CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO PASO DE ARENA (1210), 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 11
4.1 Estratigrafía 13
4.2 Geología estructural 20
4.3 Geología del subsuelo 20
5. HIDROGEOLOGÍA 22
5.1 Tipo de acuífero 22
5.2 Parámetros hidráulicos 22
5.3 Piezometría 22
5.4 Comportamiento hidráulico 23
5.4.1 Profundidad al nivel estático 23
5.4.2 Elevación del nivel estático 26
5.4.3 Evolución del nivel estático 30
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 31
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA 32
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS 32
7.1 Entradas 33
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 33
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 34
7.1.3 Recarga inducida (Rr) 36
7.2 Salidas 36
7.2.1 Evapotranspiración (ETR) 36
7.2.2 Bombeo (B) 39
7.2.3 Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh) 40
7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S) 40
8. DISPONIBILIDAD 42
8.1 Recarga total (R) 42
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 43
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 43
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 43
9. BIBLIOGRAFÍA 44

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 Paso de Arena, definido con la clave 1210 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción occidental del Estado de Guerrero, entre los paralelos 17°38'45" a 18°31'33" de latitud norte y los meridianos 100°35'46" a 101°23´16" de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 4,690 km^2 (figura 1).

Limita al norte el acuífero Huetamo, perteneciente al Estado de Michoacán; al noroeste con Coahuayutla; al este con Altamirano-Cutzamala, al sur con los acuíferos Tecpan, San Luis, Coyuquilla y Petatlán; al suroeste con San Jeronimito y al oeste con los acuíferos La Unión e Ixtapa, todos ellos pertenecientes al Estado de Guerrero).

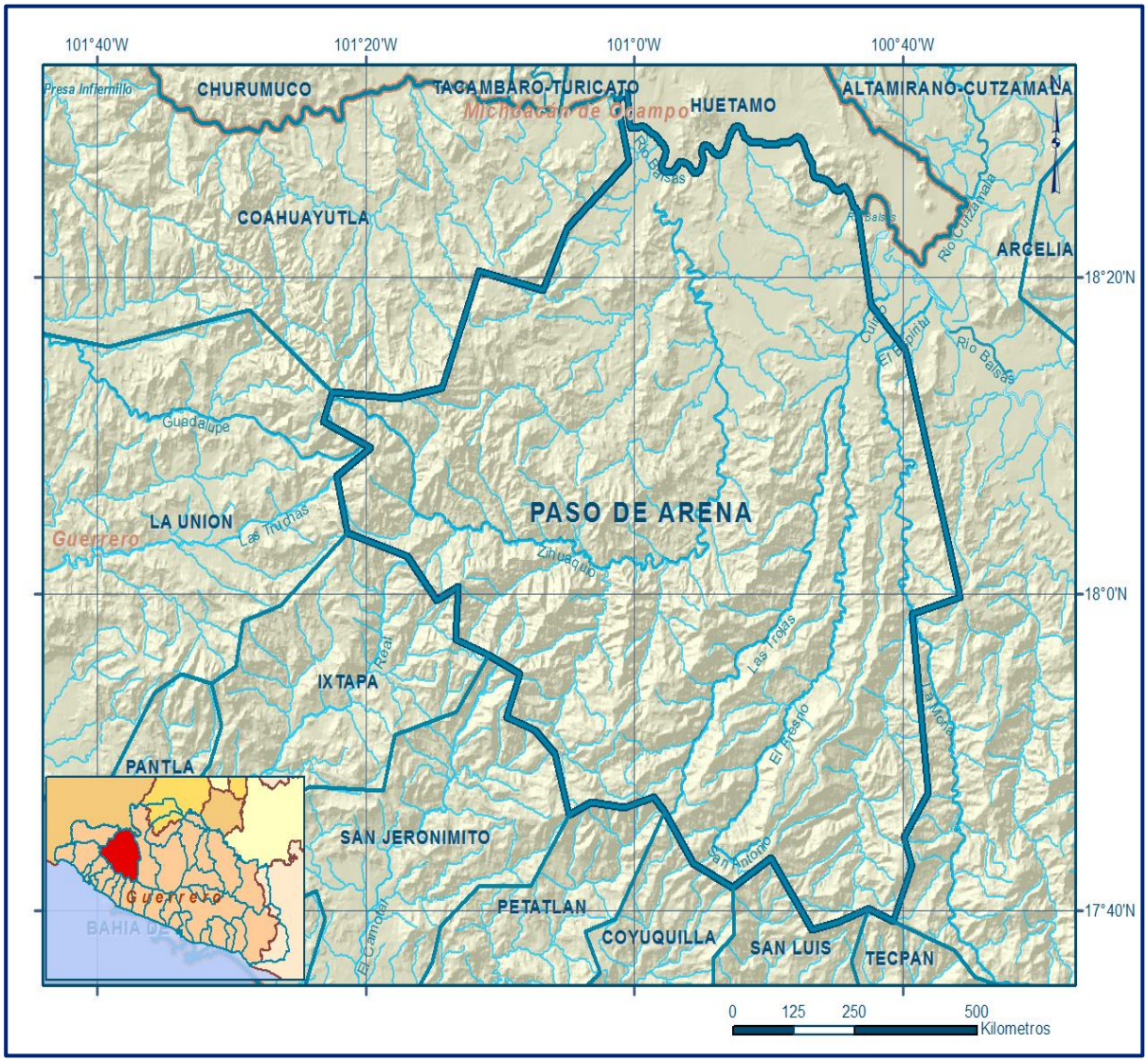


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, comprende casi la totalidad del municipio Coyuca de catalán, la mayor parte de Zirándaro y Ajuchitlán del Progreso, así como pequeñas porciones de los municipios Coahuayutla, José Azueta, Tecpan de Galeana y Petatlán. 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 1210 PASO DE ARENA

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	1	23.5	18	31	21.2	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	100	43	24.2	18	24	10.5	
3	100	42	25.6	18	18	14.6	
4	100	39	51.3	18	15	18.3	
5	100	35	45.9	17	59	47.3	
6	100	39	24.2	17	58	42.5	
7	100	38	12.2	17	47	24.6	
8	100	39	59.1	17	44	36.9	
9	100	39	20.6	17	42	49.1	
10	100	40	45.3	17	39	19.6	
11	100	42	39.8	17	40	7.2	
12	100	44	52.6	17	39	12.8	
13	100	46	48.8	17	38	47.5	
14	100	49	52.3	17	43	18.3	
15	100	52	42.9	17	41	24.4	
16	100	55	40.7	17	42	58.4	
17	100	57	46.8	17	46	14.2	
18	100	58	36.6	17	47	10.6	
19	101	0	46.0	17	46	27.5	
20	101	3	12.3	17	46	48.7	
21	101	4	53.6	17	46	1.2	
22	101	5	56.2	17	49	55.9	
23	101	7	28.4	17	51	24.1	
24	101	9	34.5	17	52	10.9	
25	101	8	34.7	17	54	57.3	
26	101	10	52.4	17	56	8.1	
27	101	13	20.6	17	57	6.6	
28	101	13	8.0	18	0	26.2	
29	101	14	44.1	17	59	34.7	
30	101	16	54.9	18	2	23.1	
31	101	21	23.6	18	3	49.0	
32	101	22	10.5	18	7	25.7	
33	101	19	40.0	18	9	14.6	
34	101	23	11.5	18	10	52.0	
35	101	22	30.7	18	12	45.9	
36	101	17	33.4	18	12	21.7	
37	101	14	19.3	18	12	59.7	
38	101	11	37.5	18	20	24.1	
39	101	6	47.9	18	19	11.0	
40	101	5	2.4	18	23	7.2	
41	101	0	28.2	18	27	16.2	
1	101	1	23.5	18	31	21.2	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Paso de Arena pertenece al Organismo de Cuenca Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guerrero. Su territorio se encuentra parcialmente vedado, la porción noroccidental está sujeta a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la zona del Bajo Balsas, estableciéndose veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 27 de junio de 1975. 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 Paso de Arena, 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 existen distritos o unidades de riego y a la fecha no se ha constituido 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 Hidráulicos (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), el acuífero se localiza en la provincia fisiográfica “Sierra Madre del Sur”, la mayor parte en la subprovincia Cordillera Costera del Sur, que constituye la franja central de la provincia, y el extremo norte se ubica en la subprovincia “Depresión del Balsas.”

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 Pacifico 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 m.s.n.m.

La subprovincia “Cordillera Costera del Sur”, constituye la franja central de la provincia y se caracteriza por estar constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Representa la zona de transición entre las subprovincias internas (Depresión del Balsas y Sierras y Valles Guerrerenses) y la zona costera (subprovincia Costas del Sur), desde donde los escurrimientos superficiales se dirigen tierra a dentro o hacia la vertiente del Océano Pacífico. La cordillera está orientada de manera paralela a la línea de costa por más de 650 km, abarca parte del Estado de Michoacán, cruzando todo el Estado de Guerrero y parte del Estado de Oaxaca. Se encuentra limitada al norte por la Depresión del Balsas y al sur por los lomeríos de la vertiente sur, así como por la planicie costera del Pacífico.

En algunos sitios presenta elevaciones que sobrepasan los 3,000 msnm, aunque su altitud promedio es del orden de los 2,000 msnm. La vertiente sur de la sierra se caracteriza por estar fuertemente disectada por arroyos y ríos que drenan hacia el sur-suroeste, desembocando en el Océano Pacífico. 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 3,000 m de altura dándole a esta cuenca una topografía muy abrupta" (Raisz, 1964). En general en las regiones topográficamente más altas está conformada por calizas y conglomerados que muestran un aspecto redondeado, con drenaje ampliamente espaciado; mientras que, por otro lado, los valles, laderas y partes bajas están constituidas por lutitas, areniscas, limolitas y rocas ígneas que conforman lomeríos con pendientes muy suaves y con un drenaje bien desarrollado.

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 árido (A) 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 desde las márgenes del Río Placeres del Oro hasta las estribaciones de la Sierra Madre del Sur.

El clima A(C)w2(w) semicálido subhúmedo de presenta en la zona de transición, con temperatura: media anual mayor de 18°C, del mes más frío menor de18°C y del mes más caliente mayor de 22°C. El clima A(C)w1(w) tiene el mismo régimen de temperaturas que el clima anterior. Se presenta en dos pequeñas áreas ubicadas en el centro y oeste del acuífero. El clima Aw1(w) cálido subhúmedo se presenta en la porción suroriental del acuífero en tanto que el clima C(w2)(w) templado subhúmedo se registra en la porción serrana a elevaciones que varían de 2,000 a 2, 500 m.s.n.m.

Para la determinación de las variables climatológicas, se cuenta con información de 12 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Gloria Escondida, Los Tiscuiches, Santa Rita, Cundancito, La Villita, Santa Fe, El Pinzán Morado, Tarétaro, Placeres del Oro, La Caimanera, La Calera y Zirándaro, con diferentes periodos de registro, el más amplio es 1955- 2010. Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de 1,125 mm y 25.3 °C respectivamente. En cuanto a la evaporación potencial media, su valor es de 2,418 mm anuales.

3.3 Hidrología superficial

El Acuífero Paso de Arena se ubica en la Región Hidrológica 18 “Balsas”, Subregión Hidrológica Medio Balsas, cuenca del Río Balsas-Zirándaro, 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. La superficie de la región hidrológica es de 117,406 km^2, distribuida en tres subregiones: Alto Balsas 50,409 km^2, Medio Balsas 31,951 km^2 y Bajo Balsas 35,046 km^2.

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 km^2, 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.

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. En la superficie cubierta por el acuífero se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas:

Sierras. Formadas por rocas volcánicas y metamórficas que representan las mayores elevaciones de la zona. Se localizan en la porción sur del acuífero, orientadas en sentido NW-SE, constituyendo las estribaciones de la Sierra Madre del Sur, presentan pendientes fuertes y formas abruptas e irregulares. Sus elevaciones varían de 1000 a 2500 msnm.

Lomeríos. Representan la zona de transición entre la sierra y los valles y cauces fluviales Se encuentran prácticamente en toda el área y están conformados por rocas graníticas y clásticas. Presentan formas suaves, de poca altura con un relieve moderado en general. Sus elevaciones varían de 500 a 1000 m.s.n.m.Valles y cauce fluvial. Se localizan en la porción norte del acuífero y se caracterizan por presentar relieve plano, en ellos se localizan los principales poblados. Su elevación es menor de 500 msnm. Comprende también el cauce fluvial del Río Balsas, que representa el límite natural del acuífero y entre los estados de Guerrero y Michoacán.

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, 983). 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 (figura 2).

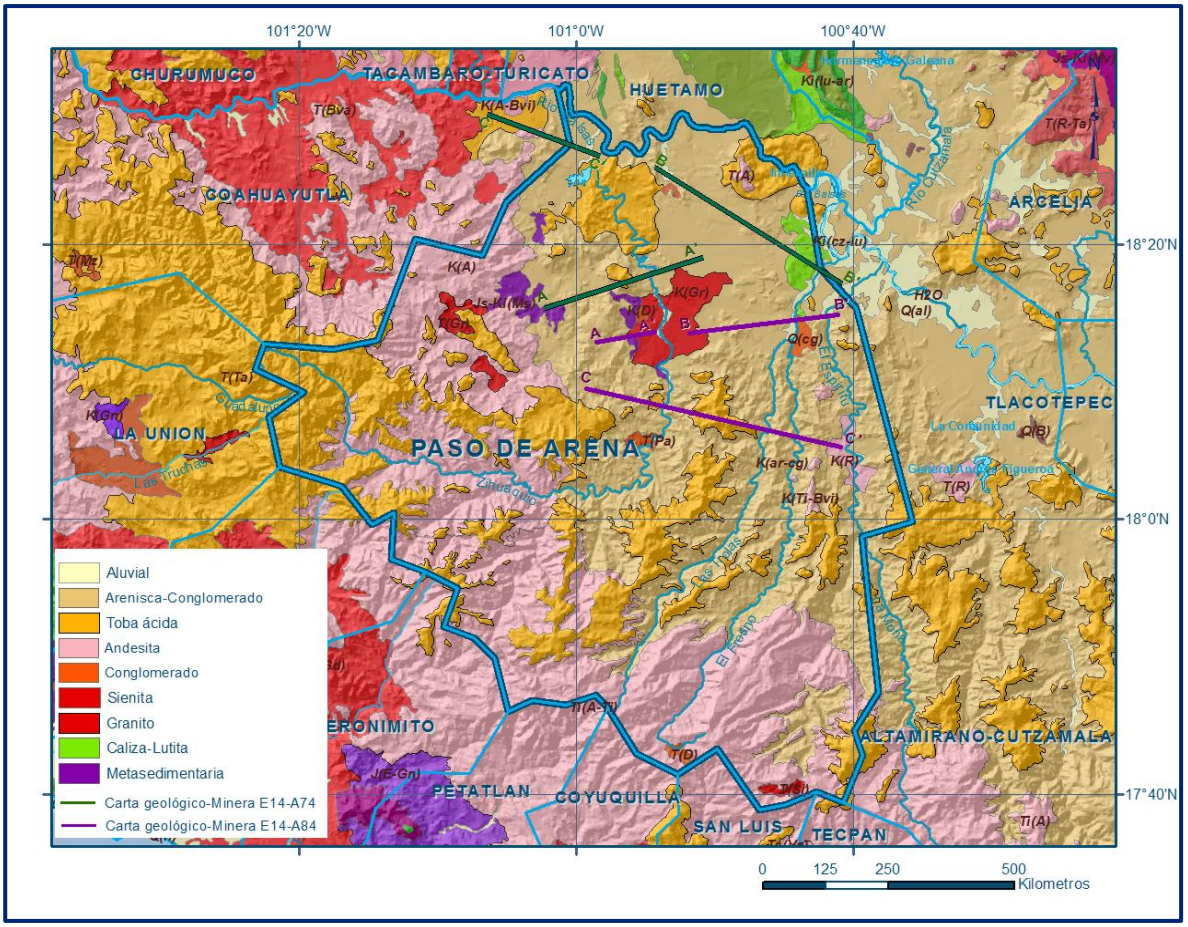


Figura 2. Geología general del acuífero

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. 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 7,000 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 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 .

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

El registro estratigráfico comprende del Jurásico al Reciente y está conformado por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias . En la región aledaña al área de estudio se presentan diferentes terrenos tectonoestratigráficos, que se clasifican de acuerdo con sus basamentos. La cubierta sedimentaria incluye rocas volcánicas y sedimentarias probablemente deformadas durante el Jurásico o el Cretácico, calizas del Cretácico Inferior y conglomerados del Cretácico Inferior-Cretácico Superior, así como rocas volcánicas continentales del Paleógeno y Neógeno.

En la región del Terreno Huetamo aflora una sucesión metaturbidítica polideformada pre-cretácica (Formación Río Placeres, Pantoja-Alor, 1990); una secuencia sedimentaria desde marina a continental, desarrollada a lo largo de la margen occidental de una gran cuenca sedimentaria (cuenca de Huetamo), caracterizada por una historia deposicional activa durante todo el Cretácico y probablemente el Paleoceno y/o Eoceno Inferior (formaciones Angao, San Lucas, Comburindio, El Cajón, Mal Paso, Cutzamala y Capeo, Pantoja-Alor, 1959; Campa y Ramírez, 1979; Pantoja-Alor, 1990); así como también el batolito del Aptiano Placeres del Oro, que corta las rocas metamórficas y las unidades estratigráficas inferiores de la sucesión cretácica de Huetamo. La secuencia estratigráfica se describe a continuación:

JURÁSICO

Rocas Metamórficas

Formación Río Placeres

Aflora en la porción central y centro-meridional del área de Huetamo, entre los poblados Las Pilas, Los Alacranes y Pinzán Morado. Está constituida por filitas de color negro y morado, interestratificadas con niveles métricos a centimétricos de cuarzo-esquisto de tremolita, actinolita, metarenisca rica en cuarzo, y delgados niveles de metacaliza negra.

Adicionalmente, Pantoja-Alor (1990) reporta, sin describirla, la presencia de metalava interestratificada con las rocas metasedimentarias. Sin embargo, en los afloramientos observados en campo no se reconoció la presencia de rocas metavolcánicas intercaladas con la sucesión metamórfica.

Texturalmente las filitas se caracterizan por una foliación que se desarrolla paralelamente a la superficie de estratificación, enmascarando las estructuras sedimentarias originales.

Los esquistos de tremolita-actinolita presentan un característico bandeamiento gris-verde cuyo espesor varía de milímetros a centímetros, definido por la alternancia de niveles granoblásticos de cuarzo y niveles nematoblásticos de tremolita-actinolita, titanita y óxidos.

En la región centro-occidental del área de estudio, entre los poblados Las Pilas y Los Alacranes, la Formación Río Placeres está ampliamente cubierta por una secuencia volcánica cenozoica de aproximadamente 2,000 m de espesor, la cual impide observar la relación entre estas rocas y la sucesión del Cretácico. En la parte suroccidental, cerca del poblado Pinzán Morado, dicha formación está cortada por el batolito Placeres del Oro.

CRETÁCICO

Formación Angao

Aflora en la porción nororiental de la región de Huetamo, entre los poblados La Estancia y Las Paredes. Está compuesta por una alternancia de conglomerado, arenisca, lutita y, en menor proporción, rocas volcánicas.

Su base no se encuentra expuesta en el área de estudio, impidiendo la estimación de su espesor total. Con base en las secciones medidas por Guerrero-Suástegui (1997), es posible inferir un espesor mínimo de 1,200 m en la parte oriental del área de Huetamo.

Formación San Lucas

Aflora ampliamente en la porción oriental de la región de Huetamo, entre los poblados de San Lucas, Puréchucho y Santa Teresa.

De acuerdo con Pantoja-Alor (1990) y Pantoja-Alor y Gómez-Caballero (2003), puede ser dividida en dos miembros estratigráficos que, desde la base hasta la cima, son: el miembro Terrero Prieto y el miembro Las Fraguas. El miembro inferior está representado por una sucesión turbidítica siliciclástica, que yace en contacto transicional sobre las rocas de la Formación Angao.

Está conformado por una alternancia rítmica de lutita, limolita y arenisca, en estratos de espesor variable de 2 a 30 cm, con abundantes estructuras sedimentarias asociadas a la laminación paralela y cruzada. Presenta intercalaciones de tobas que documentan un periodo de actividad volcánica explosiva contemporáneo a la sedimentación. El espesor de este miembro disminuye desde este a oeste, pasando desde 2,000 m entre los poblados de San Lucas y Angao a un mínimo de 500 m al oeste del Cerro Dolores.

El miembro superior Las Fraguas está compuesto por arenisca feldespática y, en menor medida, micro-conglomerado vulcanoclástico y lutita verdosa y color pardo. Las areniscas son de grano medio a grueso, moderadamente a mal clasificadas. Composicionalmente varían de arenitas arcósicas a grauvacas arcósicas, que presentan laminación cruzada, gradación normal y estructuras de canal en toda la sucesión. El espesor de este miembro aumenta de este a oeste, de 1,000 m al oeste del Cerro Dolores, a 250 m al oriente del poblado de San Lucas.

Formación Comburindio

Está compuesta por una sucesión de arenisca cuarzo-feldespática, conglomerado vulcanoclástico y calcáreo y menor abundancia de lutita y limolita de color desde rojizo a gris, intercaladas con algunos bancos de biostromas. Las areniscas son de grano medio a grueso, moderadamente a bien clasificadas.

Composicionalmente varían de arenitas y grauvacas arcósicas a arenitas líticas. Los conglomerados son predominantemente soportados por la matriz arenosa, moderadamente clasificados, en la que los clastos se caracterizan tienen un grado de redondez moderado a elevado, predominan los fragmentos de composición andesítica en toda la sucesión, mientras que la abundancia de los clastos calcáreos aumenta gradualmente hacia la cima.

Las rocas clásticas presentan estructuras sedimentarias como laminación cruzada, rizaduras, gradación normal y estructuras de canal. Los bancos de biostromas tienen un espesor aproximado de 80 m y un relieve más pronunciado con respecto a las rocas clásticas que los envuelven, permitiendo su fácil reconocimiento mediante el análisis geomorfológico; están compuestos por arenisca calcárea y calcarenita, que cambian gradualmente a caliza arcillosa y lodolita hacia la cima.

El espesor de la Formación Comburindio varía desde 1,000 m en la región de Huetamo-Comburindio a 250 m en el Cerro Dolores, y ausente en la porción oriental. Sobreyace en contacto estratigráfico transicional al miembro superior de la Formación San Lucas.

Formación El Cajón

Constituida por calcarenita, coquina, caliza bioclástica con fauna de corales, rudistas, gasterópodos, amonitas, equinoides y foraminíferos, así como caliza masiva, con lutita intercalada hacia la cima, cerca del contacto con la sobreyacente Formación Mal Paso. Afloran en la región oriental del área, donde se distribuye a lo largo de una dirección principal N-S, entre los poblados de Angao y Coyuca de catalán, y en la cima del Cerro Dolores. Guerrero-Suástegui (1997) y Montiel-Escobar et al. (2000) han incluido en la Formación El Cajón los bancos de biostromas de la Formación Comburindio, que afloran en los alrededores del poblado homónimo. Sin embargo, de acuerdo con Pantoja-Alor y Gómez-Caballero (2003), dichos bancos arrecifales se consideran parte de la Formación Comburindio.

Las rocas de la Formación El Cajón sobreyacen en contacto transicional a las rocas clásticas de la Formación Comburindio en la parte alta del Cerro Dolores, mientras que al este del poblado de San Lucas yacen en contacto estratigráfico concordante directamente encima del miembro superior de la Formación San Lucas.En la porción nororiental del área de estudio, la continuidad de los afloramientos permite estimar un espesor máximo de 400 m.

Formación Mal Paso

De acuerdo con Buitrón-Sánchez y Pantoja-Alor (1998) se divide en dos miembros estratigráficos informales, inferior y superior.

El miembro inferior se compone por una alternancia de arenisca cuarzo feldespática y lítica, así como conglomerado polimíctico masivo, lodolitas, limolita, arenisca de color rojizo y escasos bancos de biostromas. El miembro superior está formado por arenisca cuarzo feldespático de color gris con algunas intercalaciones de limolita, lutita y caliza.

Aflora en la parte oriental del área de Huetamo, entre los poblados de Coyuca de catalán y Angao, donde se distribuyen a lo largo de una dirección principal N-S. Sobreyace en contacto estratigráfico concordante a las calizas de la Formación El Cajón Hacia la cima las areniscas cambian gradualmente a marga y caliza arcillosa, finamente estratificadas y con abundante fauna de gasterópodos, corales, equinoides, amonitas y rudistas. Las rocas marinas de la Formación Mal Paso presentan un espesor aproximado de 750 a 800 m.

Formación Cutzamala

La base de esta formación está compuesta por un conglomerado conformado por clastos subangulosos a subredondeados de caliza y marga y menor abundancia de areniscas, lutitas y filitas, litológicamente relacionables con las rocas de las unidades estratigráficas subyacentes. Hacia la cima cambian gradualmente a una sucesión compuesta por arenisca, conglomerado vulcanoclástico, lutita y lodolita de color rojizo. Las areniscas varían desde arenitas arcósicas a litarenitas, son de grano grueso a medio, moderadamente a mal clasificadas; sus clastos varían desde subangulosos a bien redondeados y están constituidos principalmente por andesitas y en menor cantidad tobas, lutitas y calizas. Los conglomerados presentan estratificación gruesa y masiva, mal clasificados.

Están formados por clastos de origen principalmente volcánico y en menor proporción caliza, lutita y arenisca, litológicamente relacionables con las rocas de las formaciones subyacentes. Los clastos volcánicos presentan principalmente composición andesítica, y en menor medida se observan clastos dacíticos y de toba. En toda la sucesión se observa gradación normal, estratificación cruzada y estructuras de canal.

Aflora a lo largo del límite nor-oriental del área de estudio, entre los poblados de Arroyo Grande y Characo, donde yace arriba de las rocas de la Formación Mal Paso. Su contacto estratigráfico inferior no pudo observarse en el área de estudio, ya que siempre se encuentra cubierto por la vegetación o afectado por fallas transcurrentes sub-verticales, que ponen en contacto las rocas de la Formación Cutzamala con la Formación Mal Paso. Sólo es posible estimar un espesor mínimo de 1,000 m, ya que la cima de la sucesión no aflora en el área de estudio.

Formación Capeo

Nombre informal de esta unidad estratigráfica que aflora ampliamente en la parte noroccidental del área de estudio, entre los poblados de Zirándaro, San Ignacio y Quetzerio. Está compuesta por una sucesión de conglomerado vulcanoclástico, arenisca, lutita, limolita y escasos derrames de lava, que yacen horizontalmente en discordancia angular por encima de las rocas plegadas de las formaciones San Lucas y Comburindio.

Los conglomerados presentan un color desde rojizo a gris. Son masivos, principalmente matriz-soportados, moderadamente a mal clasificados. Los clastos son predominantemente de composición andesítica, aunque se observan también clastos dacíticos y tobáceos.

Las areniscas presentan un color variable de rojizo a gris, son de grano medio a grueso, moderadamente a bien clasificadas. Composicionalmente varían desde cuarzo arenitas a arcosas líticas. Presenta estructuras sedimentarias como gradación normal, estratificación cruzada y rellenos de canal, así como derrames de lava, de espesor variable desde 40 cm a 1.5 m, interestratificados con la sucesión clástica.

Las rocas de la Formación Capeo se encuentran intrusionadas por batolitos cenozoicos, que desarrollaron una aureola metamórfica de contacto en las rocas encajonantes, generando cuarcitas de grano fino a grueso, su espesor total es difícil de estimar, ya que su cima fue erosionada.

Considerando que las rocas de esta formación presentan estratificación horizontal, se ha calculado un espesor mínimo de 1,000 m, con base en la elevación topográfica máxima y mínima a las que se encuentran aflorando estas rocas.

Dado que las rocas de las formaciones antes descritas se encuentran plegadas, mientras que la sucesión de la Formación Capeo yace de manera horizontal, se considera que esta última representa una unidad estratigráfica cretácica más joven de esta región.

Cenozoico (Neógeno)

En discordancia erosional se depositaron rocas volcánicas cenozoicas de la Sierra Madre Occidental, iniciando con andesitas, brechas andesíticas y algunos niveles dacíticos, afectadas por un intrusivo granítico. Cubriendo discordantemente a la unidad de andesitas, existen dacitas y riolitas que hacia su cima gradúan a ignimbritas y riolitas. Las dataciones indican una edad correspondiente al periodo Oligoceno-Mioceno.

Batolito de Placeres del Oro

Aflora en la parte central del área de estudio, entre los poblados de Santa Teresa y Pinzán Morado, intrusionando a las rocas de las formaciones Río Placeres y San Lucas.

A lo largo del contacto, en las rocas de la Formación San Lucas, se desarrolla una aureola metamórfica, compuesta por cuarcitas de grano fino a grueso, caracterizadas por la recristalización del cuarzo y en algunos casos por la cristalización estática de biotita. La relación de este batolito con las rocas de la Formación Comburindio se desconoce, ya que el contacto entre ellos siempre está cubierto en el área de estudio. Sin embargo, a lo largo del contacto con el batolito, las rocas clásticas de la Formación Comburindio no muestran evidencias de recristalización, por lo que se sugiere que la deposición de esta formación ocurrió, por lo menos en parte, posteriormente al emplazamiento del intrusivo.

Cuaternario

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 localizan principalmente en los valles de El Naranjo, Santa Teresa, Pineda y Placeres del Oro, así como en las riberas del Río Balsas y arroyos.

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 deformación frágil se observa mejor en las unidades cenozoicas, granitos e ignimbritas, con dos sistemas de esfuerzos principales al N40°W y N40°E, que generan alineamientos NW-SE, como la falla sinestral que se observa entre La Huacana a Guayameo.

Las secuencias asociadas al arco volcánico Amangarícuaro y las secuencias de Huetamo conforman anticlinales y sinclinales abiertos con ejes orientados tanto al NW como al NE, en la zona de Huetamo se observan los anticlinales Characo, La Estancia y Tichiqueo.

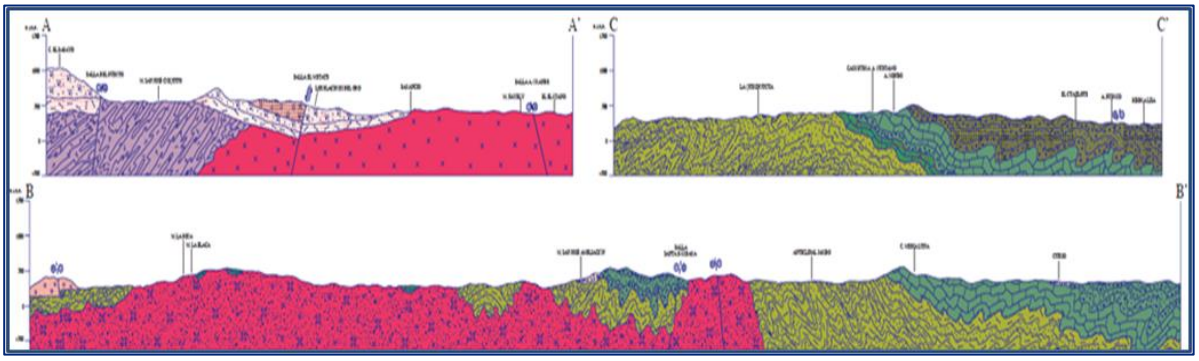
4.3 Geología del subsuelo

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 del Río Balsas y 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.

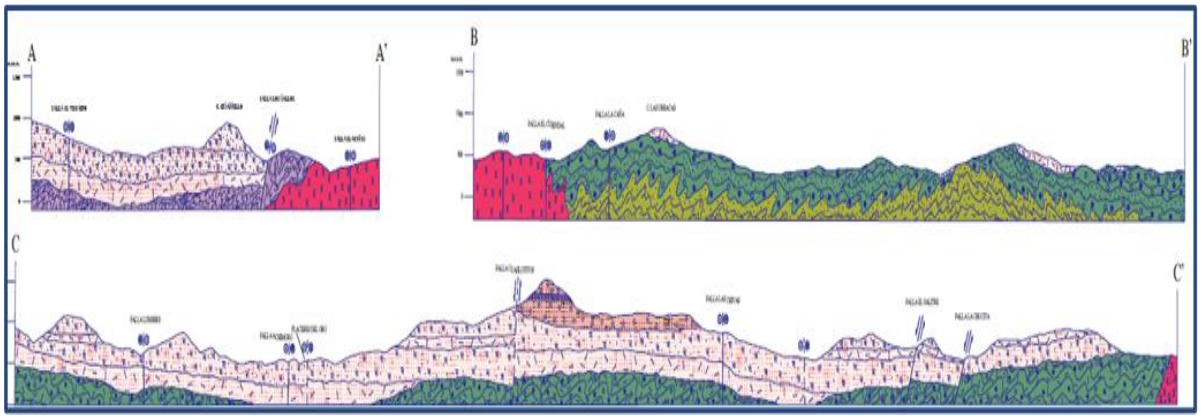
La porción inferior se aloja en rocas sedimentarias e ígneas fracturadas. Las evidencias directas e indirectas demuestran que el espesor del medio granular varía desde algunos metros en las estribaciones de las sierras, incrementándose ligeramente en las inmediaciones de los cauces de los ríos y arroyos, 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 representadas 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-A74 “Coyuca de Catalán”. Esc.: 1:50,000. SGM, 2002



Fuente: Carta Geológico-Minera E14-A84 “Placeres del Oro”. Esc.: 1:50,000 (SGM, 2002)

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 permeabilidad media a baja 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 10 pruebas de bombeo de corta duración (4 a 10 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 1.9 x 10-4 a 6.1 x 10-3 m^2/s. De acuerdo con el espesor saturado, la conductividad hidráulica varía de 3.5 x10-5 a 7.5 x10-4 m/s (0.3 a 65 .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 siete 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: Zirándaro-Calera, La Ciénega, Embarcadero, San José, Patambo, Paso de Arena y Chamacua.

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 1 a 17 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 la porción norte de las diferentes zonas de balance, mientras que las zonas con mayor profundidad se registran en la porción sur de ellas (figuras 4 a 7).

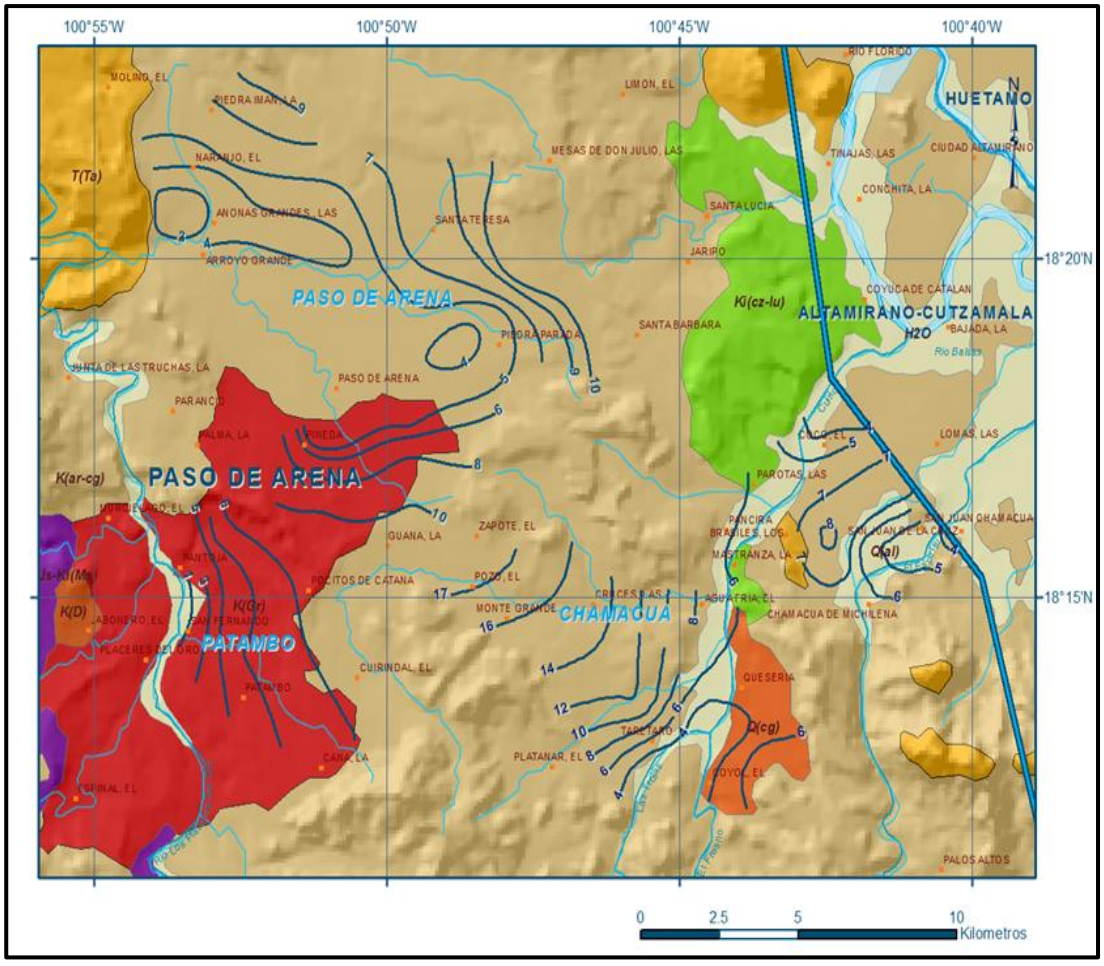


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zonas Paso de Arena, Chamacua y Patambo

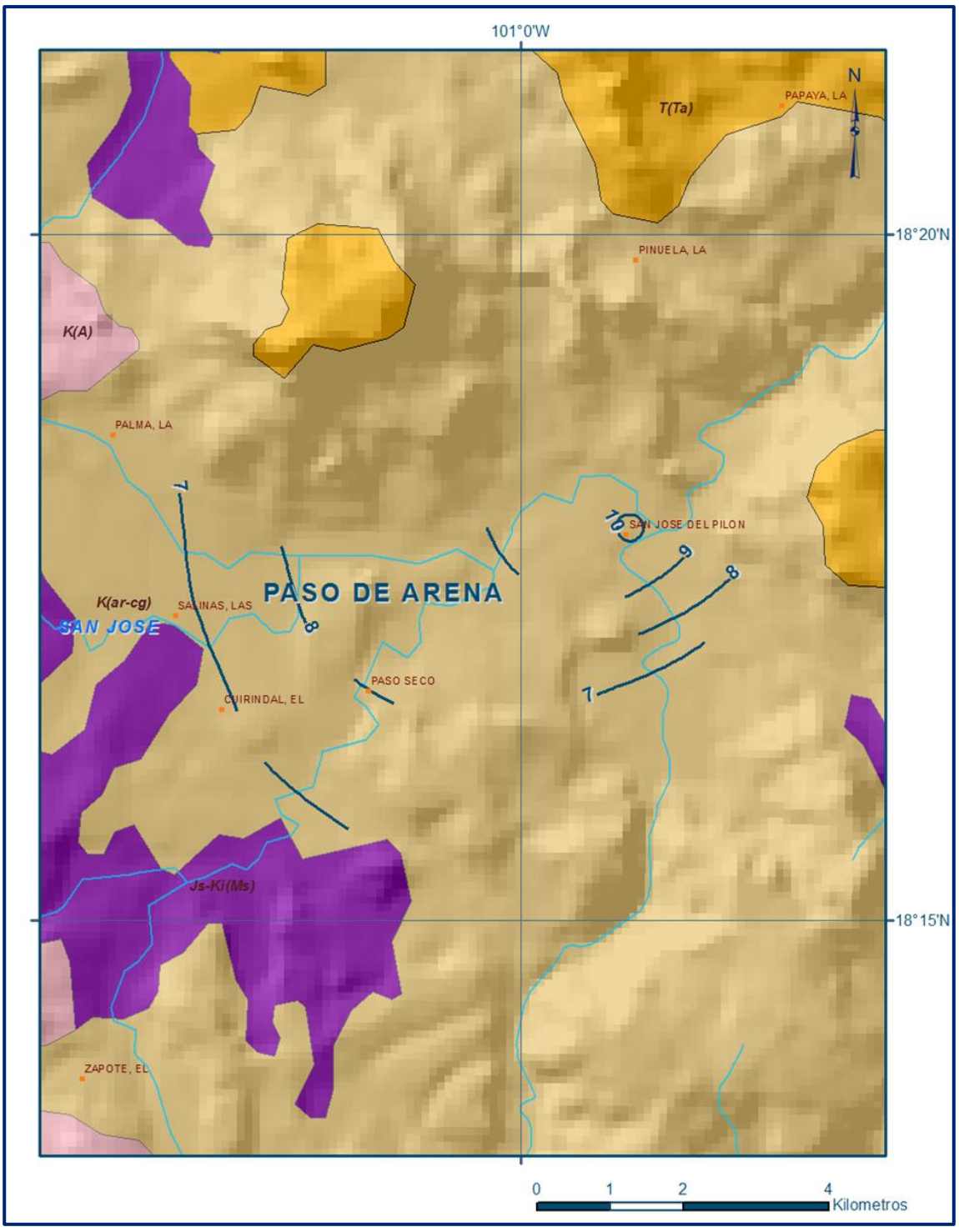


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zona San José

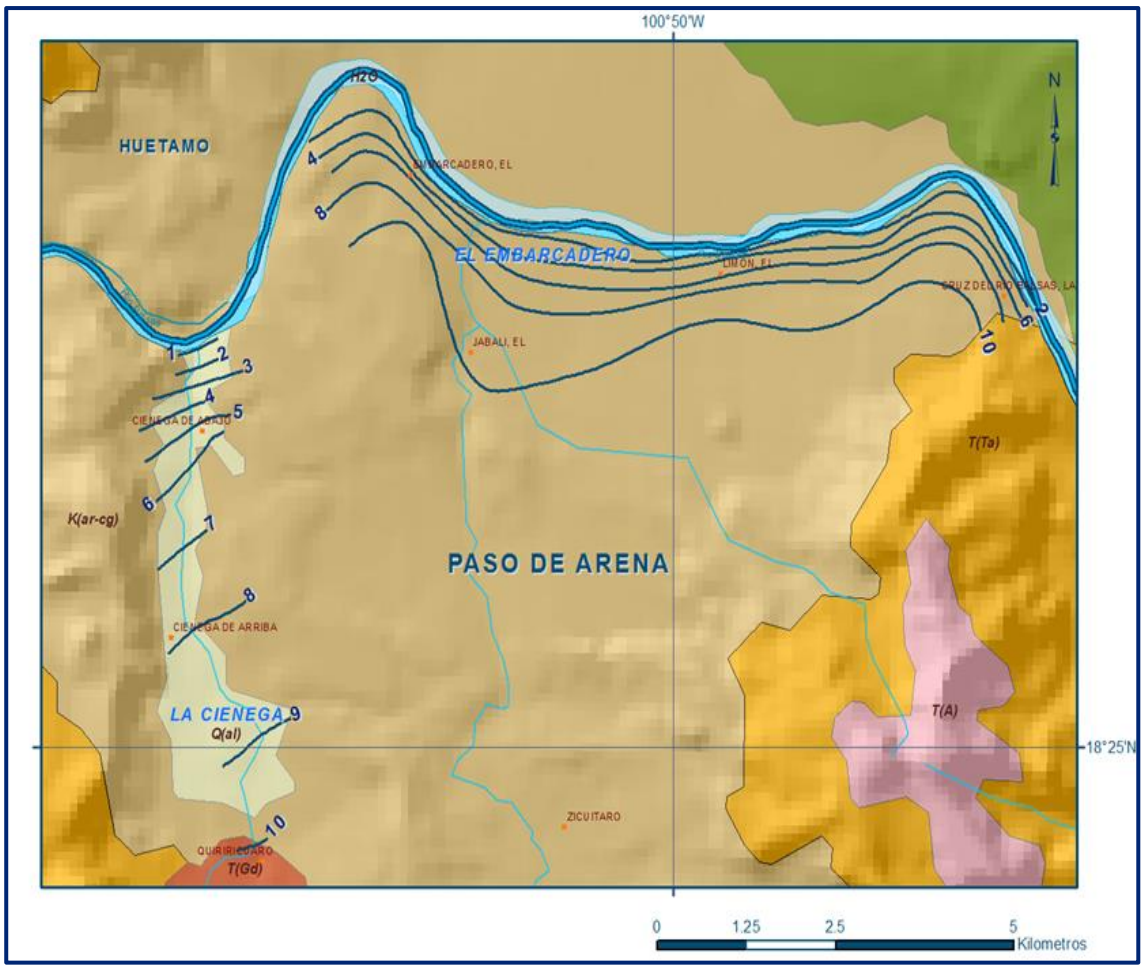


Figura 6. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zonas La Ciénega y El Embarcadero

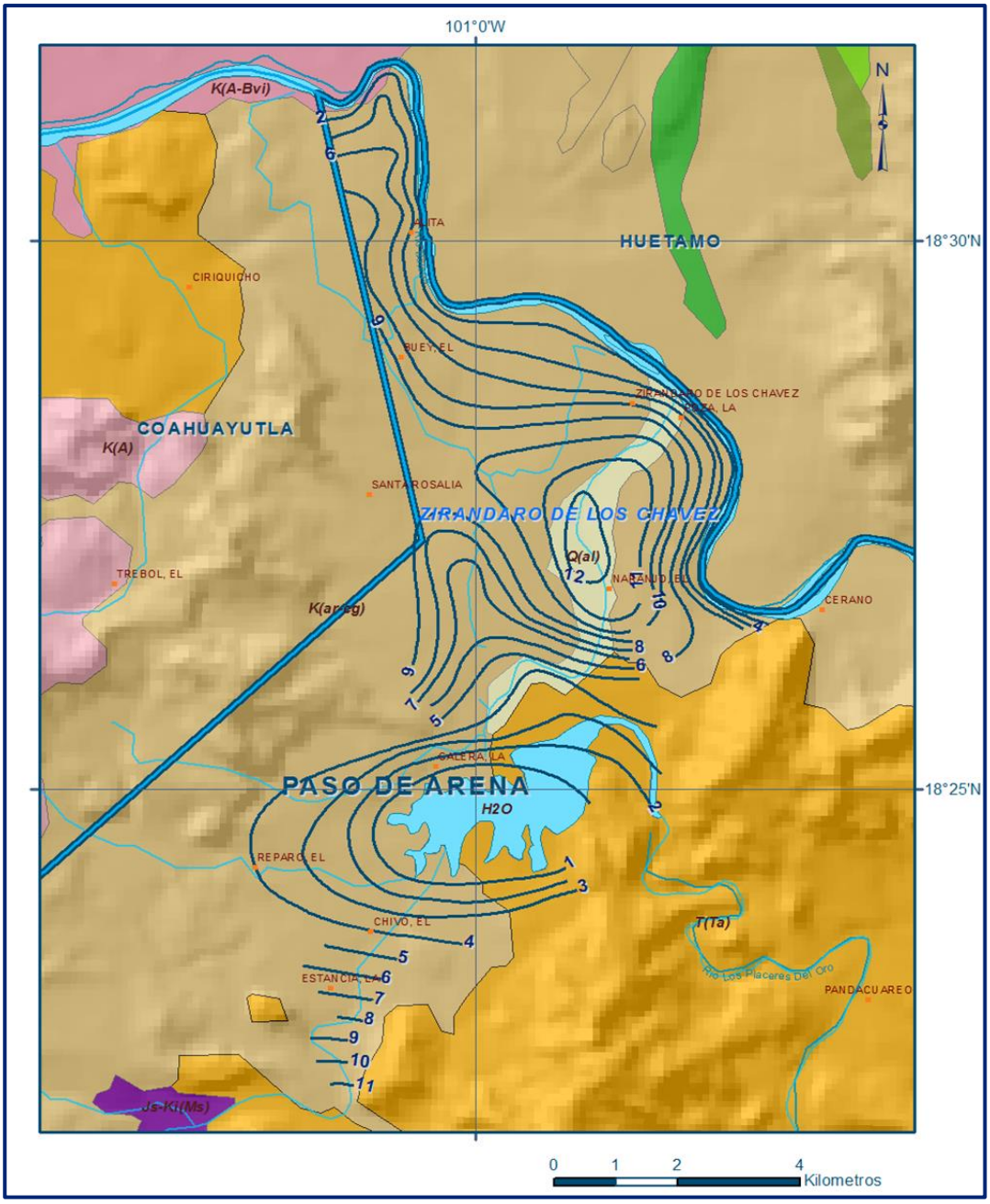


Figura 7. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zona Zirándaro

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2013, presenta valores que varían de 195 a 530 msnm, decreciendo de las partes topográficamente más altas ubicadas al sur del acuífero, hacia el norte en dirección del Río Balsas, como sucede en las zonas de balance ubicadas al norte del acuífero: Zirándaro-La Calera, La Ciénega y El embarcadero.

En la zona de balance San José la dirección preferencial del flujo subterráneo es oeste-este, en tanto que en las zonas Paso de Arena y Patambo es en sentido contrario, oeste-este y en la zona Chamacua es suroeste-noreste; en todas ellas el flujo se dirige hacia los cañones de los arroyos y ríos tributarios del Río Balsas (figuras 8 a 12).

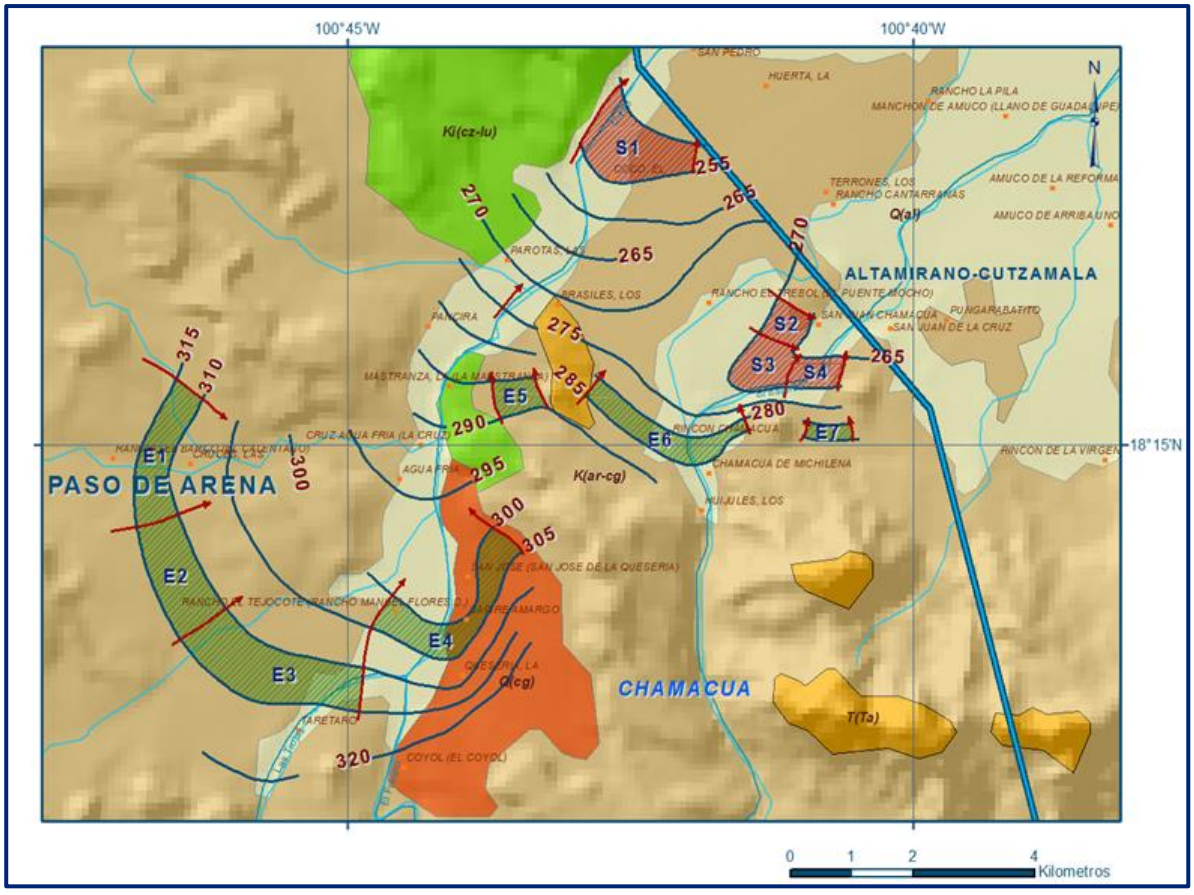


Figura 8. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zona Chamacua

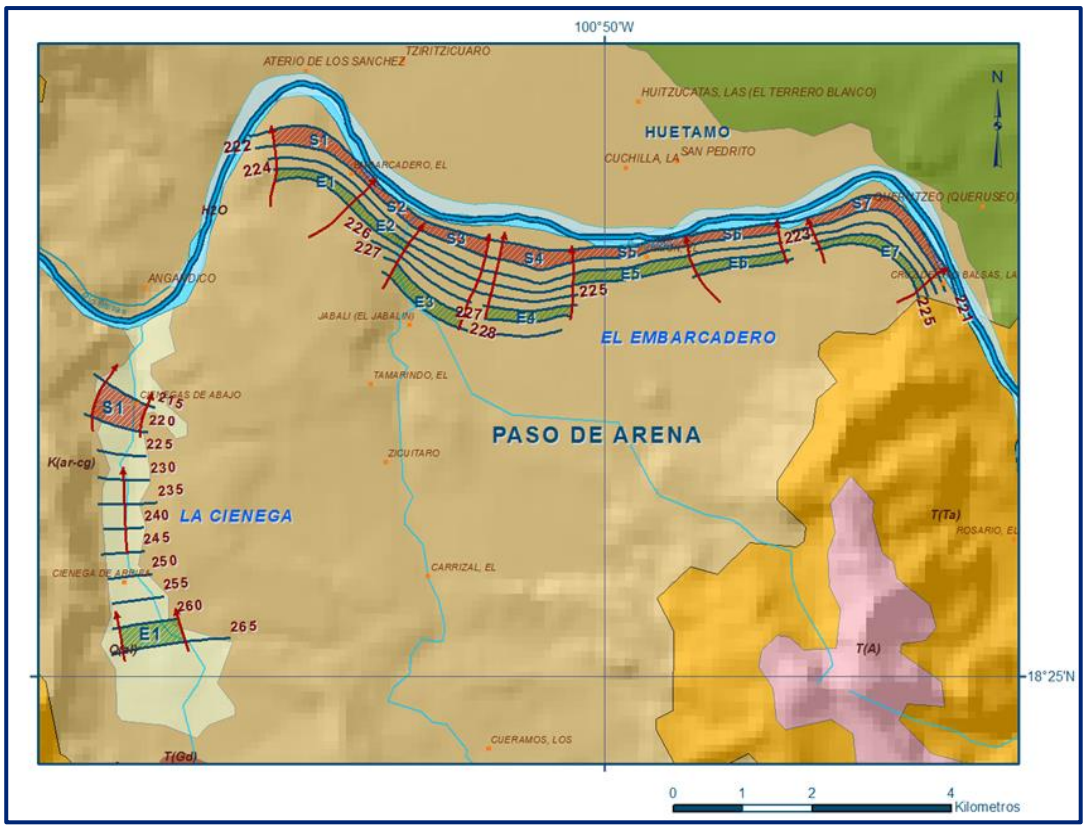


Figura 9. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zonas La Ciénega y El Embarcadero

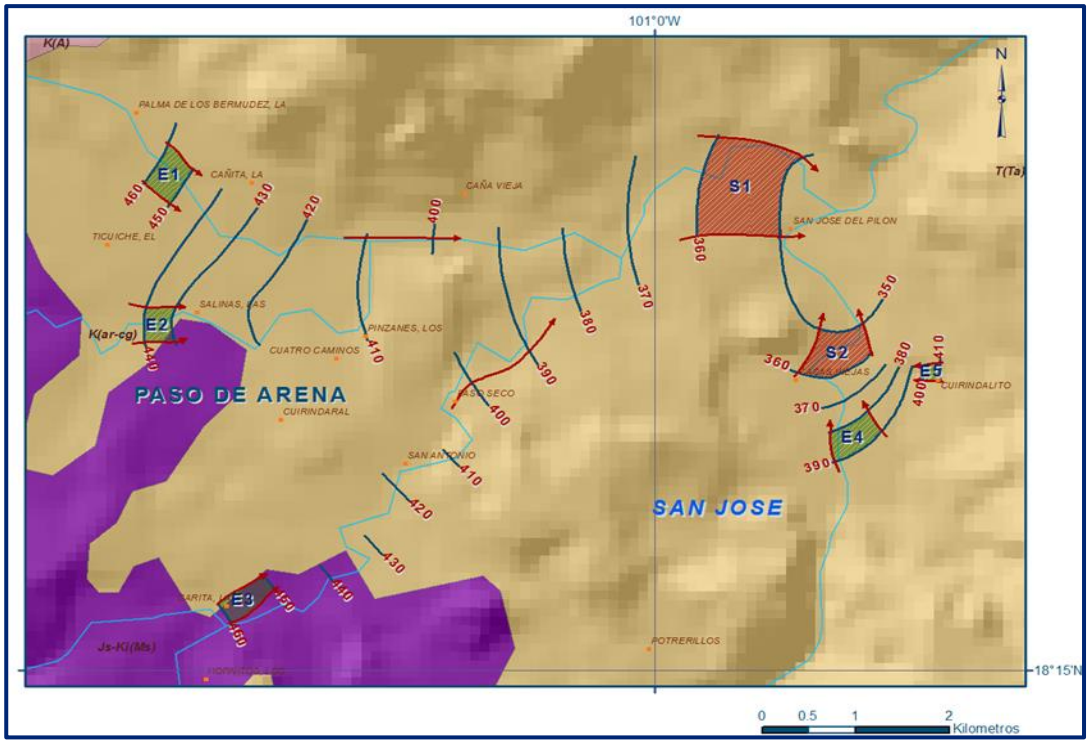


Figura 10. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zona San José

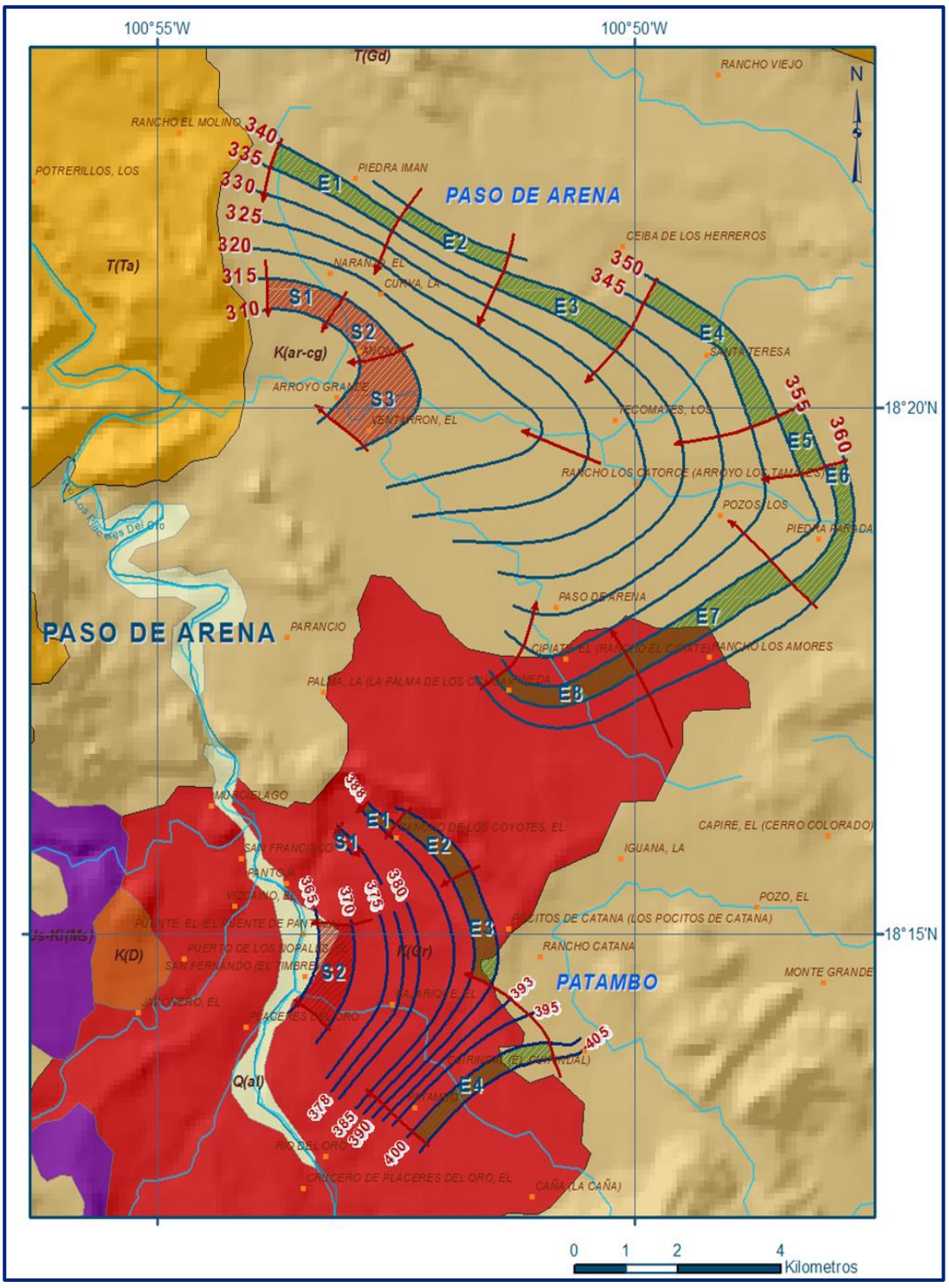


Figura 11. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zonas Paso de Arena y Patambo

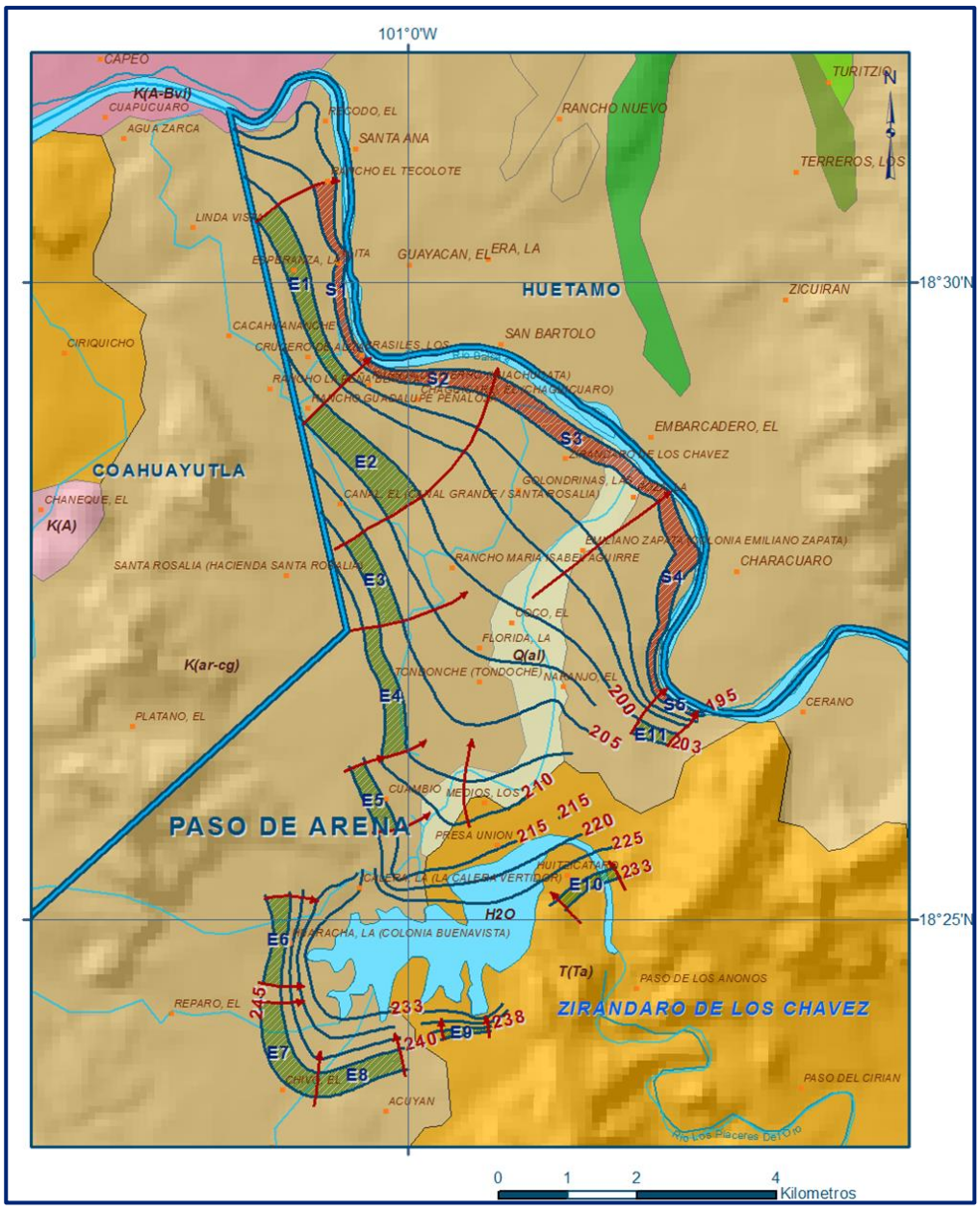


Figura 12. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zona Zirándaro

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, la mayor parte en 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 138 a 1,890 mg/l. Sólo dos 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 límites máximos permisibles establecidos por la norma mencionada.

En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores son menores de 2000 mS/cm. La temperatura del agua varía de 28.4 a 31.4 °C y el pH de 7.8 a 8.6.

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 (C2) y contenido bajo de sodio intercambiable (S1), lo que indica que es apropiada para riego sin restricciones.

De la representación de los resultados en los diferentes diagramas, se concluye que las familias de agua predominantes son la bicarbonatada-cálcica y la bicarbonatada-magnésica, que representan agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia que han circulado a través de rocas volcánicas y sedimentarias calcáreas.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con el censo realizado en el 2013, se registró la existencia de 100 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 34 son pozos y 66 norias; de ellos, 91 se consideran activos (28 pozos y 63 norias) y 9 inactivos (6 pozos y 3 norias). De las obras activas, 38 se destinan al uso público-urbano, 8 para uso agrícola, 42 para uso pecuario-doméstico y 3 para servicios.

El volumen de extracción calculado es de **3.0 hm^3 anuales**, de los cuales 2.3 hm^3 (76.7%) se utilizan para abastecimiento de agua potable a las poblaciones, 0.2 (6.6%) hm^3 para uso agrícola y 0.5 hm^3 (16.7%) para usos pecuario-doméstico. El volumen para uso de servicios es muy pequeño.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2013, en una superficie de 250.5 km^2 del acuífero, divididos en 7 áreas de balance, en las que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos.

Estas zonas son Zirándaro-Calera con 49.7 km^2, La Ciénega que tiene una superficie de 5.0 km^2, El Embarcadero con 12.4 km^2, San José con 12.8 km^2, Patambo tiene un área de 23.7 km^2, Paso de Arena 85.5 km^2 y finalmente la zona denominada Chamacua con 61.4 km^2.

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

Entradas (E) - Salidas (S) = Cambio de almacenamiento

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:

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 (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 agua destinada al uso agrícola (Rr), 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 (Ri).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

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 las zonas de balance denominadas Zirándaro-La Calera y Chamacua, en las que la ecuación de balance definida es:

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

Para las otras 5 zonas de balance definidas, La Ciénega, El Embarcadero, San José, Paso de Arena y Patambo, que no tienen fuljo base, la recarga vertical es la incógnita de la ecuación

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

Donde:

Rv = Recarga vertical;
Rr = Recarga inducida por riego agrícola;
Eh = Recarga por flujo horizontal;
B = Bombeo;
Sh = Salidas por flujo horizontal;
Dfb = Descarga natural por flujo base;
ETR = Evapotranspiración real;
ΔV(S) = Cambio de almacenamiento;

En las zonas de balance Zirándaro-La Calera y Chamacua, tomando en cuenta los valores de precipitación de 837 y 1,062 mm anuales, área de 49.7 y 61.4 km^2, respectivamente, se obtiene un volumen de lluvia de 41.6 y 65.2 hm^3 anuales, respectivamente.

Al aplicar los coeficientes de infiltración obtenidos, 7.6 y 6.9 %, respectivamente, el valor de la recarga vertical Rv es de 3.2 y 4.5 hm^3 anuales, como se muestra en la siguiente tabla.

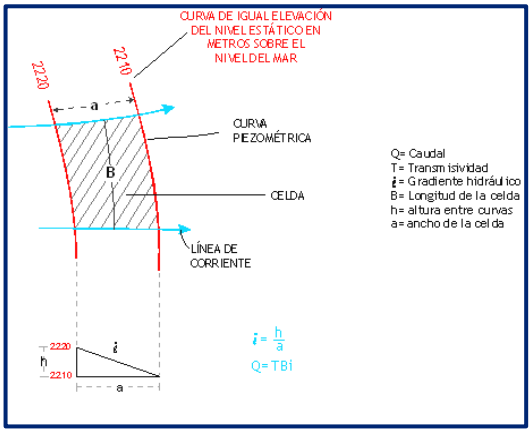
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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 las figuras 8 a 12, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)
T = Transmisividad (m^2/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 **17.2 hm³ anuales.**

Tabla 2. Cálculo de entradas 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 ZIRÁNDARO-LA CALERA							
E1	2707	280	1	0.00357	0.00133	0.0129	0.41
E2	1845	472	2.5	0.00530	0.00133	0.0130	0.41
E3	1345	318	2.5	0.00786	0.00133	0.0141	0.44
E4	1903	301	2.5	0.00831	0.00133	0.0210	0.66
E5	1026	241	5	0.02075	0.00133	0.0283	0.89
E6	1289	291	5	0.01718	0.00133	0.0295	0.93
E7	1479	320	5	0.01563	0.00133	0.0307	0.97
E8	1223	328	5	0.01524	0.00133	0.0248	0.78
E9	631	93	2.5	0.02688	0.00133	0.0226	0.71
E10	878	171	2.5	0.01462	0.00133	0.0171	0.54
E11	559	212	2.5	0.01179	0.00133	0.0088	0.28
						SUBTOTAL	**7.02**
ZONA LA CIÉNEGA							
E1	847	345	5	0.01449	0.00138	0.0169	0.53
						SUBTOTAL	**0.53**
ZONA EL EMBARCADERO							
E1	1194	156	1	0.00641	0.00172	0.0132	0.42
E2	972	124	1	0.00806	0.00172	0.0135	0.43
E3	1093	132	1	0.00758	0.00172	0.0142	0.45
E4	1354	153	1	0.00654	0.00172	0.0152	0.48
E5	1644	154	1	0.00649	0.00172	0.0184	0.58
E6	1244	146	1	0.00685	0.00172	0.0147	0.46
E7	1715	117	1	0.00855	0.00172	0.0252	0.80
						SUBTOTAL	**3.61**
ZONA SAN JOSÉ							
E1	477	365	10	0.02740	0.00100	0.0131	0.41
E2	409	304	10	0.03289	0.00100	0.0135	0.42
E3	225	580	10	0.01724	0.00100	0.0039	0.12
E4	532	308	10	0.03247	0.00006	0.0010	0.03
E5	195	168	10	0.05952	0.00006	0.0007	0.02
						SUBTOTAL	**1.01**
ZONA PASO DE ARENA							
E1	2558	364	5	0.01374	0.00001	0.0004	0.01
E2	2094	292	5	0.01712	0.00001	0.0004	0.01
E3	2523	422	5	0.01185	0.00001	0.0003	0.01
E4	3247	490	5	0.01020	0.00006	0.0020	0.06
E5	1130	460	5	0.01087	0.00006	0.0007	0.02
E6	2586	454	5	0.01101	0.00052	0.0148	0.47
E7	3198	502	5	0.00996	0.00052	0.0166	0.52
E8	2660	367	5	0.01362	0.00052	0.0188	0.59
						SUBTOTAL	**1.70**
ZONA PATAMBO							
E1	669	197	2.5	0.01269	0.00011	0.0009	0.03
E2	1519	349	2.5	0.00716	0.00011	0.0012	0.04
E3	1959	400	2.5	0.00625	0.00011	0.0013	0.04
E4	2972	311	5	0.01608	0.00011	0.0053	0.17
						SUBTOTAL	**0.28**
ZONA CHAMACUA							
E1	2236	596	5	0.00839	0.00091	0.0171	0.54
E2	1795	771	5	0.00649	0.00069	0.0080	0.25
E3	2795	778	5	0.00643	0.00069	0.0124	0.39
E4	3155	604	5	0.00828	0.00069	0.0180	0.57
E5	720	575	5	0.00870	0.00069	0.0043	0.14
E6	2879	275	5	0.01818	0.00069	0.0361	1.14
E7	721	247	5	0.02024	0.00007	0.0010	0.03
						SUBTOTAL	**3.06**
						TOTAL ENTRADAS	**17.21**

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 inducida (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 las zonas de balance Zirándaro-La Calera y Chamacua existen zonas agrícolas de riego; la primera es regada con aguas procedentes de la presa La Calera, mientras que en la segunda el agua proviene de una presa derivadora localizada sobre el Río Chamacua, aguas arriba de la localidad de mismo nombre.

En estas dos zonas la superficie de riego es de 18.94 km^2 de (13.12 y 5.82 km^2, respectivamente), considerando una lámina bruta de riego de 1 m y que sólo el 10% del volumen aplicado a la zona parcelaria es recarga efectiva al acuífero, el valor de esta componente es 1.3 y 0.6 hm^3/año, respectivamente, es decir, un total de 1.9 hm^3/año. Por lo tanto, **Rr = 1.9 hm^3 /año.**

7.2 Salidas

Las descargas ocurren principalmente por salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh), evapotranspiración (ETR), bombeo (B) y por flujo base (Dfb). Para la zona Zirándaro-La Calera esta componente engloba el fuljo base y la descarga superficial a un cuerpo de agua perene, que en este caso es la Presa “La Calera”.

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)

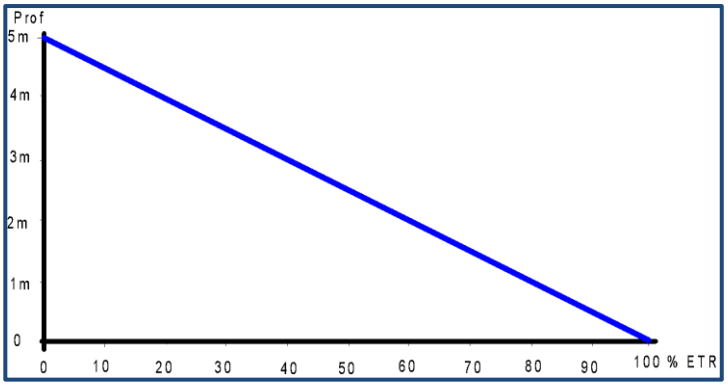
La precipitación y temperatura utilizadas son las obtenidas en las normales climatológicas de las estaciones de mayor proximidad a cada área de balance referida.

Para las zonas Zirándaro-La Calera, La Calera y El Embarcadero se obtuvo una lámina de ETR de 818 mm anuales, para las zonas San José, Patambo y Paso de Arena la lámina fue de 984 mm anuales; por último, para la zona Chamacua la lámina obtenida fue de 982 mm anuales.

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 porciento de ETR.

Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el porciento 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 22.4 hm^3/año Por lo tanto, **ETR = 22.4 hm^3/año.**

Tabla 3. Cálculo de la evapotranspiración. (2013)

INTERVALO CURVAS (m)	PROFUNDIDAD CONSIDERADA (m)	ÁREA (km^2)	PORCENTAJE (%)	LÁMINA DE ETR (m)	VOLUMEN DE ETR (hm^3/año)
ZONA ZIRANDARO-LA CALERA					
0 A1	0.5	3.89	90%	0.818	2.87
1 A 2	1.5	3.61	70%	0.818	2.07
2 A 3	2.5	0.46	50%	0.818	0.19
3 A 4	3.5	4.77	30%	0.818	1.17
4 A 5	4.5	2.26	10%	0.818	0.18
SUBTOTAL					6.48
ZONA LA CIENEGA					
0 A1	0.5	0.07	90%	0.818	0.05
1 A 2	1.5	0.14	70%	0.818	0.08
2 A 3	2.5	0.2	50%	0.818	0.08
3 A 4	3.5	0.28	30%	0.818	0.07
4 A 5	4.5	0.33	10%	0.818	0.03
SUBTOTAL					0.31
ZONA EL EMBARCADERO					
0 A1	0.5	0.64	90%	0.818	0.47
1 A 2	1.5	0.83	70%	0.818	0.48
2 A 3	2.5	0.82	50%	0.818	0.34
3 A 4	3.5	0.8	30%	0.818	0.2
4 A 5	4.5	0.79	10%	0.818	0.06
SUBTOTAL					1.55
ZONA SAN JOSE					
0 A1	0.5	0	90%	0.984	0
1 A 2	1.5	1.29	70%	0.984	0.89
2 A 3	2.5	1.19	50%	0.984	0.58
3 A 4	3.5	0.57	30%	0.984	0.17
4 A 5	4.5	0.45	10%	0.984	0.04
SUBTOTAL					1.68
ZONA PASO DE ARENA					
0 A1	0.5	0	90%	0.984	0
1 A 2	1.5	0	70%	0.984	0
2 A 3	2.5	2.08	50%	0.984	1.02
3 A 4	3.5	13.53	30%	0.984	3.99
4 A 5	4.5	23.24	10%	0.984	2.29
SUBTOTAL					7.3
ZONA PATAMBO					
0 A1	0.5	0.65	90%	0.984	0.58
1 A 2	1.5	0.55	70%	0.984	0.38
2 A 3	2.5	0.7	50%	0.984	0.34
3 A 4	3.5	1.02	30%	0.984	0.3
4 A 5	4.5	1.28	10%	0.984	0.13
SUBTOTAL					1.73
ZONA CHAMACUA					
0 A1	0.5	0	90%	0.982	0
1 A 2	1.5	0	70%	0.982	0
2 A 3	2.5	2.29	50%	0.982	1.12
3 A 4	3.5	6.01	30%	0.982	1.77
4 A 5	4.5	5.2	10%	0.982	0.51
SUBTOTAL					3.4
SUMA TOTAL					**22.45**

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción por bombeo es de **3.0 hm^3/año,** en todo el acuífero, distribuidos de la siguiente manera: 0.3 hm^3 en Zirándaro-La Calera, 0.1 hm^3 en La Ciénega, 0.1 hm^3 en El Embarcadero, 0.5 hm^3 en San José, 1.3 hm^3 en Paso de Arena, 0.6 hm^3 en Patambo y 0.1 hm^3 en Chamacua.

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 presentada en las figuras 8 a 12. Su valor es de **6.1 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 ZIRÁNDARO-LA CALERA							
S1	2765	225	0.5	0.00222	0.00150	0.0092	0.29
S2	1790	210	0.5	0.00238	0.00150	0.0064	0.20
S3	2870	265	0.5	0.00189	0.00150	0.0081	0.26
S4	3085	170	0.5	0.00294	0.00150	0.0136	0.43
S5	550	85	0.5	0.00588	0.00150	0.0049	0.15
						SUBTOTAL	**1.33**
ZONA LA CIÉNEGA							
S1	680	460	5	0.01087	0.00172	0.0127	0.40
						SUBTOTAL	**0.40**
ZONA EL EMBARCADERO							
S1	1605	170	1	0.00588	0.00138	0.0130	0.41
S2	915	140	1	0.00714	0.00138	0.0090	0.28
S3	940	200	1	0.00500	0.00138	0.0065	0.20
S4	1195	210	1	0.00476	0.00138	0.0079	0.25
S5	1585	155	1	0.00645	0.00138	0.0141	0.45
S6	1270	140	1	0.00714	0.00138	0.0125	0.39
S7	2345	135	1	0.00741	0.00138	0.0240	0.76
						SUBTOTAL	**2.74**
ZONA SAN JOSÉ							
S1	1075	885	9	0.01017	0.00089	0.0097	0.31
S2	665	455	9	0.01978	0.00089	0.0117	0.37
						SUBTOTAL	**0.68**
ZONA PASO DE ARENA							
S1	1295	535	5	0.00935	0.00006	0.0007	0.02
S2	1182	660	5	0.00758	0.00006	0.0005	0.02
S3	1750	835	5	0.00599	0.00006	0.0006	0.02
						SUBTOTAL	**0.06**
ZONA PATAMBO							
S1	515	220	2.5	0.01136	0.00011	0.0006	0.02
S2	1705	665	5	0.00752	0.00011	0.0014	0.04
						SUBTOTAL	**0.06**
ZONA CHAMACUA							
S1	1870	790	5	0.00633	0.00087	0.0103	0.32
S2	615	620	5	0.00806	0.00087	0.0043	0.14
S3	1030	575	5	0.00870	0.00087	0.0078	0.25
S4	760	515	5	0.00971	0.00087	0.0064	0.20
						SUBTOTAL	**0.91**
						TOTAL SALIDAS	**6.12**

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(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**, ΔV(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 las 2 zonas que lo presentan, de acuerdo con la ecuación (1):

$$\mathbf{Dfb = \pm \Delta V(S) + Rv + Rr + Eh - Sh - B - ETR} \qquad \mathbf{(1)}$$

Zona Zirándaro-La Calera:

$$Dfb = 0.0 + 3.2 + 1.3 + 7.0 - 1.3 - 0.3 - 6.5$$

$$\mathbf{Dfb = 3.4\ hm^3}$$

Zona Chamacua:

$$Dfb = 0.0 + 4.5 + 0.6 + 3.1 - 0.9 - 0.1 - 3.4$$

$$\mathbf{Dfb = 3.8\ hm^3}$$

Para las zonas La Ciénega, Embarcadero, San José, Paso de Arena y Patambo la incógnita es la recarga vertical y se obtuvo de la siguiente expresión:

$$\mathbf{Rv = Sh + B + ETR \pm \Delta V(S) - Rr - Eh} \qquad \mathbf{(2)}$$

Zona La Ciénega:

$$Rv = 0.4 + 0.1 + 0.3 - 0.0 - 0.0 - 0.5$$

$$\mathbf{Rv = 0.3\ hm^3\ anuales}$$

Zona El Embarcadero:

$$Rv = 2.7 + 0.1 + 1.5 - 0.0 - 0.0 - 3.6$$

$$\mathbf{Rv = 0.7\ hm^3\ anuales}$$

Zona San José:

$$Rv = 0.7 + 0.5 + 1.7 - 0.0 - 0.0 - 1.0$$

$$\mathbf{Rv = 1.9\ hm^3\ anuales}$$

Zona Paso de Arena:

$$Rv = 0.1 + 1.3 + 7.3 - 0.0 - 0.0 - 1.7$$

Rv= 7.0 hm³ anuales

Zona Patambo:

Rv = 0.1 + 0.6+ 1.7 – 0.0 – 0.0 – 0.3

Rv= 2.1 hm³ anuales

Por lo tanto, la Rv total de las 7 zonas de balance es

Rv = 3.2 + 4.5 + 0.3 + 0.7 + 1.9 + 7.0 + 2.1

Rv = 19.7

Y la recarga total (R) es igual a:

R = Rv + Eh + Ri

R = 19.7 + 17.2 + 1.9

R = 38.8 hm³ anuales

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que, en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la siguiente expresión:

DMA = R – DNC – VEAS (3)

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica;

R = Recarga total media anual;

DNC = Descarga natural comprometida;

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas;

8.1 Recarga total (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, de los cuales son recarga natural y recarga inducida. Para este caso, su valor es de **38.8 hm³/año**,

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, se considera un volumen de descarga natural comprometida de **12.5 hm³ anuales**, que corresponden a la descarga del flujo base y a las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero vecino Altamirano-Cutzamala (zona Chamacua) y hacia el Río Balsas (zonas Zirándaro-La Calera, La Ciénega y El Embarcadero).

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **30 de diciembre de 2022** es de **2,116,900 m³/año.**

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, de acuerdo con la expresión 3, 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

$$DMA = R - DNC - VEAS$$
$$DMA = 38.8 - 12.5 - 2.116900$$
$$DMA = 24.183100\ hm^3/año$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **24,183,100 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.