación dúctil. La primera deformación se relaciona a una esquistosidad de flujo y está asociada a una lineación de estiramiento de rumbo N70°-90°.

Estas microestructuras son contemporáneas a las cabalgaduras de vergencia al oriente, que superponen al Subterreno Huetamo-Arcelia sobre el Subterreno Teloloapan. Otro evento dúctil está relacionado a la crenulación del clivaje que muestra una vergencia opuesta a la primera deformación. Esto implica que fueron deformados simultáneamente, durante el Cretácico Tardío o Paleoceno, anterior a la depositación de las capas rojas del Grupo Balsas del Eoceno (Salinas, P.J.C., 1994; Salinas, P.J.C., et al., 2000). La mayor deformación se manifiesta en la porción nororiental y noroccidental, donde afloran rocas vulcanosedimentarias y sedimentos metamorfizados que constituyen los terrenos Arcelia y Huetamo.

La deformación dúctil está presente en las rocas de la Unidad Arcelia, manifestándose en forma de foliación penetrativa bien definida con superficies de anisotropía plegada, con estructuras planares y de estiramiento, formando sigmoides tipo "flysh" que reflejan zonas de cizallas muy regionales, relacionadas a las fallas inversas o cabalgaduras. La unidad Arcelia presenta una moderada esquistosidad con rumbo NW-SE con echado al SW, asociada a pliegues con vergencia al E; mientras que las rocas del Subterreno Teloloapan presentan esquistosidad penetrativa, pliegues isoclinales con rumbo general de NW-SE e inclinaciones al SW y zonas de crenulación que definen una segunda deformación:

La Formación Villa de Ayala muestra plegamiento muy abierto. Los Esquistos Tejupilco presentan foliación penetrativa con rumbo NW, caracterizada por micropliegues.

Las cabalgaduras asociadas se observan principalmente en la porción occidental del área, entre las principales se mencionan las siguientes:

Cabalgadura Arcelia. Tiene rumbo sensiblemente N-S, longitud de 24 km, con vergencia al oriente e inclinaciones de 45 a 70° al SW. En la porción sur es desplazada por fallas laterales sinestrales, sobrepone en contacto tectónico al Subterreno Huetamo-Arcelia con el Subterreno Teloloapan.

Cabalgadura Zicatecoyan. Presenta un rumbo casi N-S y longitud de 3 km, vergencia hacia el oriente e inclinación de 40° al SW, sobrepone a la Formación Acapetlahuaya sobre los Esquistos Tejupilco.

Cabalgadura Ixtepec. Presenta con rumbo N-S con variaciones hacia el NW-SE y longitud de 18 km. Es una cabalgadura de bajo ángulo con vergencia al oriente e inclinaciones de 15 a 45 ° al SW. La Formación Acapetlahuaya cabalga sobre la Formación Amatepec. En la etapa final de la Orogenia Laramide se produjo un fallamiento de tipo lateral y normal que ocasionaron las principales fallas: La falla El Aguacate está ubicada al noroeste de la zona, es una falla normal con rumbo N25°W, un echado de 55° al SW. Pitch variable de 14 a 70 ° al SE y longitud de 10 km. Afecta a la unidad Arcelia.

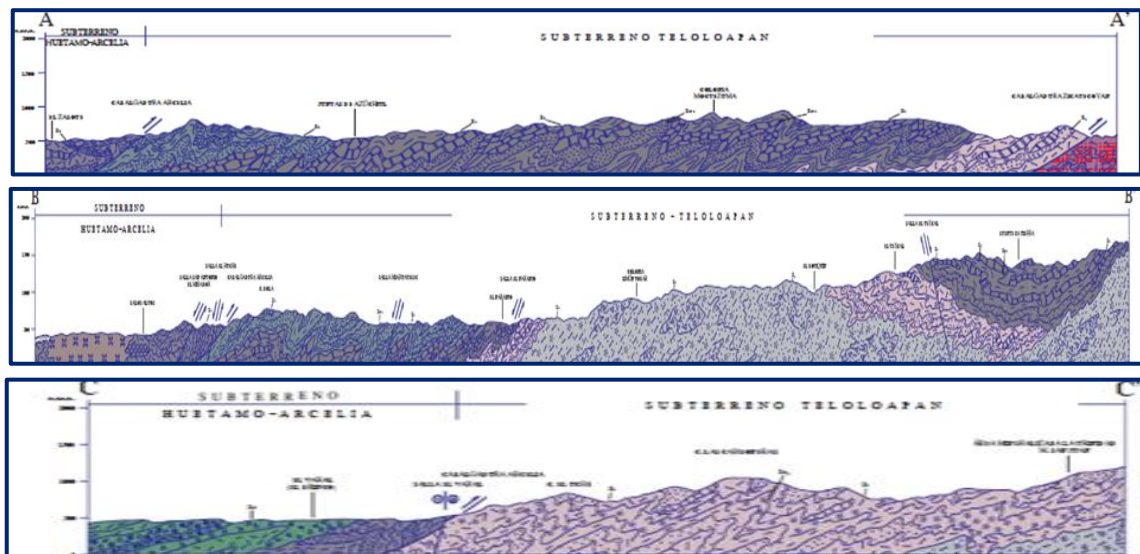
Las fallas Las Víboras, Tamarindo-Zapata y El Varal están localizadas en la porción suroriental, son laterales sinestrales con rumbo general N50°-60°W, echados de 65, 74 y 82° al SW y pitch de 24, 74 y 5° al SE, respectivamente. Afectan a la Unidad Arcelia y a la Formación Acapetlahuaya.

La falla Mina La Concepción está situada en la porción centro-norte, es normal con rumbo N-S e inclinación de 41° al W. Pone en contacto a las formaciones Acapetlahuaya y Villa de Ayala. Las fallas El Naranjo y Miahuatepec están localizadas en la región central, son de tipo normal con rumbo N38°W, echado entre 62 y 65° al SW, respectivamente. Afectan a las formaciones Villa de Ayala y Amatepec.

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 alojado, en su porción superior, en los sedimentos aluviales, fluviales y conglomerados que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos y arroyos, así como en los pequeños valles intermontanos que se encuentran diseminados en toda la superficie del acuífero. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en rocas sedimentarias e ígneas fracturadas.

Las evidencias directas e indirectas demuestran que el espesor del medio granular varía desde algunos metros en las estribaciones de las sierras, incrementándose ligeramente en las inmediaciones de los cauces de los ríos y arroyos, hasta alcanzar algunas decenas de metros en los valles. El medio fracturado está asociado a la zona de alteración de las rocas intrusivas principalmente y a la presencia de fracturamiento en rocas sedimentarias; su espesor varía de unos cuantos metros hasta alcanzar 50 m en algunas zonas; sin embargo, su promedio es de alrededor de 20 m, según lo demuestran las exploraciones geofísicas. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias, vulcanosedimentarias y volcánicas, al desaparecer el fracturamiento a profundidad, y por rocas ígneas intrusivas y meta sedimentarias (figura 3).



Fuente: Carta Geológico-Minera E14-A76 "Arcelia". Escala: 1:50 000. SGM, 2003

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten establecer la presencia de acuíferos aislados de **tipo libre** heterogéneos y anisótropos, constituidos, en su porción inferior, por un medio granular poroso conformado por los depósitos aluviales, fluviales y conglomerados de granulometría diversa, no consolidados y semi-consolidados, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en la zona, estos materiales presentan baja permeabilidad y se ubican en los cauces de los ríos y arroyos, así como en los pequeños valles intermontanos.

La porción inferior se aloja en un medio fracturado constituido por rocas volcánicas, vulcanosedimentarias y sedimentarias, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2013, se ejecutaron 6 pruebas de bombeo de corta duración (4 a 8 horas) tanto en etapa de abatimiento como de recuperación, en aprovechamientos que extraen agua de los materiales granulares que rellenan los valles intermontanos. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **8.0×10^{-6} a $4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . De acuerdo con el espesor saturado, la conductividad hidráulica varía de **2.6×10^{-7} a $5.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (0.02 a 44.0 m/d)**.

Los valores más altos corresponden a sedimentos de granulometría media y los más bajos a depósitos de granulometría fina. Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento.

5.3. Piezometría

No existe registro piezométrico histórico consistente debido a que no se tiene definida una red piezométrica. Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea se consideró únicamente la información recabada durante el estudio realizado en 2013.

Durante la realización del censo se identificaron tres zonas de explotación del agua subterránea, en las cuales se realizaron las configuraciones del nivel estático para el planteamiento de los balances respectivos. Estas zonas son: Arcelia, Tlalchapa y Políutla.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en el año 2013, medida principalmente en norias, varía de 3 a 16 m, incrementándose por efecto de la topografía desde la zona próxima a los cauces de ríos, arroyos y en la parte más baja de los valles, hacia las sierras que los delimitan. Los valores más someros se presentan en el área de explotación de Tlalchapa así como en la zona comprendida entre las poblaciones Palos Altos y Arcelia y en las inmediaciones de Políutla, mientras que las zonas con mayor profundidad se registran en Tlalchapa y hacia los flancos norte, este y oeste de Políutla (figura 4).

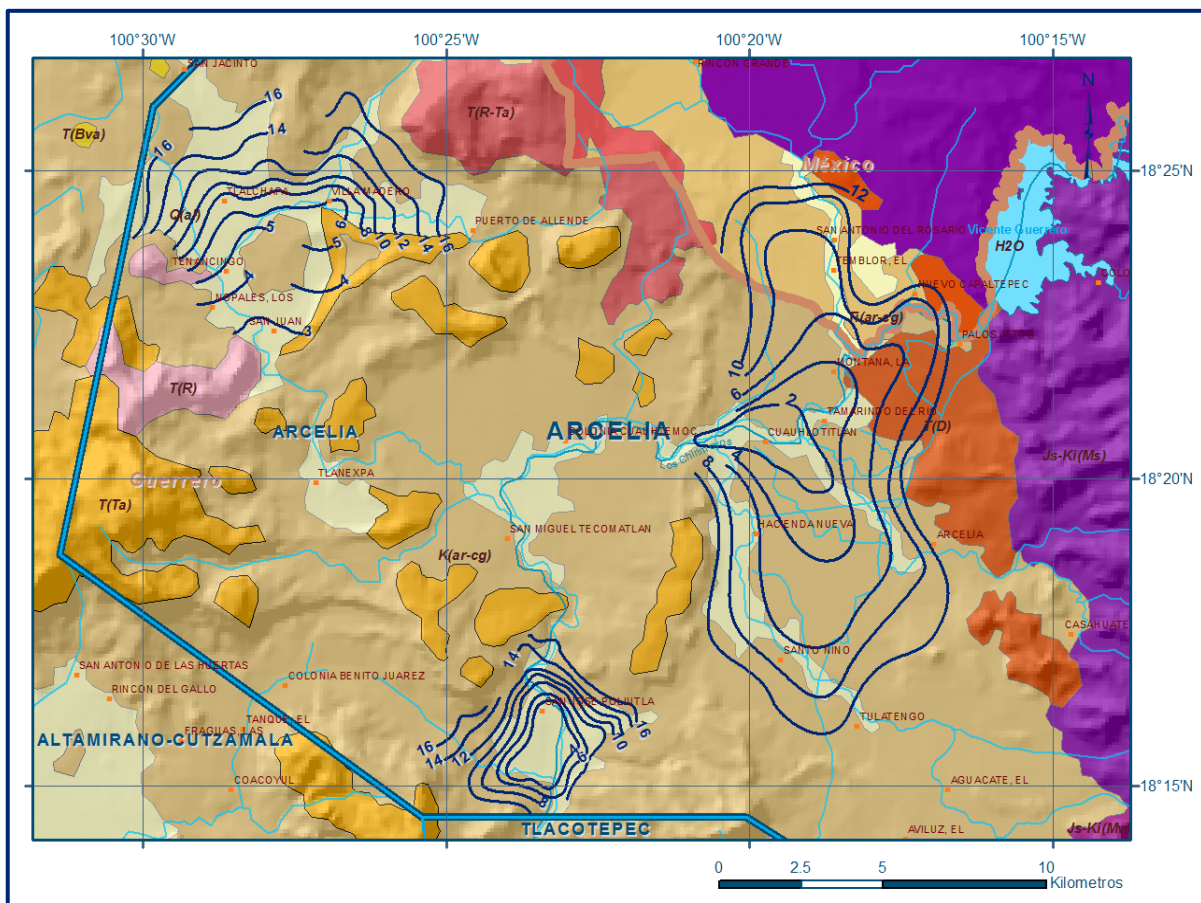


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2. Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2013, presenta valores que varían de 290 a 410 msnm, decreciendo de las partes topográficamente más altas ubicadas al oeste de Tlalchapa, norte y sur de Arcelia y en los flancos que rodean al poblado Poliutla, hacia los valles.

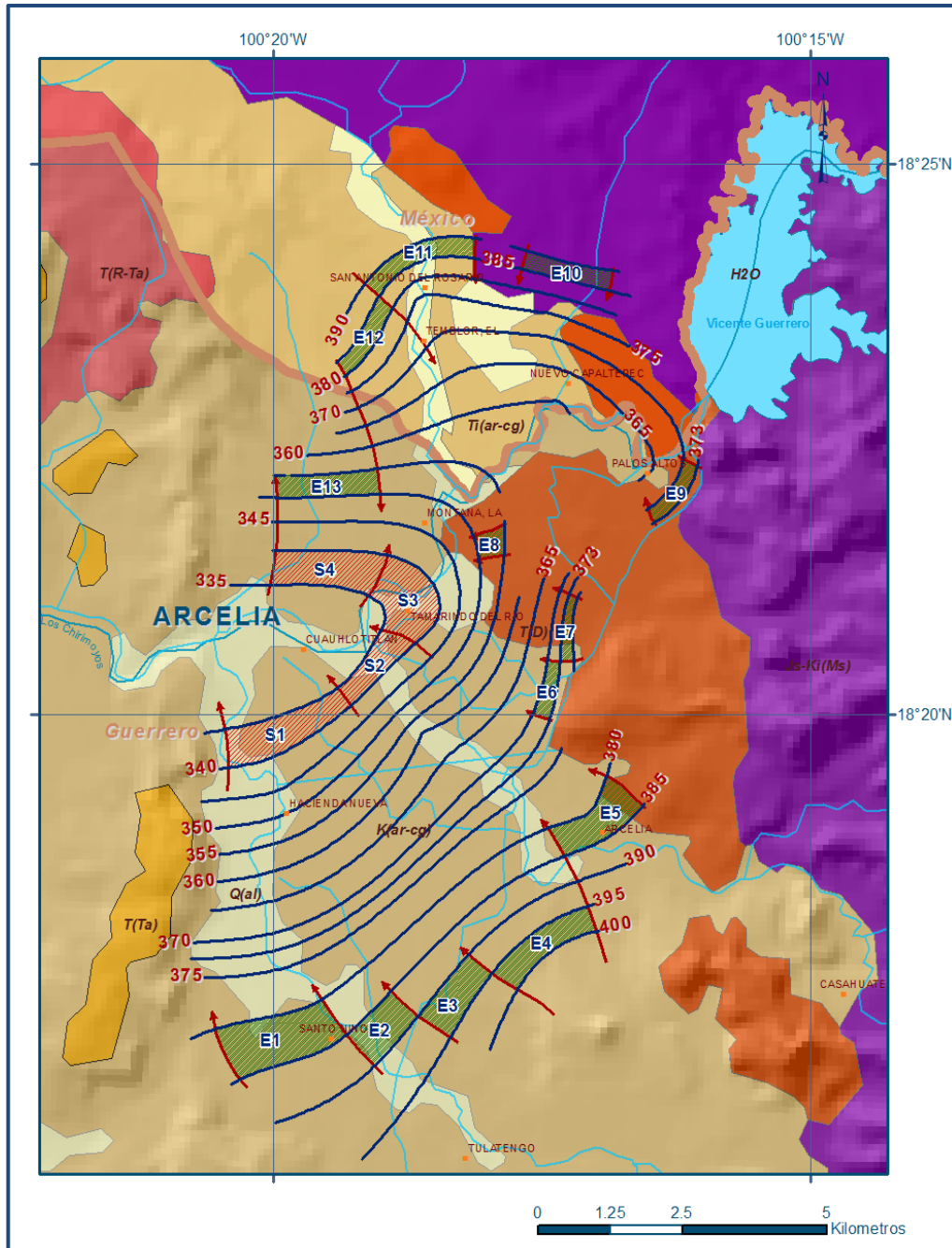


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zona Arcelia

En la zona de balance Arcelia la dirección preferencial del flujo subterráneo es este-oeste, alimentada por los flujos procedentes de los flancos norte y sur; en tanto que en las zonas Tlalchapa y Poliutla la dirección preferencial es norte-sur, con alimentaciones procedentes de los flancos este y oeste (figuras 5 y 6).

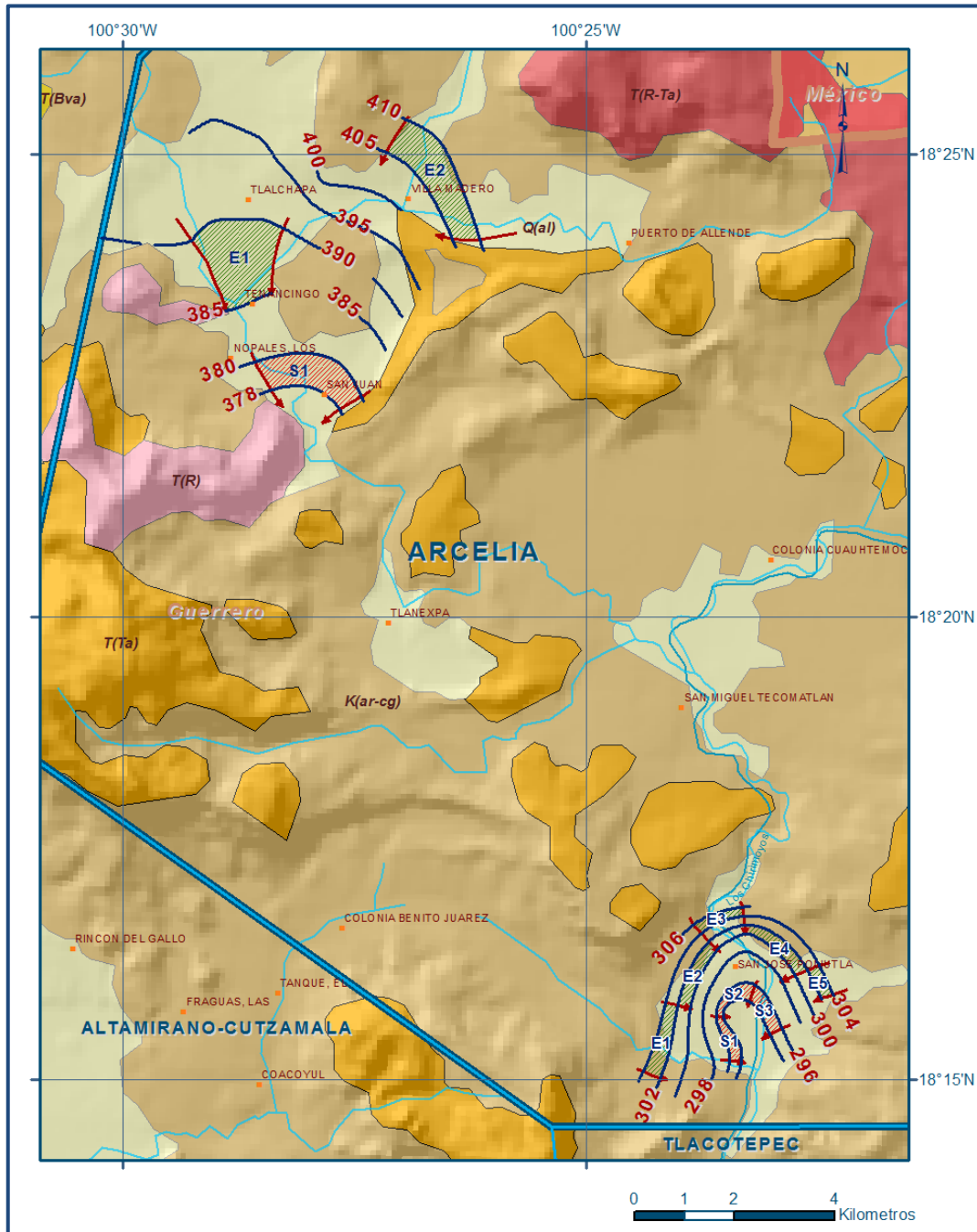


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zona Tlalchapa y Poliutla

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas en algunos recorridos de campo se encuentran dispersas en tiempo y espacio.

Además, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por la concentración de la extracción.

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 el año 2013 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 del estudio realizado en el 2013, se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en las principales zonas de explotación, para su análisis fisicoquímico correspondiente (6 pozos y 14 norias). Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH), nitratos, dureza, sólidos totales disueltos (STD) y dureza total.

De los resultados de análisis fisicoquímicos se determina que los valores de concentración de STD varían de 244 a 2,440 mg/l. Cinco muestras presentan concentraciones de STD mayores a 1000 mg/l que establece como límite máximo permisible (LMP) 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. Las concentraciones de los iones principales y menores, así como las demás determinaciones, se encuentran dentro de los LMP establecidos por la norma mencionada, excepto tres muestras que superan el LMP de sulfatos y dureza total, que es de 400 y 500 mg/l, respectivamente. En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce a ligeramente salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 352 a 2727 mS/cm. La temperatura del agua varía de 26.8 a 32.2 °C y el pH de 7.3 a 8.5.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasifica como de salinidad media y alta (C_2 y C_3) y contenido bajo de sodio intercambiable (S_1), lo que indica que es apropiada para riego de cultivos moderadamente tolerantes a las sales en suelos que necesitan buen drenaje y lavados.

Tres muestras se clasifican como C_4-S_1 , es decir, salinidad muy alta y bajo contenido de sodio intercambiable, que no es apropiada para riego en condiciones normales, requiriendo suelos muy permeables y lavados frecuentes y cultivos tolerantes a la salinidad.

De la representación de los resultados en los diferentes diagramas, se concluye que la familia de agua predominante es la bicarbonatada-cálcica, que representan agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia que han circulado a través de rocas sedimentarias calcáreas y volcánicas. Dos muestras se pertenecen a la familia sulfatada-sódica.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con el censo realizado en el 2013, se registró la existencia de 76 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 19 son pozos, 56 norias y 1 manantial; de ellos, 64 se consideran activos (10 pozos, 53 norias y 1 manantial) y 12 inactivos (9 pozos y 3 norias). De las obras activas, 51 se destinan al doméstico, 8 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 3 para uso agrícola y 2 para servicios

El volumen de extracción calculado es de **1.0 hm³ anuales**, de los cuales 0.8 hm³ (80.0%) se utilizan para abastecimiento de agua potable a las poblaciones y 0.2 hm³ (20.0%) para uso doméstico. Los otros usos utilizan volúmenes pequeños. La descarga a través del manantial es de 2.5 lps, que representa aproximadamente 0.1 hm³ anuales.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2013, en una superficie de **131.5 km²** del acuífero, divididos en 3 áreas de balance, en las que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos. Estas zonas son Arcelia con 87.5 km², Tlalchapa que tiene una superficie de 33.0 km² y Poliutla con 11.0 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:

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

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 del acuífero:

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

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 (R_v) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (E_h).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (R_r), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y de la infiltración de la red de agua potable y de alcantarillado, constituyen otra fuente 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 en algunas zonas de balance existe flujo base y no se cuenta con información hidrométrica para estimarlo, su valor se considera la incógnita de la ecuación de balance y la recarga vertical se calculó aplicando el coeficiente de infiltración, obtenido a partir del balance hidrometeorológico, a la superficie de la zona de balance. Este es el caso de la zona de balance denominada Arcelia, en la que la ecuación de balance definida es:

$$Dfb = \pm \Delta V(S) + Rv + Rr + Ras + Eh - Sh - B - ETR - Dm \quad (1)$$

Para las otras 2 zonas de balance definidas, Tlalchapa y Poliuatla, que no tienen flujo base, la recarga vertical es la incógnita de la ecuación

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

Donde:

Rv = Recarga vertical;

Rr = Recarga inducida por riego agrícola;

Ras = Recarga por escurrimiento superficial

Eh = Recarga por flujo horizontal;

B = Bombeo;

Sh = Salidas por flujo horizontal;

Dfb = Descarga natural por flujo base;

Dm = Descarga a través de manantiales

ETR = Evapotranspiración real;

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

En la zona de balance Arcelia, tomando en cuenta su valor medio de precipitación de 1180.7 mm anuales y área de 87.5 km², se obtiene un volumen de lluvia de 103.3 hm³ anuales.

Al aplicar el coeficiente de infiltración obtenido, 9.3 %, el valor de la recarga vertical Rv es de **14.3** hm³ anuales.

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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

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

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático mostrada en la figura 5 y 6, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

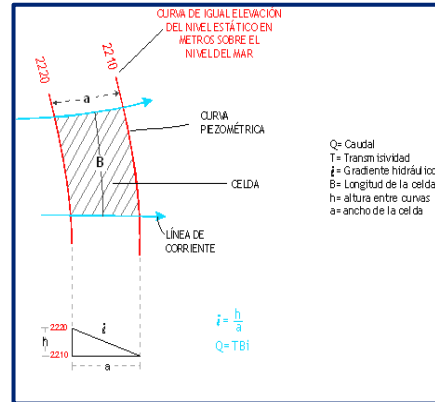
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

T = Transmisividad (m²/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



El cálculo de las entradas subterráneas para el año 2013 se presenta en la tabla 2, en la que se observa que su valor total es de **11.0 hm³ anuales**.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo (2013)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	1460	295	2	0.00677966	0.00026	0.0026	0.08
E2	1355	235	2	0.00851064	0.00026	0.0030	0.09
E3	930	206	2	0.00970874	0.00026	0.0023	0.07
E4	1435	215	2	0.00930233	0.00026	0.0035	0.11
E5	630	245	2	0.00816327	0.00026	0.0013	0.04
E6	1870	835	5	0.00598802	0.0018	0.0202	0.64
E7	1060	650	5	0.00769231	0.0018	0.0147	0.46
E8	1295	565	5	0.00884956	0.0018	0.0206	0.65
E9	1815	470	5	0.01063830	0.0018	0.0348	1.10
E10	1490	665	5	0.00751880	0.0018	0.0202	0.64
E11	970	250	2.5	0.01000000	0.0012	0.0116	0.37
E12	1130	370	5	0.01351351	0.0012	0.0183	0.58
E13	470	485	5	0.01030928	0.0012	0.0058	0.18
E14	1125	260	2.5	0.00961538	0.0009	0.0097	0.31
E15	1470	325	5	0.01538462	0.0012	0.0271	0.86
E16	1940	330	5	0.01515152	0.0012	0.0353	1.11
E17	1350	275	5	0.01818182	0.0012	0.0295	0.93
E18	1695	400	5	0.01250000	0.0012	0.0254	0.80
E19	1445	1450	5	0.00344828	0.0025	0.0125	0.39
E20	2525	645	5	0.00775194	0.0025	0.0489	1.54
TOTAL						10.95	

Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio por zona de las pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio realizado en el año 2013, adaptadas al espesor saturado.

7.1.3. Recarga por escurrimiento superficial (Ras)

En época de lluvias el nivel de la superficie libre de agua en el Río Palos Altos es superior al nivel del agua subterránea que presenta el acuífero, de esta manera el río recarga al acuífero actuando como una corriente influente. Esta componente sólo se estimó para la zona Arcelia, ya que en ella se encuentra dicho río, cuyas aguas son controladas y almacenadas en la Presa Vicente Guerrero. Utilizando la información histórica de la estación Palos Altos II, se obtuvo un caudal promedio anual de 6.6 m³/s que representa un volumen anual de 208.2 hm³; tomando en cuenta que el 1% es recarga efectiva al acuífero, se obtiene un volumen debido a recarga con agua superficial de **2.1 Mm³/año**.

7.1.4. Recarga inducida por riego agrícola (Rr)

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 agricultura. Debido a que el volumen de extracción de agua subterránea destinada para uso agrícola y público-urbano es muy pequeño, únicamente se considera el agua superficial destinada al uso agrícola.

Sólo en la zona Arcelia existe una zona agrícola de 46.2 km² de superficie que se riega con agua superficial procedente de la presas Vicente Guerrero a través de sus canales principales margen derecha e izquierda.

Considerando los aforos en dichos canales y la superficie regada, se obtuvo una lámina promedio de riego de 1.42 m, por lo que el volumen utilizado es de 65.6 hm³; si tomamos en cuenta que sólo el 10% del volumen aplicado a la zona parcelaria es recarga efectiva al acuífero, el valor de esta componente es de **6.6 hm³/año**. De esta manera, **Rr = 6.6 hm³ /año**.

7.2. Salidas

Las descargas ocurren principalmente por salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh), evapotranspiración (ETR), bombeo (B) y por flujo base (Dfb).

7.2.1. 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.

El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración. Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación.

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

En la que: $L = 300 + 25T + 0.05T^3$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real (mm)

P = Precipitación anual (mm)

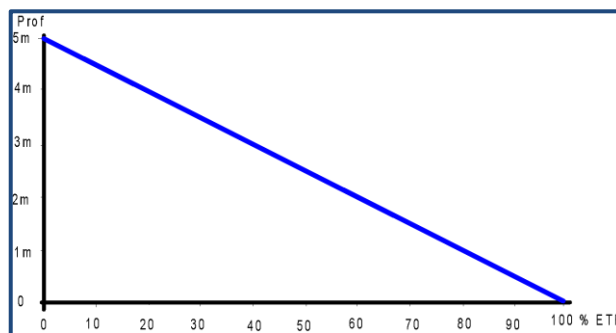
T = Temperatura media anual (°C)

Esta componente se presenta en las 3 zonas de balance, en las que se registran niveles freáticos someros. La precipitación y temperatura utilizadas son las obtenidas en las normales climatológicas de las estaciones de mayor proximidad a cada área de balance referida. Considerando para las zonas Arcelia y Poliutla los valores medios anuales de temperatura de 28.0°C y precipitación de 1,180 mm, la lámina de ETR que se obtiene es de 1070 mm; mientras que para la zona Tlalchapa los valores promedio anual de temperatura y precipitación son 27.0 °C y 1147 mm, respectivamente, con ellos se obtiene una lámina de ETR de 1,029 mm.

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 metros, 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 metros, 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 porcentaje de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porcentaje 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 las configuraciones de profundidad al nivel estático se consideraron las curvas menores e iguales a 5 metros, se calculó el área entre ellas y se tomó el valor promedio (por ejemplo, entre las curvas de 1 y 2 metros en valor promedio será 1.5).

El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, se pondera de acuerdo a la relación lineal mencionada anteriormente, en este caso, por ejemplo, el valor medio de profundidad de 1.5 metros, se multiplicará por 0.7 (que significa que, a esta profundidad, el 70 por ciento es susceptible de evapotranspirarse).

Lo mismo se hace para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 5 metros. Al final se obtendrá la suma de los volúmenes evapotranspirados. En la tabla 3 se muestra el valor de la evapotranspiración real calculado para cada una de las áreas de explotación, el total para el acuífero es de 11.7 hm³/año. **ETR = 11.7 hm³/año**

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración (2013)

INTERVALO CURVAS (m)	PROFUNDIDAD CONSIDERADA (m)	ÁREA (km ²)	PORCENTAJE	LÁMINA ETR (m)	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
ZONA ARCELIA					
0 A1	0.5	0.89	0.9	1.07	0.86
1 A2	1.5	4.36	0.7	1.07	3.27
2 A3	2.5	3.01	0.5	1.07	1.61
3 A4	3.5	3.94	0.3	1.07	1.27
4 A5	4.5	11.88	0.1	1.07	1.27
TOTAL		24.08			8.28
ZONA POLIUTLA					
0 A1	0.5	0	0.9	1.07	0
1 A2	1.5	0	0.7	1.07	0
2 A3	2.5	0.77	0.5	1.07	0.41
3 A4	3.5	1.05	0.3	1.07	0.34
4 A5	4.5	0.88	0.1	1.07	0.09
TOTAL		2.7			0.84
ZONA TLALCHAPA					
0 A1	0.5	0	0.9	1.029	0
1 A2	1.5	0	0.7	1.029	0
2 A3	2.5	1.45	0.5	1.029	0.75
3 A4	3.5	3.62	0.3	1.029	1.12
4 A5	4.5	7.09	0.1	1.029	0.73
TOTAL		12.17			2.6
SUMA					11.72

7.2.2. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción por bombeo es de **1.0 hm³/año**, de los cuales 0.2 hm³ se extraen en la zona Arcelia, 0.7 hm³ en Tlalchapa y 0.1 hm³ en Poliutla.

7.2.3. Salidas subterráneas por flujo 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 2013 presentada en las figuras 5 y 6. Su valor es de **5.7 hm³ anuales**, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo subterráneo (2013)

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
ZONA ARCELIA							
S1	2145	505	5	0.00990	0.0027	0.0573	1.81
S2	1360	495	5	0.01010	0.0027	0.0371	1.17
S3	1390	685	5	0.00730	0.0027	0.0274	0.86
S4	1735	675	5	0.00741	0.0027	0.0347	1.09
						SUBTOTAL	4.94
ZONA POLIUTLA							
S1	960	180	1	0.00556	0.00043	0.0023	0.07
S2	920	240	1	0.00417	0.00043	0.0016	0.05
S3	895	305	1	0.00328	0.00043	0.0013	0.04
						SUBTOTAL	0.16
ZONA TLALCHAPA							
S1	1970	565	2.5	0.00442	0.00209	0.0182	0.57
						SUBTOTAL	0.57
TOTAL SALIDAS							5.67

7.2.4. Descarga a través de manantiales (Dm)

De acuerdo con el censo de aprovechamientos, el único manantial identificado se localiza en la comunidad Almoloya, dentro de la zona de balance Arcelia. Su caudal es de 2.5 lps, que representan aproximadamente un volumen anual de **0.1 hm³**.

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

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 se encuentran dispersos en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Adicionalmente, la configuración de elevación del nivel estático no muestra alteraciones en la dirección natural del flujo subterráneo ni conos de abatimiento, que pudieran ser causadas por la concentración del bombeo y/o de aprovechamientos. Por lo tanto, para fines del balance de aguas subterráneas, se considera que no existen variaciones significativas en la posición de los niveles del agua subterránea y el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo. Por lo tanto **$\Delta V(S) = 0$**

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar el flujo base en la zona Altamirano en la que se presenta esta componente, de acuerdo con la ecuación (1):

$$Dfb = \pm \Delta V(S) + Rv + Rr + Ras + Eh - Sh - B - ETR - Dm \quad (1)$$

Zona Arcelia:

$$Dfb = 0.0 + 9.6 + 6.6 + 2.1 + 8.6 - 4.9 - 0.2 - 8.3 - 0.1$$
$$Dfb = 13.4 \text{ hm}^3$$

Para las zonas Poliutla y Tlalchapa la incógnita es la recarga vertical y se obtuvo de la siguiente expresión:

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

Zona Poliutla:

$$Rv = 0.2 + 0.1 + 0.8 - 0.0 - 0.4$$
$$Rv = 0.7 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Zona Tlalchapa:

$$\begin{aligned} Rv &= 0.6 + 0.7 + 2.6 - 0.0 - 2.0 \\ Rv &= 1.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

Por lo tanto la Rv total de las 3 zonas de balance es:

$$\begin{aligned} Rv &= 9.6 + 0.7 + 1.9 \\ Rv &= 12.2 \end{aligned}$$

Y la recarga total (Rt) es igual a:

$$\begin{aligned} Rt &= Rv + Ras + Eh + Ri \\ Rt &= 12.2 + 2.1 + 11.0 + 6.6 \\ Rt &= 31.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **31.9 hm³/año**, de los cuales son recarga natural y recarga inducida.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes, sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso particular, el volumen de descarga natural comprometida corresponde a la descarga del flujo base, a las salidas por flujo subterráneo y a la descarga a través de manantiales. Por lo que, **DNC= 19.2 hm³ anuales.**

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 **2,592,644 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) 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.

$$\begin{aligned} \mathbf{DMA} &= \mathbf{R - DNC - VEAS} \\ \mathbf{DMA} &= \mathbf{31.9 - 19.2 - 2.592644} \\ \mathbf{DMA} &= \mathbf{10.107356 \text{ hm}^3/\text{año}} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **10,107,356 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2009. Actualización Geohidrológica de los Acuíferos La Unión, Petatlán y Tecpan en el Estado de Guerrero. Elaborado por la empresa Consultoría BESTCO, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2013. Estudio Geohidrológico para Determinar la Disponibilidad de los Acuíferos Chilapa, Altamirano-Cutzamala, Arcelia, Paso de Arena y Coahuayutla, en el Estado de Guerrero. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S. A. de C. V. (SIIDSA).

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1977. Prospección y Levantamiento Geológico y Geofísico en la Porción Noreste y Zona Costera de Guerrero. Realizado por GEOPE, S.A.