



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO COAHUAYUTLA (1211), 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	4
3. FISIOGRAFIA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica.....	6
3.2 Clima.....	8
3.3 Hidrología superficial	8
3.4 Geomorfología.....	10
4. GEOLOGÍA.....	11
4.1 Estratigrafía.....	14
4.2 Geología estructural	24
4.3 Geología del subsuelo	27
5. HIDROGEOLOGÍA.....	28
5.1 Tipo de acuífero	28
5.2 Parámetros hidráulicos.....	28
5.3 Piezometría	28
5.4 Comportamiento hidráulico.....	29
5.4.1 Profundidad al nivel estático	29
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	31
5.4.3 Evolución del nivel estático	31
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	34
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA	35
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS.....	36
7.1 Entradas	36
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	37
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)	38
7.2 Salidas.....	40
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	40
7.2.2 Bombeo (B).....	42
7.2.3 Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh)	43
7.3 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	44
8. DISPONIBILIDAD	45
8.1 Recarga total (R).....	46
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	46
8.3 Volumen concesionado de agua subterránea (VEAS).....	46
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	46
9. BIBLIOGRAFÍA.....	48

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 Coahuayutla, definido con la clave 1211 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción occidental del Estado de Guerrero, en el límite con el Estado de Michoacán, entre los paralelos 18°12' 40" a 18°36' 06" de latitud norte y los meridianos 101°00'26" a 101°53' 24" de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 2,575 km²(figura 1).

Limita al norte el acuífero Churumuco, perteneciente al Estado de Michoacán; al este con Paso de Arena, al sur con La Unión, ambos pertenecientes al Estado de Guerrero; y al oeste con el acuífero Lázaro Cárdenas, del Estado de Michoacán.

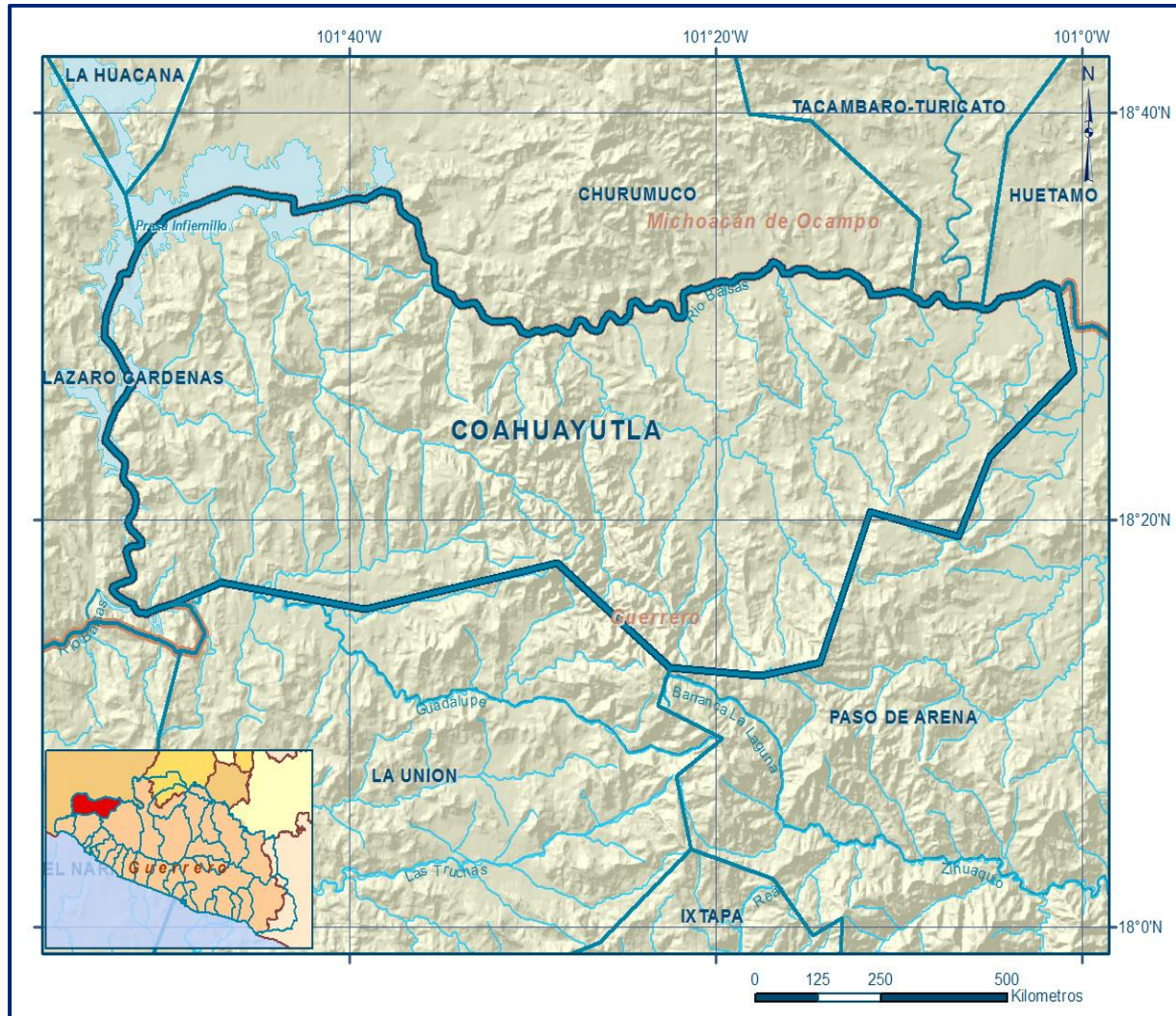


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios Coahuayutla de José María y Zirándaro. 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

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	101	51	33.4	18	33	14.4	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE
2	101	9	23.4	18	31	2.2	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE
3	101	5	31.7	18	30	23.4	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE
4	101	1	23.5	18	31	21.2	
5	101	0	28.2	18	27	16.2	
6	101	5	2.4	18	23	7.2	
7	101	6	47.9	18	19	11	
8	101	11	37.5	18	20	24.1	
9	101	14	19.3	18	12	59.7	
10	101	17	33.4	18	12	21.7	
11	101	22	30.7	18	12	45.9	
12	101	28	39.6	18	17	53.7	
13	101	39	8.8	18	15	36.3	
14	101	47	0.8	18	16	54.1	
15	101	49	48.5	18	15	49.4	DEL 15 AL 1 POR EL LIMITE
1	101	51	33.4	18	33	14.4	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Coahuayutla pertenece al Organismo de Cuenca Balsas y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Guerrero. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto 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.

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), se ubica en la provincia fisiográfica “Sierra Madre del Sur”; subprovincia “Cordillera Costera del Sur”; una pequeña porción de su extremo nororiental pertenece a 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 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 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 adentro 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 predominan los climas (BS) semiárido y (A) cálido con lluvias en verano, con temperatura media anual mayor de 22 °C, del mes más frío mayor a 18°C y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2%, con algunas variantes que, en orden de importancia son: BS1(h')w(w) semiárido cálido, que se presenta en las partes topográficamente más altas a lo largo de la margen izquierda del Río Balsas; Aw0(w) cálido subhúmedo que registra la porción suroriental del acuífero, con altura de precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; BS0(h')w(w) árido cálido que se presenta en el límite occidental del acuífero en torno del vaso de almacenamiento de la presa El Infiernillo.

A(C)w1(w) semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, que se presenta de manera aislada en los cerros La Teja y Cuestas Cuatas.

Por último, el clima C(w2) (w) templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente menor de 22°C, que se registra en la porción serrana del acuífero, 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 6 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Guayameo, Coaxtlahuacán, Cuajilotla, Coahuayutla, Aratichanguio y Churumuco, 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 742 mm y 27.2 °C respectivamente. En cuanto a la evaporación potencial media, su valor es de 2,246 mm anuales.

3.3 Hidrología superficial

El Acuífero Coahuayutla se ubica en la Región Hidrológica 18 "Balsas", Subregión Hidrológica Tepalcatepec, cuenca Río Balsas-Infiernillo, delimitada al norte por las cuencas de los ríos Tacámbaro y Tepalcatepec-Infiernillo, al este por las cuencas Río Balsas-Zirándaro y Río Ixtapa; al oeste por Río Nexpa y Otros.

Finalmente al sur tiene como límite al Océano Pacífico. Su extensión es de 7,547 km², y sus afluentes más importantes de esta son los ríos Fundición, Guadalupe, Santa Rita, Guayameo y Las Pilas. Dentro del área se localiza la presa Adolfo López Mateos mejor conocida como "Infiernillo". 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 Bajo 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.

En el área de la cuenca hidrológica Río Balsas-Infiernillo se localizan pequeñas subcuencas que forman el caudal de ríos y arroyos perenes e intermitentes. El patrón de la red de drenaje que se presenta es de tipo dendrítico y sus principales afluentes perennes son los Ríos Guayameo y Santa Rita; ambos tributarios del Río Balsas, que constituyen los límites norte y oeste del acuífero.

El Río Santa Rita (o Arroyo Grande) es el de mayor importancia y magnitud dentro del acuífero; se origina en el Puerto El Huizache con escurrimientos de la cordillera de la Sierra Madre del Sur, presenta al inicio sentido sur-este y posteriormente sur-oeste, en su trayectoria confluyen a él los caudales de los ríos intermitentes Los Esteros, Arroyo Chiquito, Corraleras, Mango Seco y Charipo; en su trayecto pasa por las localidades La Pedregosa, La Lomita, Santa Rita, Arroyo Grande, La Tijera, Catarina y Olivares.

El Río Aratichanguio es una corriente muy pequeña que confluye directamente al Río Balsas por su margen izquierda, se origina a una altitud de 600 m.s.n.m. y su trayectoria es en general hacia el norte, con un recorrido de sólo 10 km. Pasa por la ranchería de Aratichanguio, localidad en la que se encontraba la estación hidrométrica del mismo nombre.

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.

Se identifican dos geoformas principales: la que integra la zona serrana conformada por rocas ígneas y metamórficas que presentan un relieve abrupto y sumamente accidentado, con presencia de drenaje dendrítico y los pequeños valles intermontanos que se encuentran dispersos en la superficie del acuífero.

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, de 1,000 a 2,500 msnm. 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.

Lomeríos. Representan la zona de transición entre las sierras 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 1,000 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, 1983) (figura 2).

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 Zihuatanejo, que presenta una cubierta sedimentaria y volcánica generada durante el Cenozoico.

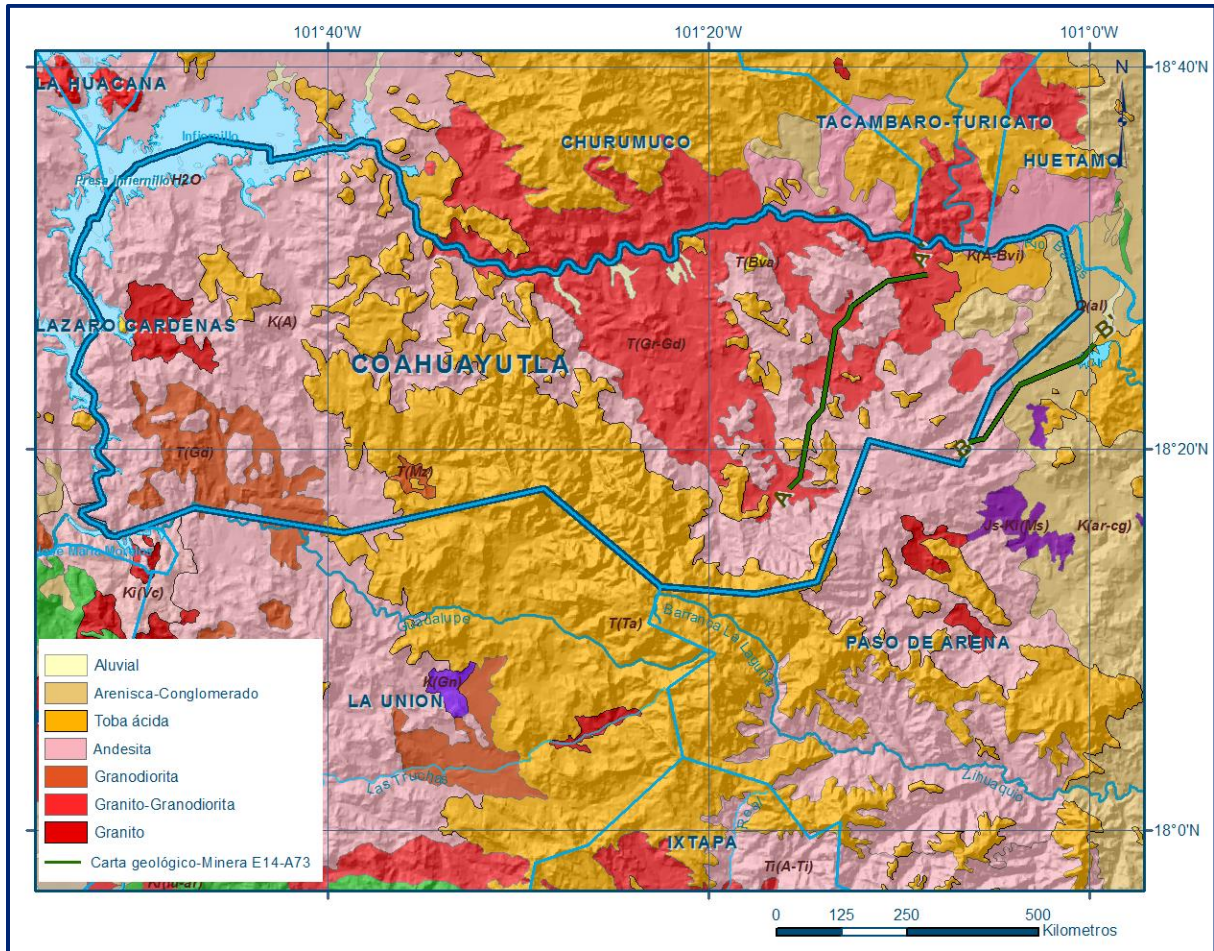


Figura 2. Geología general del acuífero

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).

El Terreno Guerrero está subdividido en cinco subterrenos o unidades menores que en su conjunto cubren la mitad occidental del Estado de Guerrero. Estas unidades son los Subterrenos Teloloapan, Arcelia; Huetamo, Papanoa y Zihuatanejo.

El Subterreno Zihuatanejo aflora desde Colima hasta Zihuatanejo y está compuesto por dos conjuntos litológicos. El inferior incluye rocas metamórficas, volcánicas, ultrabásicas y turbidíticas de edades inciertas, con estilo y grado de deformación variable.

El conjunto superior se encuentra conformado por una secuencia de andesitas, riolitas e Ignimbritas, interestratificadas con calizas y capas rojas del Albiano-Cenomaniano. Las lavas son de origen calcoalcalino y denotan una influencia cortical (Vidal-Serratos, 1991).

La deformación que afectó este subterreno produjo pliegues amplios de estilo laramídico que han sido afectados por fallas, por tratarse de una zona activa, altamente sísmica, de tipo convergente.

En su extremo septentrional está en contacto por falla con el Subterreno Huetamo, al sureste el contacto con el Subterreno Papanoa es poco claro. Numerosos batolitos cortan la secuencia y sus límites y contacto con el Terreno Xolapa quedan enmascarados por dichos intrusivos (Campa et al., 1981). El vulcanismo basáltico de Arcelia, de naturaleza toleítica y las rocas ultrabásicas asociadas, son testigos de una cuenca marginal que se abrió en el Albiano-Cenomaniano. El cierre de esta cuenca tuvo lugar en el Cretácico Tardío.

4.1 Estratigrafía

El registro estratigráfico de la región comprende del Jurásico al Reciente y está conformado por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias.

El Terreno Zihuatanejo ocupa la parte más occidental del Terreno Guerrero, su límite con el terreno Arcelia está cubierto por rocas sedimentarias y volcánicas continentales del Cenozoico. Centeno-García et al. (2008) agrupan las rocas cretácicas del Subterreno Zihuatanejo en dos sucesiones vulcanosedimentarias distintas: la sucesión de Huetamo, al este, y la sucesión de Zihuatanejo-Colima, al oeste. Estos autores aclaran que definir una columna estratigráfica única para cada región es difícil, debido a los cambios abruptos en la estratigrafía dentro de la misma región, los cuales, en algunos casos, pueden ser explicados mediante cambios laterales de facies. En la región del Terreno Zihuatanejo aflora:

- Un basamento metamórfico poli deformado pre-cretácico (Complejo Las Ollas, Vidal-Serratos, 1991).
- Una sucesión vulcanosedimentaria, marina y continental, desarrollada entre el Cretácico y probablemente el Paleoceno y/o Eoceno Temprano, que sobreyace en contacto estratigráfico discordante a las rocas metamórficas.

JURÁSICO

Rocas Metamórficas

Complejo Las Ollas

De acuerdo con Talavera-Mendoza et al. (2007), se incluyen dentro del Complejo Las Ollas las rocas cartografiadas previamente por Vidal-Serratos (1986 y 1991a) como formaciones Camalotito y Lagunillas, Complejo Las Ollas y Litodema Papanoa.

Es posible reconocer en estas rocas una evolución estructural común, caracterizada por un evento de deformación anterior a la deposición de la sobreyacente sucesión no metamórfica del Cretácico-Eoceno Temprano.

Dicho complejo aflora entre los poblados Lagunillas y Zihuatanejo, y en la porción suroriental, entre Petatlán y El Camalotito. Está compuesto por un apilamiento de napas tectónicas con distintos grados metamórficos, formadas por turbiditas y metaturbiditas siliciclásticas, que alojan bloques exóticos de dimensiones de metros a kilómetros.

Con base en el grado metamórfico, se diferencian dos unidades tectónicas principales: la Unidad Lagunillas, que aflora más ampliamente en el área de estudio y se caracteriza por un incremento progresivo del grado metamórfico bajo en facies esquistos verde desde la cima, en tanto que en la base no se observan evidencias de metamorfismo, y la Unidad Arroyo Seco-Las Ollas-Camalotito, que aflora paralelamente a la costa actual en los alrededores de los poblados homónimos, y se caracteriza por un grado metamórfico en facies de anfibolita.

El contacto entre las dos unidades no se ha observado en campo.

Unidad Lagunillas

Esta unidad aflora a lo largo de una faja NW-SE adyacente a la costa. Está compuesta por una sucesión turbidítica, formada por arenisca, conglomerado, lutita y limolita, que pasan gradualmente hacia la base a esquistos actinolítico y filita, indicando un progresivo incremento del grado metamórfico.

Escasos bloques de cuarcita y plagiogranito se encuentran envueltos en la sucesión turbidítica. Las areniscas se encuentran interestratificadas con las lutitas y las limolitas en estratos de 2 a 30 cm de espesor. Son de grano medio a grueso, bien clasificadas, con clastos subangulosos a bien redondeados.

Composicionalmente son litarenitas ricas en cuarzo y arenitas cuarcíticas. Las areniscas presentan el desarrollo de una foliación incipiente a la escala de centímetros, definida por la orientación preferencial de los clastos de muscovita. Estructuras sedimentarias como la laminación cruzada y gradación normal se observan comúnmente en toda la sucesión.

Los esquistos actinolíticos afloran principalmente en los alrededores del contacto con la unidad Arroyo Seco-Las Ollas-Camalotito. Se caracterizan por un bandeamiento verde-blanco, desde la escala de milímetros a metros, que define la esquistosidad principal de las rocas.

Presentan una foliación pervasiva, definida por la orientación preferencial de porfiroblastos de actinolita y porfiroclastos de cuarzo. Las filitas son de color gris y pardo, y están compuestas esencialmente por mica clara y escaso cuarzo.

Presentan una foliación pervasiva a la escala microscópica, que enmascara las estructuras sedimentarias originales. Uno de los rasgos más característicos de esta unidad es la presencia de numerosos diques de arena verticales y subverticales, de hasta 4 m de ancho, que cortan la superficie de estratificación y la foliación principal de las rocas. Las cuarcitas son de grano medio a fino, y se componen exclusivamente de cristales de cuarzo y escasa muscovita.

Los plagiogranitos presentan textura holocristalina, fanerítica de grano medio a fino, y se componen por plagioclasa, óxidos y cuarzo, sin presentar evidencias de deformación y metamorfismo.

Unidad Arroyo Seco-Las Ollas-Camalotito

Esta unidad está constituida por una alternancia de filita, cuarcita, cuarzoesquistos anfibolítico y metatoba, en las cuales se encuentran envueltos la mayoría de los bloques exóticos de este complejo. Las filitas son de color negro y se componen principalmente por mica clara y menor abundancia de cuarzo. Las cuarcitas son de color blanco y crema y se encuentran en estratos de espesor variable entre 2 y 25 cm, en alternancia rítmica con las filitas. Son de grano fino a medio, y se componen esencialmente por cuarzo y escasas cantidades de plagioclasa y mica clara.

Presentan una foliación incipiente en escala de centímetros y se encuentran frecuentemente boudinadas en la matriz filítica, incluye también esquistos anfibolíticos de grano medio a fino que se componen principalmente por una alternancia de niveles nematoblásticos de hornblenda verde, titanita, óxidos y niveles granoblásticos cuarzo-feldespáticos. En los alrededores de El Camalotito, se observaron diques-estrato metadioríticos emplazados en los esquistos anfibolíticos. Los diques presentan una textura dolerítica de grano fino a medio y se componen esencialmente por plagioclasa, con crecimientos de actinolita-biotita y óxidos.

Las metatobas afloran principalmente en los alrededores del poblado de El Camalotito. Son de color blanco y verdoso y están constituidas casi exclusivamente por ceniza volcánica, con escasos cristales de cuarzo, feldespato y hornblenda. Presentan una foliación penetrativa que enmascara completamente las estructuras primarias. Numerosos bloques exóticos, de dimensiones desde metros a kilómetros, se encuentran envueltos en la sucesión metaturbidítica de esta unidad. En orden de abundancia, se han observado bloques de metagabro anfibolítico, anfibolita, plagiogranito, serpentinita y metalava.

CRETÁCICO

Las rocas del Cretácico afloran principalmente en la porción noroccidental de la región, donde se encuentra ampliamente expuesta la parte alta de la sucesión, y en los alrededores de Zihuatanejo, donde es posible observar las unidades estratigráficas inferiores. Las rocas de esta sucesión fueron agrupadas originalmente por Vidal-Serratos (1986 y 1991a), en una única formación, nombrada Formación Zihuatanejo, compuesta por los miembros Posquelite, Ixtapa y La Unión. Sin embargo, las rocas de esta sucesión se formaron en ambientes deposicionales diferentes y presentan edades distintas.

Por lo tanto, se prefiere subdividir la sucesión cretácica en unidades estratigráficas de rango formacional manteniendo, hasta donde sea posible, los nombres de los miembros introducidos anteriormente en la literatura. Con base en la observación de los contactos y relaciones estratigráficas, se distinguen cinco unidades estratigráficas informales, que se describen a continuación desde la base hasta la cima de la sucesión.

Formación Posquelite

Aflora limitadamente en la región central, en los alrededores del poblado homónimo, aproximadamente 5 km al norte de Zihuatanejo. Está compuesta por una alternancia de conglomerado polimíctico y arenisca.

Las areniscas son principalmente masivas, y se presentan en estratos de dimensión de 20 a 50 cm, de grano fino a medio, y varían de moderadamente a mal clasificadas. Varían de grauvacas arcósicas a arcosas ricas en cuarzo.

Los clastos son principalmente subangulosos, que en orden de abundancia son cuarzo, plagioclasa y mica blanca. En algunos casos se observa cristalización estática y recristalización pervasiva del cuarzo, que documentan un evento metamórfico de contacto, probablemente relacionado con el emplazamiento de los batolitos cenozoicos.

Los conglomerados se presentan en estratos variables de 20 cm a 1.5 m de espesor, masivos, matriz-soportados y mal clasificados; sus clastos varían de angulosos a subredondeados constituidos por fragmentos de granito, cuarzo-esquistos, gneis y cuarcita.

La base de esta formación no aflora en el área de estudio, sólo es posible estimar un espesor mínimo de 70 m para esta sucesión.

Formación Playa Hermosa

Aflora principalmente a lo largo de la costa, entre Zihuatanejo y Troncones, sus mejores afloramientos se localizan a lo largo de la carretera Zihuatanejo-Playa Hermosa. Está constituida por una alternancia de arenisca, lutita, limolita y en menor proporción conglomerado. Las areniscas son de grano fino a grueso, moderadamente a mal clasificadas, con clastos principalmente subangulosos, en una matriz microcristalina compuesta esencialmente por cuarzo y óxidos.

Composicionalmente varían de arcosas a grauvacas arcósicas, con menor abundancia de litarenitas en la parte superior de la sucesión. Los clastos líticos son representados por fragmentos de andesita porfírica, toba y caliza en proximidad del contacto con la sobreyacente Formación Ixtapa. Los conglomerados están soportados por una matriz y mal clasificados, conformados por fragmentos de andesita, toba e intraclastos, en una matriz compuesta por cuarzo y óxidos.

Las rocas de la Formación Playa Hermosa se encuentran intensamente afectadas por un evento metamórfico de contacto.

Cubre de manera concordante las rocas de la Formación Posquelite en la proximidad del poblado homónimo, mientras que sobreyace directamente a la sucesión metamórfica del Complejo Las Ollas en el resto del área.

Su espesor varía lateralmente de manera considerable, desde 0-20 m en la región comprendida entre los poblados La Salitrea y Troncones hasta aproximadamente 1,000 m en los alrededores de Ixtapa.

Formación Ixtapa

Aflora ampliamente en la porción noroccidental del área y en los alrededores de Zihuatanejo. Está constituida por caliza, desde masiva a estratificada, interestratificada con lutita, limolita calcárea y autobrecha. Contiene abundante fauna fósil representada por gasterópodos, rudistas, equinoides y corales, con escasos derrames de lava intercalados con las rocas calcáreas.

Las exposiciones mejores de estas lavas se encuentran en la carretera principal Zihuatanejo-Lázaro Cárdenas, a la altura del entronque para Ixtapa. Las lavas muestran evidencia de una deformación intensa, que determina el desarrollo de un clivaje. Sobreyace en contacto estratigráfico concordante a las rocas de la Formación Playa Hermosa.

Las mejores exposiciones del contacto se encuentran en la salida oeste de Zihuatanejo y a lo largo de la carretera hacia Playa Hermosa. Su espesor varía lateralmente desde 400 a 600 m.

Formación Zihuatanejo

Aflora de manera aislada en el área, entre la bahía de Zihuatanejo y el poblado El Calabacalito. Las rocas habían sido agrupadas previamente, por Vidal-Serratos (1986 y 1991a), con la sucesión de arenisca, lutita y conglomerado que afloran debajo de la Formación Ixtapa, incluidas aquí en la Formación Playa Hermosa. El contacto entre la Formación Zihuatanejo y las calizas no pudo observarse en campo, ya que se encuentra siempre cubierto por la vegetación.

Sin embargo, a lo largo de la bahía de Zihuatanejo, las rocas de la formación homónima afloran al este de la Formación Ixtapa, y la estratificación en esta región presenta una inclinación constante hacia el ESE, lo que hace suponer que las rocas de la Formación Zihuatanejo sobreyacen a las calizas del Albiano de la Formación Ixtapa.

Esta relación estratigráfica está confirmada también por las edades U-Pb de 82 Ma reportadas por Talavera-Mendoza et al. (2007), para algunos zircones detríticos procedentes de una arenisca de la Formación Zihuatanejo.

La base de esta formación consta de una sucesión de ~70 m, conformada por una alternancia de arenisca calcárea de grano medio a fino y marga, en estratos de espesor variable de 4 a 45 cm.

La secuencia cambia transicionalmente hacia la cima a depósitos turbidíticos, representados por arenisca, lutita y conglomerado vulcanoclástico de color gris a verdoso, intercalados algunos derrames de lavas y tobas. Su espesor mínimo es de 700 m; sin embargo, es muy posible que sea mayor ya que no aflora el contacto superior.

Formación La Unión

Aflora ampliamente en la porción noroccidental de la región de Zihuatanejo, entre los poblados de La Unión y Feliciano, y en la parte central, entre La Salitrera y Pantla. Vidal- Serratos (1986) y Centeno-García et al. (2003) habían previamente reportado que las rocas cartografiadas como Formación La Unión se encuentran interestratificadas con las calizas de la Formación Ixtapa. Sin embargo, las calizas de la Formación Ixtapa siempre se encuentran cubiertas por las rocas de la Formación La Unión, la que, por lo tanto, se considera una unidad estratigráfica distinta, desarrollada posteriormente a la finalización de la sedimentación calcárea.

El contacto estratigráfico original entre las formaciones Ixtapa y La Unión no pudo observarse en el área, ya que se encuentra cubierto por la vegetación o afectado por fallas laterales.

La base de la Formación La Unión está compuesta por un conglomerado clasto-soportado, de 1 a 12 m de espesor, con clastos de caliza y menor abundancia de arenisca, lutita y fragmentos volcánicos (principalmente andesíticos), litológicamente comparables con las rocas de las formaciones subyacentes.

Hacia la cima el conglomerado calcáreo cambia transicionalmente a una sucesión constituida por conglomerado vulcanoclástico, arenisca, lutita y limolita de color rojizo. Es común en toda la sucesión gradación normal, estratificación cruzada y rellenos de canal.

Las rocas se encuentran intrusionadas por batolitos cenozoicos, que producen el desarrollo de una aureola metamórfica de contacto en las rocas encajonantes.

Es posible estimar un espesor mínimo de 2,200 m; sin embargo, considerando que los batolitos que la cortan se encuentran actualmente aflorando, es posible considerar la remoción por erosión de grandes volúmenes de estas rocas.

Formación El Cirián

Se introduce de manera informal el nombre de Formación El Cirián (Martini Michelangelo, 2003), para designar una sucesión de arenisca, brecha y conglomerado vulcanoclásticos de color gris a rojizo anteriormente no cartografiada.

Aflora de manera aislada en los alrededores del poblado homónimo, donde yace horizontalmente en discordancia sobre las rocas de la Formación La Unión. Las areniscas presentan estratificación gruesa y masiva, de grano medio a grueso, de clasificación granulométrica moderada. Composicionalmente varían desde arenitas arcósicas a litarenitas.

Los clastos están constituidos principalmente por monocristales de plagioclasa, cuarzo y fragmentos líticos volcánicos de composición andesítica y en menor proporción fragmentos lutita.

Los conglomerados presentan estratificación gruesa y masiva, mal clasificados, tanto matriz como clasto-soportados, compuestos por clastos volcánicos porfiríticos de composición andesítica, dacítica, fragmentos de toba, y, en menor proporción, clastos de lutita y arenisca, en una matriz compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasa y óxidos.

Las brechas presentan estratificación gruesa y masiva, mal clasificadas, matriz-soportadas, compuestas por clastos angulosos a subangulosos, de tamaño variable desde 0.7 a 16 cm, representados por fragmentos de arenisca, lutita y de roca volcánica de composición andesítica.

La secuencia de la formación está cortada por un batolito eocénico (Batolito Colmeneros), que ocasionó una aureola metamórfica de contacto en las rocas encajonantes.

El metamorfismo produjo la formación de cuarcitas de grano fino a grueso, caracterizadas por la recristalización. Considerando que las rocas de esta formación presentan estratificación horizontal, se ha calculado un espesor mínimo de 220 m con base en la elevación topográfica máxima y mínima a las que se encuentran aflorando.

Cenozoico (Neógeno)

Rocas ígneas del Eoceno de la región comprendida entre Huetamo y Zihuatanejo. Las sucesiones de Huetamo y Zihuatanejo anteriormente descritas se encuentran cortadas por numerosos cuerpos intrusivos y cubiertas en discordancia angular por una sucesión volcánica de ~2,500 m de espesor, que impide conocer la relación lateral entre los registros estratigráficos de estas dos regiones.

A continuación, se describen tanto las rocas intrusivas como las extrusivas terciarias de esta región.

Rocas intrusivas

Afloran principalmente en la región noroccidental del área de Huetamo, donde se encuentran expuestos los dos grandes batolitos San Jerónimo-Guayameo y Montecillos, y a lo largo de toda la región costera, entre Agua Zarca y Papanaoa, donde de NW a SE se reconocen los batolitos Agua Zarca, Colmeneros, Vallecitos de Zaragoza-Zihuatanejo y Petatlán. Las rocas intrusivas de esta región muestran texturas y composiciones variables.

El batolito San Jerónimo-Guayameo aflora en la porción noroccidental de la región de Huetamo, entre los poblados homónimos, donde se encuentra cortando la sucesión de la Formación Capeo.

Las rocas de este batolito presentan una textura holocristalina, fanerítica, equigranular, de grano medio a fino. Composicionalmente está formado por granodiorita y menor cantidad de granito. Frecuentemente se observa la presencia de enclaves máficos de grano fino, conformados por hornblenda, clinopiroxeno y plagioclasa.

El batolito Montecillos aflora en la zona centro-septentrional de la región de Huetamo, en los alrededores del poblado homónimo, donde se encuentra cortando la sucesión de la Formación Capeo. Presentan textura holocristalina, fanerítica, equigranular, de grano grueso a fino y está formado por granodiorita y monzogranito.

El batolito Agua Zarca aflora al noroeste de la región de Zihuatanejo, en los alrededores del poblado homónimo, donde se encuentra cortando las calizas de la Formación Ixtapa y la Formación La Unión. Presentan textura holocristalina, fanerítica, equigranular y se compone principalmente por granitos, y en menor proporción granodioritas. El batolito Colmeneros aflora en la región nororiental de Zihuatanejo, al norte del poblado homónimo, donde se encuentra cortando las formaciones La Unión y El Cirián. Presenta textura holocristalina, fanerítica, equigranular de grano medio a fino y muestra una composición dominante granodiorítica con menor cantidad de granito.

El batolito Vallecitos de Zaragoza-Zihuatanejo aflora en la porción central de la región de Zihuatanejo, entre los poblados homónimos, donde se encuentra cortando indistintamente todas las formaciones de la sucesión mesozoica de Zihuatanejo anteriormente descritas.

Presenta variaciones texturales y composicionales significantes. Las rocas de este batolito muestran una textura holocristalina, fanerítica, equigranular a disequigranular y una composición variable desde diorítica a granítica.

El batolito Petatlán aflora en la parte suroriental de la región de Zihuatanejo, al este del poblado homónimo, donde se encuentra cortando la sucesión metamórfica del Complejo Las Ollas. Está compuesto por rocas holocristalinas, faneríticas, equigranulares de grano medio a fino, de composición granodiorítica a diorítica.

Rocas volcánicas

Las rocas volcánicas del Eoceno afloran principalmente en toda la región meridional del área de Huetamo, mientras que en la región de Zihuatanejo se encuentran bordeando los batolitos Colmeneros, Vallecitos de Zaragoza-Zihuatanejo y Petatlán. Forman una potente sucesión, representada en la parte inferior de ~1,500 m de derrames de lava y brechas autoclásticas, y en la parte superior constituida por ~700 m de ignimbritas.

Aproximadamente 300 m de arenisca y conglomerado vulcanoclásticos continentales se encuentran intercalados entre las lavas y las ignimbritas, marcando un periodo de erosión importante entre los dos pulsos magmáticos que las originaron. Las lavas muestran composiciones variables desde basáltica a riolítica, con mayor predominancia de composición andesítica.

Los productos más diferenciados afloran de manera aislada, formando estructuras dómicas de composición dacítica a riolítica, con textura porfirítica, desde holocristalina a hipocristalina. Las rocas piroclásticas afloran casi exclusivamente en la parte suroeste del área de Huetamo, entre los poblados de Guayameo, Las Pilas y el puente El Aguacate, donde cubren indistintamente las lavas eocénicas anteriormente descritas, el batolito de San Jerónimo-Guayameo, y las formaciones Capeo, Comburindio y Río Placeres.

Están compuestas por una matriz de ceniza volcánica de color rosa y gris, con fragmentos de pómez, rocas volcánicas porfíricas de composición andesítica a dacítica, y, en menor proporción, fragmentos de rocas intrusivas.

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 Coahuayutla, Álvarez, Guayameo y San Jerónimo, así como en las riberas del Río Balsas.

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 superpone 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).

Las estructuras que se observan en las rocas de la región se originaron a partir de un régimen compresivo asociado con la margen pacífica, que dentro de sus principales efectos ocasionó la deformación dúctil de la carpeta sedimentaria del Terreno Mixteco, así como la aloctonía y yuxtaposición de una carpeta de materiales vulcanosedimentarios depositados en los subterrenos Huetamo-Arcelia y Teloloapan (Terreno Guerrero).

Martini Michelangelo (2003), con base en su trabajo de campo reconoce una tectónica polifásica en la región del Terreno Zihuatanejo, definida por lo menos por cinco eventos de deformación, que se presentan a continuación desde el más antiguo al más reciente.

Las estructuras relacionadas con la primera fase de deformación han sido observadas exclusivamente en las rocas del Complejo Las Ollas, está representada por el desarrollo de numerosos pliegues y cabalgaduras, que provocan la estructuración de las rocas de este complejo en una pila de napas tectónicas imbricadas, y producen la configuración bloque en matriz. Los pliegues son isoclinales recostados y muestran una vergencia constante hacia el SW. Se caracterizan por planos axiales de bajo ángulo (desde 0° a 21° de inclinación) y ejes horizontales, con una dirección dominante NW-SE.

Un segundo evento de acortamiento determina la formación de numerosos pliegues cilíndricos, desde la escala milimétrica a kilométrica, que deforman tanto la foliación anteriormente desarrollada en las rocas del Complejo Las Ollas, como las superficies de estratificación de la sucesión comprendida entre la Formación Posquelite y la Formación La Unión. Los pliegues son principalmente simétricos con planos axiales verticales y ejes horizontales, los cuales muestran una dirección dominante NW-SE.

La fase de transurrencia derecha produce los rasgos más peculiares del patrón estructural del área de Zihuatanejo, determinando la rotación en sentido horario de las estructuras pre-existentes y el fallamiento lateral derecho a lo largo de una dirección NW-SE, paralelo a la costa pacífica actual.

Desde Feliciano hasta Zihuatanejo, los ejes de los pliegues definen geometrías sigmoidales, como resultado de la rotación en sentido horario que han experimentado algunos sectores de estas estructuras. Numerosas fallas laterales, tanto izquierdas como derechas, han sido observadas en la región de Zihuatanejo que definen típicos patrones consistentes con una cizalla principal izquierda orientada paralelamente a la costa pacífica actual.

Entre los poblados La Unión y Las Ollas se reconoció un sistema principal a escala kilométrica, definido por numerosas fallas izquierdas además de escasas fallas laterales derechas. Cerca del poblado Las Ollas, las fallas izquierdas cortan las metaturbiditas milonitizadas anteriormente durante la fase de transurrencia derecha. Estas fallas se desarrollan a lo largo de los planos de la foliación milonítica pre-existentes, indicando la reactivación de este lineamiento bajo un régimen de deformación frágil.

Las fallas laterales izquierdas NW-SE, desarrolladas durante la fase de transurrencia muestran en algunos casos evidencias de una reactivación bajo un régimen transcurrente derecho, como sugiere la presencia de más que una generación de estrías a lo largo de los planos de falla, indicando sentidos de movimiento opuestos. Al norte de la región, en el límite con el estado de Michoacán, se determinó un dominio de deformación frágil, representado por el sistema de fallamiento normal, los de mayor longitud presentan una orientación NW 25-45° SE; paralelos a éstos se asocian otros de menor extensión, relacionados con la mineralización cuprífera de la región.

Existe otro sistema bien definido con orientación SW, sensiblemente perpendicular al primero, al cual desplaza. Entre las fallas principales se encuentra la falla normal Buena Vista, que presenta un rumbo N45°W e inclinación de 45° al NE, con una longitud de 28.5 km; sobre ella se encuentran las alteraciones hidrotermales Las Juntas y El Palmar; afecta al intrusivo y a las rocas volcánicas. Asociada a esta falla regional, a 4 km al noreste, se encuentra la falla Atijo, interpretada como falla lateral derecha, con rumbo N43°W y longitud de 2.5 km.

Las provincias morfotectónicas que configuran el sur de México son consecuencia de procesos, tanto convergentes como divergentes; al inicio relacionados con el origen de arcos de islas, que evolucionaron a partir del Jurásico Tardío; posteriormente con la interacción de dos placas tectónicas mayores, que han convergido simultáneamente desde el Cretácico Superior hasta el Cuaternario.

Dentro de un modelo de geosinclinal, el arco Zihuatanejo (Amengarícuaro), representa al eugeosinclinal, desarrollado en un ambiente de cuenca antes o durante la convergencia de la Placa Farallón con Norteamérica, durante el Jurásico Tardío-Cretácico; el análisis geoquímico de las andesitas muestra una firma isotópica de arco oceánico, lo cual corrobora la aplicación del modelo.

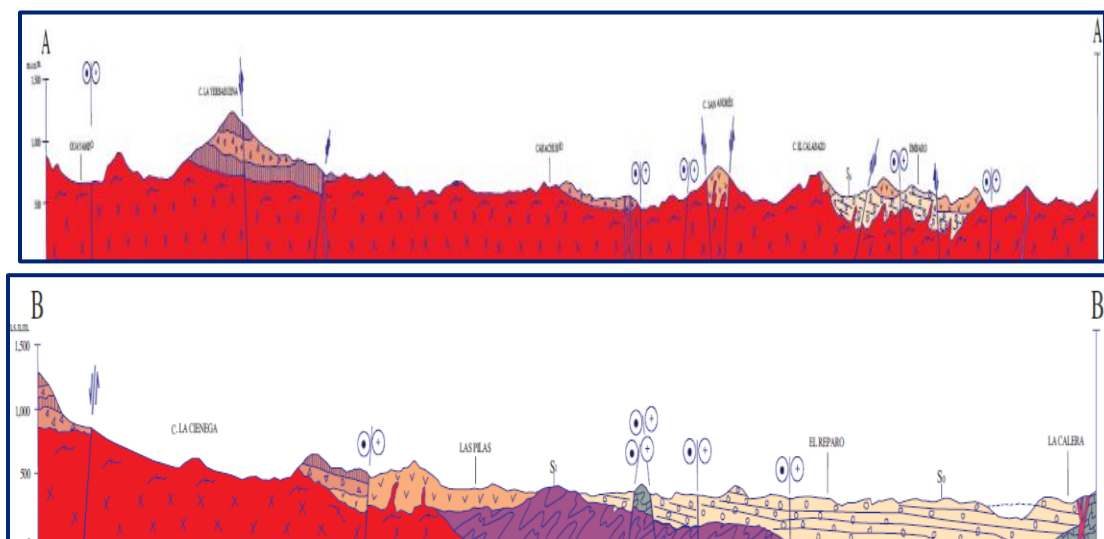
Durante el Cretácico Tardío y el Paleoceno, el arco magmático migraba hacia el continente, para acrecionar posiblemente al Complejo Arteaga, considerado como su basamento relativo; esta acreción originó deformación, tanto frágil como dúctil, en las rocas cretácicas. Las rocas volcánicas terciarias se podrían atribuir al fenómeno de evolución de arcos magmáticos continentales, relacionado con la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa Norteamericana, dando inicio al evento tectónico de deformación y convergencia hacia el noreste, conocido como Orogenia Laramide.

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 por 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-A73 "Guayameo". Esc.: 1:50,000 (SGM, 1996)

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 5 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 1.91×10^{-4} a 6.1×10^{-3} m²/s. De acuerdo con el espesor saturado, la conductividad hidráulica varía de 3.4×10^{-5} a 7.5×10^{-4} m/s (0.9 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 10 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: Ziritzicuaro, Aratichanguio, Hacienda Vieja, La Parota, Cupuan, Carachurio, Guayameo, San José, La Madera y Barrio Lozano.

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 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, de 1 a 6 m, se presentan en las zonas de balance Carachurio, Guayameo, Cupuan y San José, mientras que las zonas con mayor profundidad, de 10 a 16 m, se registran en la porción norte de la zona Barrio Lozano, sur de la zona Aratichanguio y norte de La Parota (figuras 4 a 7).

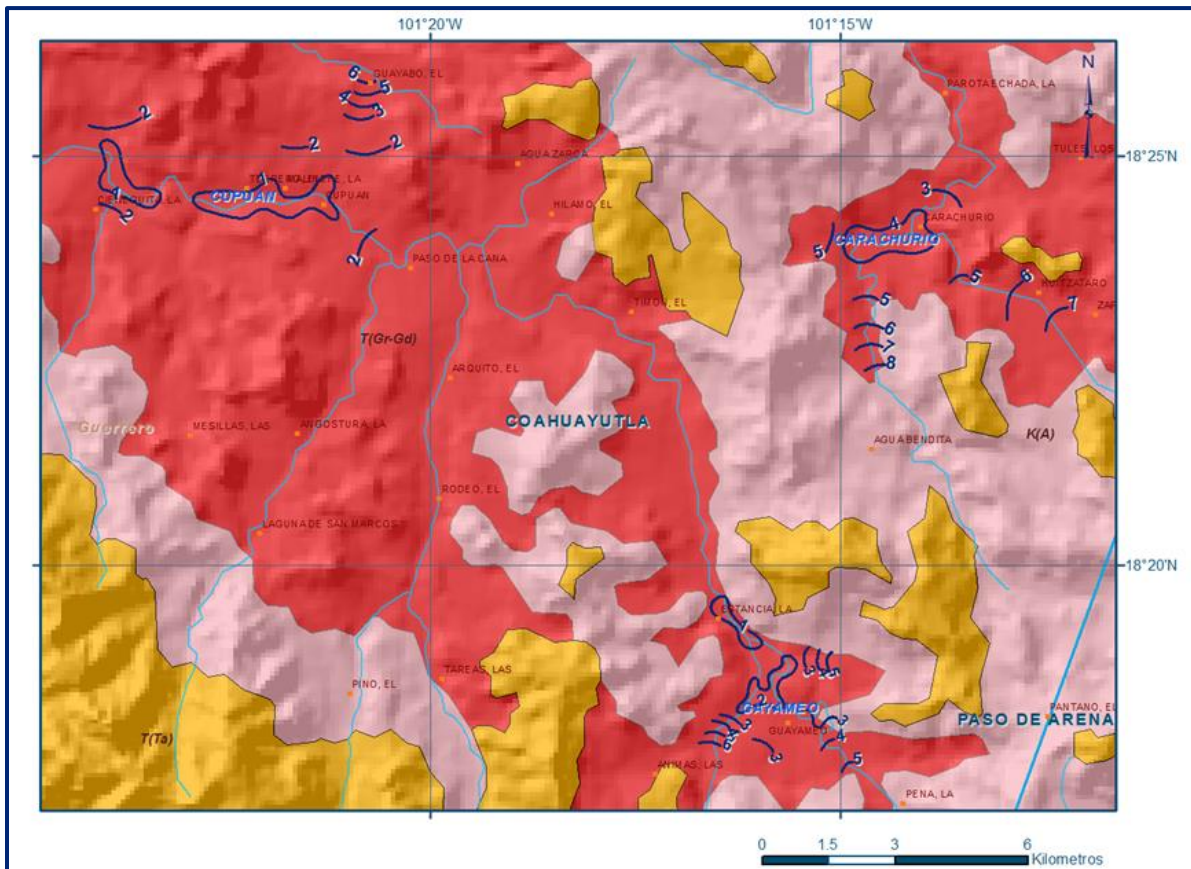


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zonas Carachurio, Cupuan y Guayameo

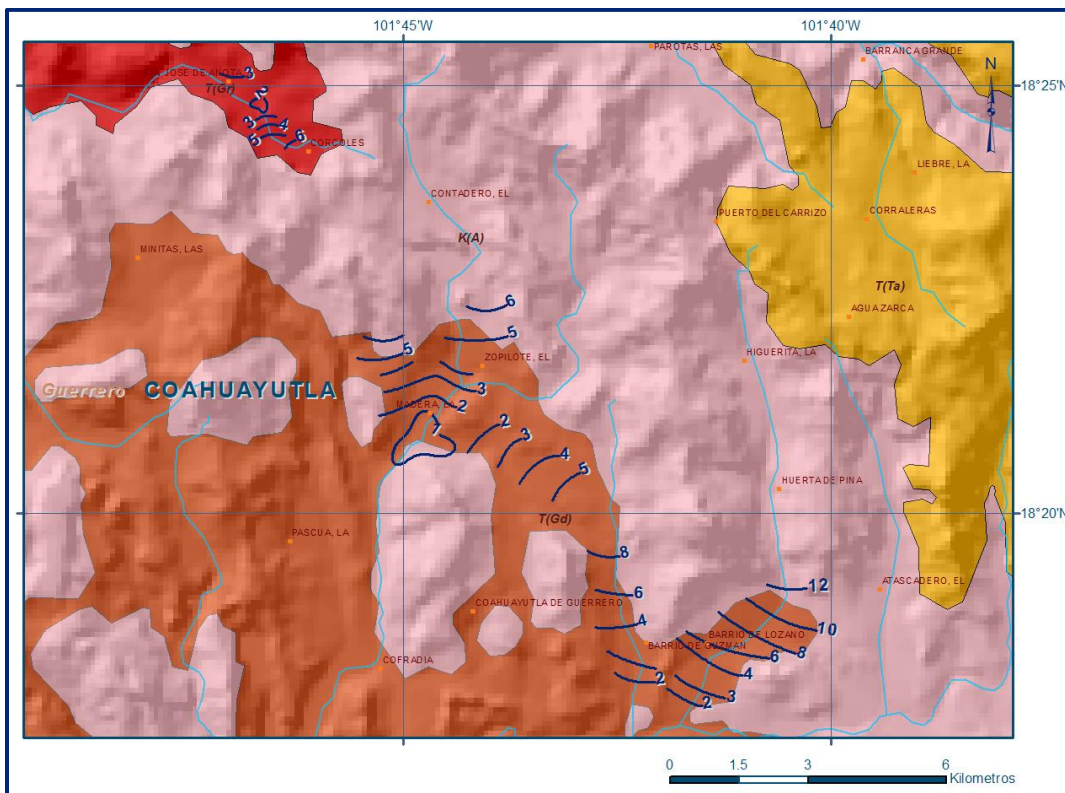


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zonas San José, Madera y Barrio Lozano

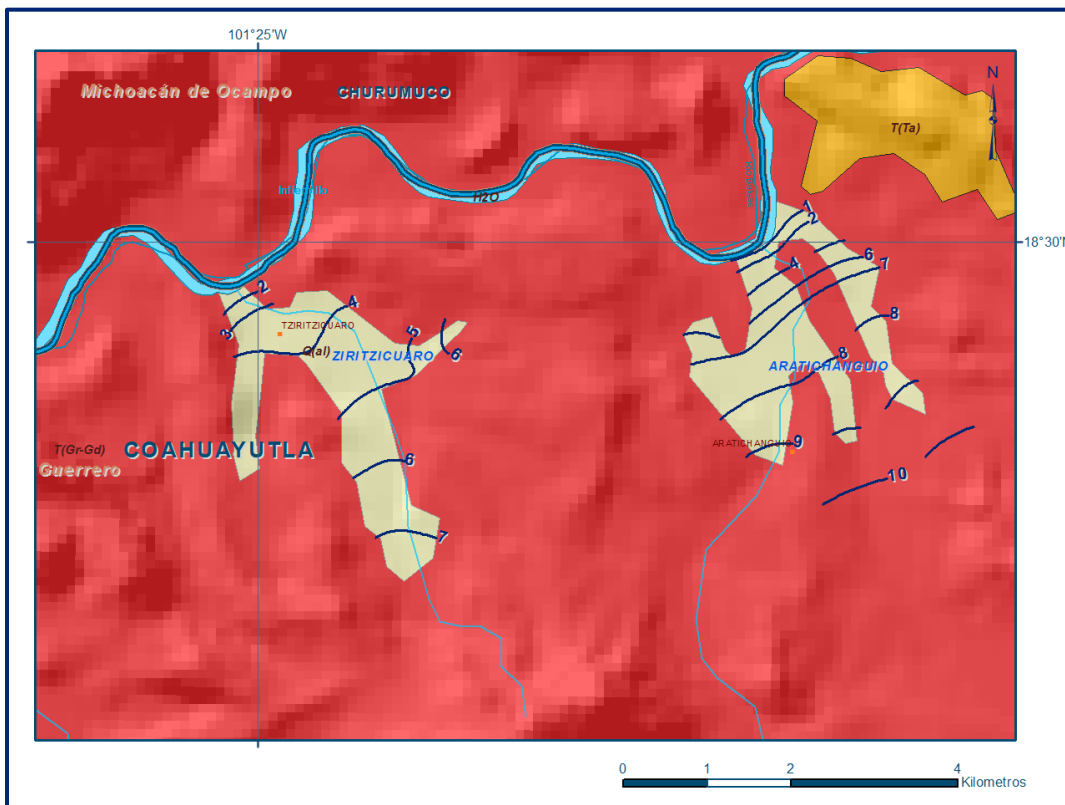


Figura 6. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zonas San José, Madera y Barrio Lozano

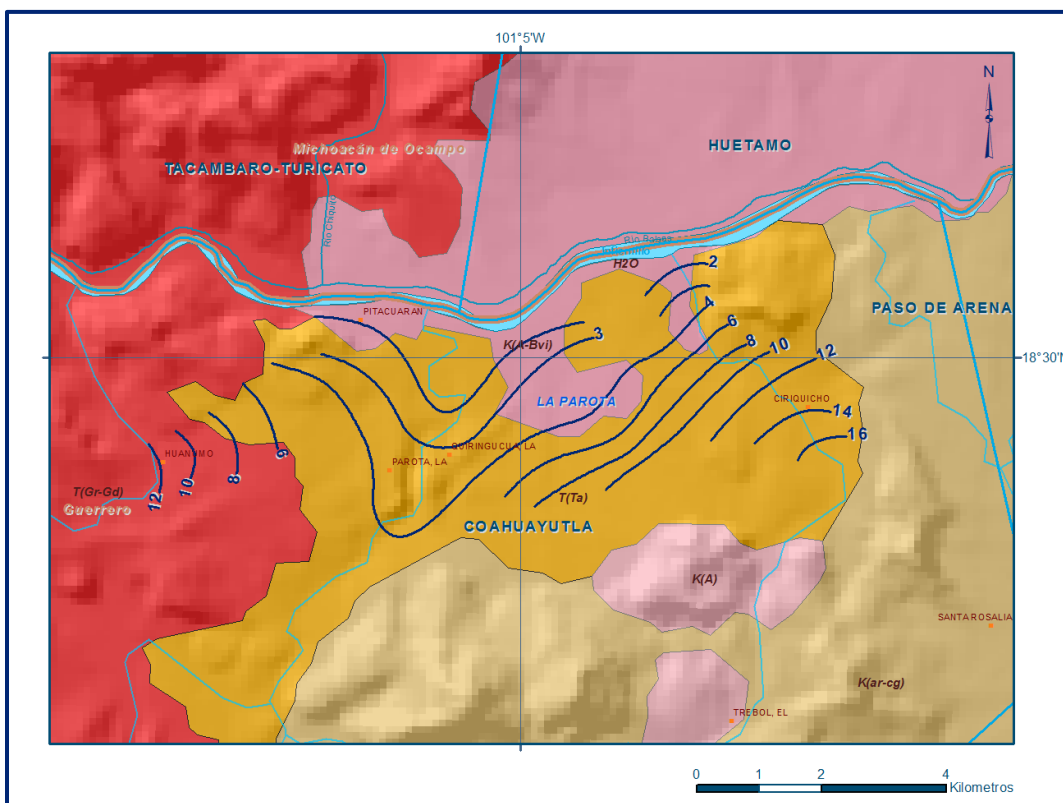


Figura 7. Profundidad al nivel estático en m (2013). Zona La Parota

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático en 2013, presenta valores que varían de 175 a 670 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: Ziritzicuaró, Aratichangio, Hacienda Vieja y La Parota.

En la zona de balance Carachurio la dirección preferencial del flujo subterráneo es también hacia el norte, en tanto que en las zonas Cupuan es este-oeste, en Barrio Lozano y Madera es en sentido noreste-suroeste, en Guayameo y San José es sureste a noroeste (figuras 8 a 11).

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.

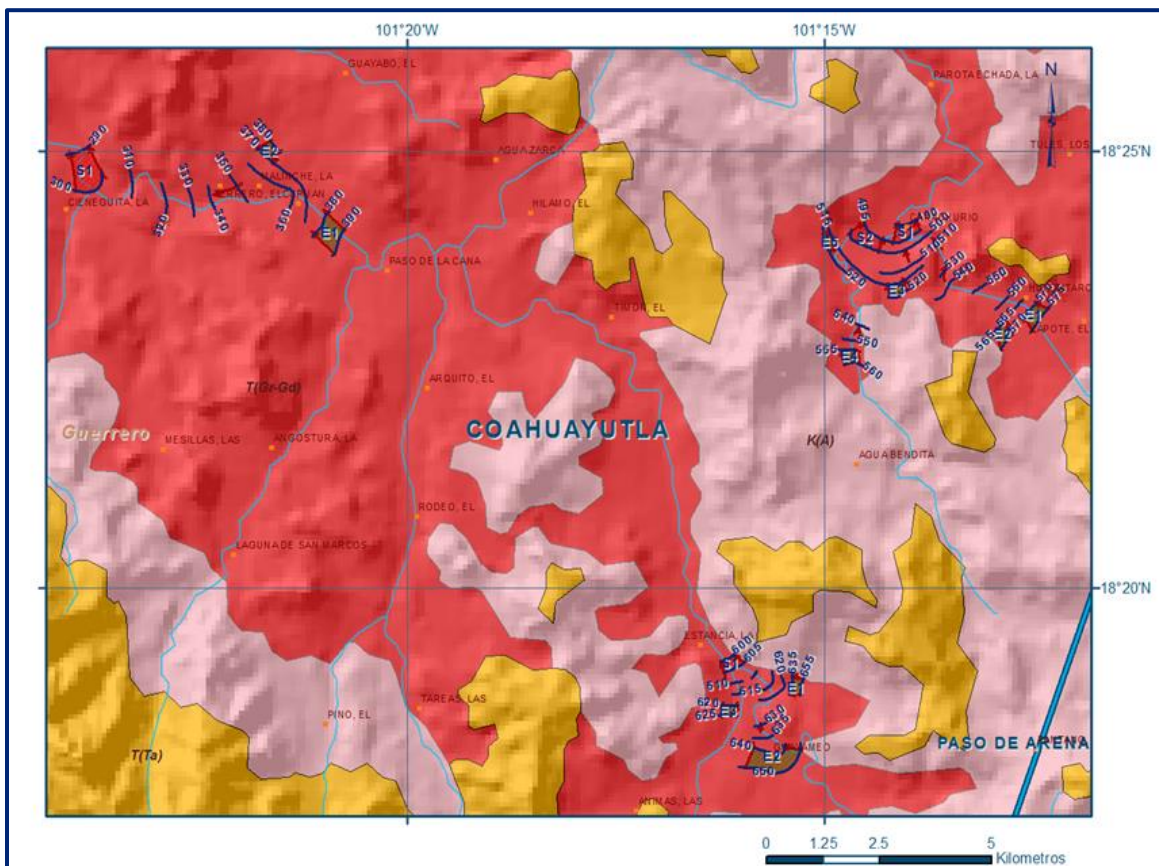


Figura 8. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zonas Carachurio, Cupuan y Guayameo

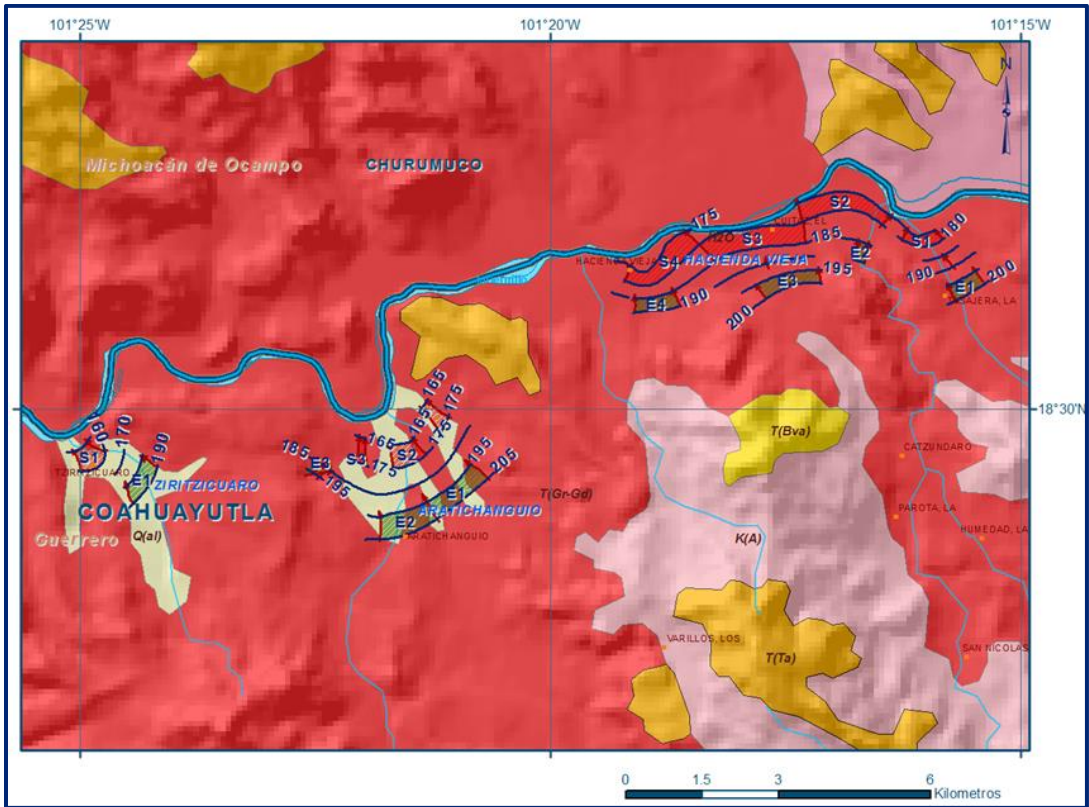


Figura 9. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Ziritzicuaro, Aratichanguío y Hacienda Vieja

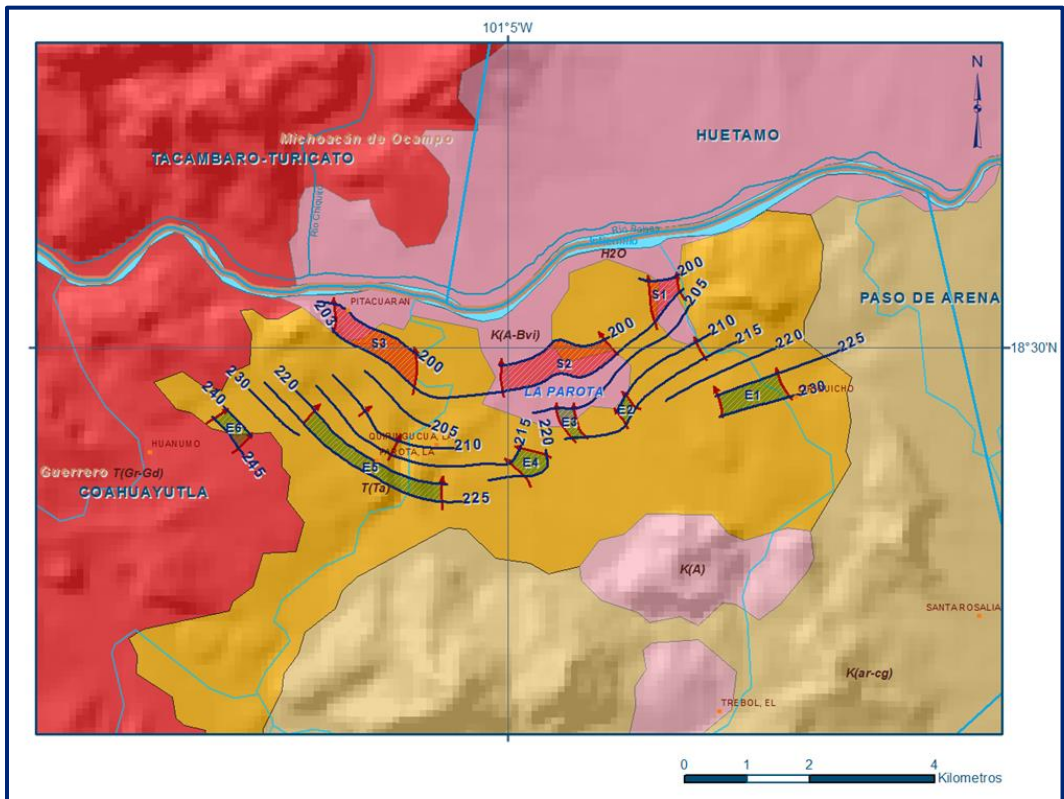


Figura 10. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zonas La Parota

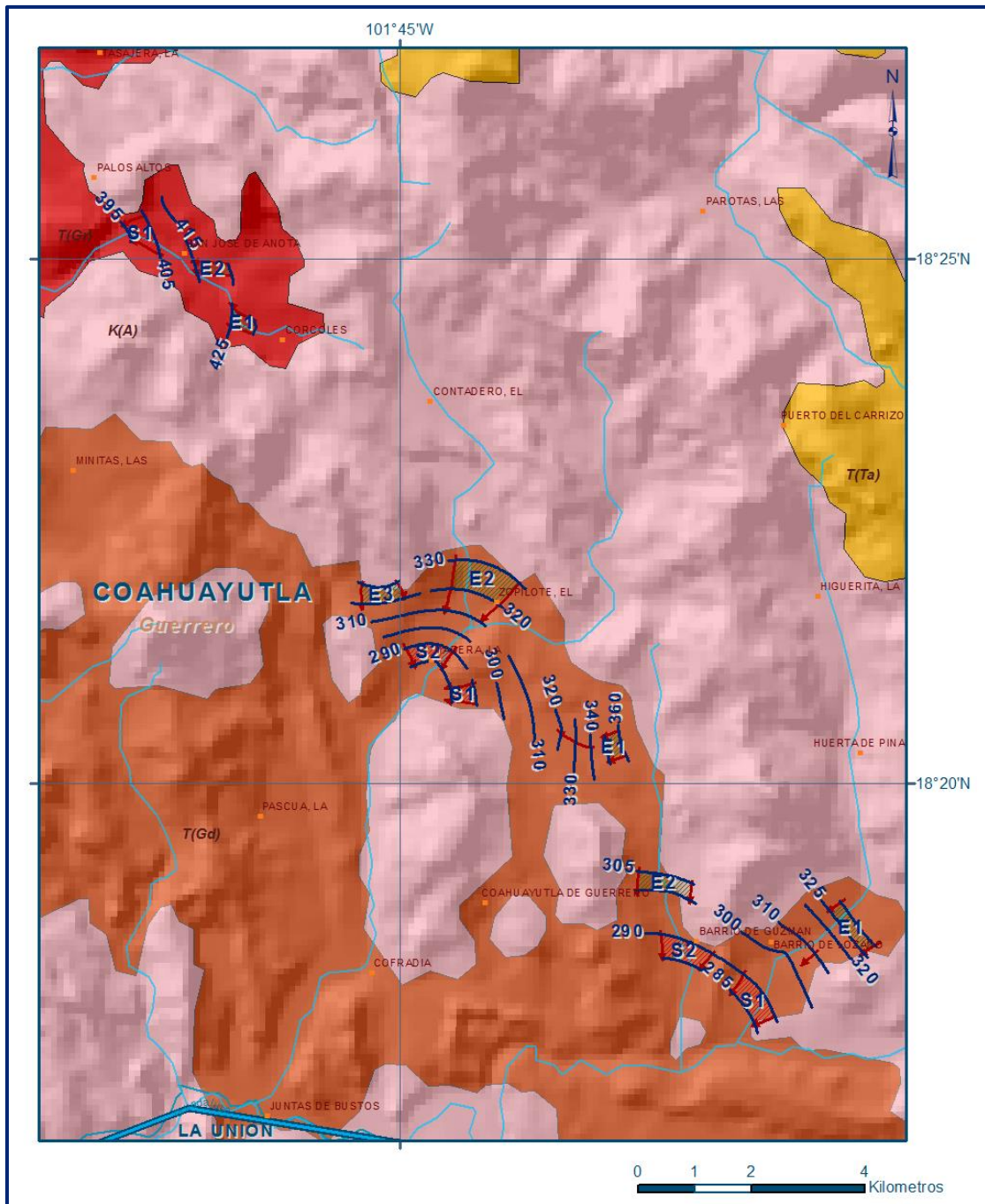


Figura 11. Elevación del nivel estático en msnm (2013). Zonas San José, Madera y Barrio Lozano

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.

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 270 a 1,245 mg/l. Sólo tres muestras presentan concentraciones de STD mayores a 1000 mg/l que establece la modificación a la NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. Las concentraciones de los iones principales y menores, así como las demás determinaciones, se encuentran dentro de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la norma mencionada, excepto una muestra que supera el LMP de sulfatos y tres el LMP de dureza total, que es de 400 y 500 mg/l, respectivamente.

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 oscilan de 540 a 2,491 mS/cm. La temperatura del agua varía de 28.4 a 31.4 °C y el pH de 7.4 a 8.4.

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 a alta (C2 y C3) y contenido bajo de sodio intercambiable (S1), lo que indica que es apropiada para riego en suelos permeables y con buen drenaje que requieren lavados frecuentes. De la representación de los resultados en los diferentes diagramas, se concluye que la familia de agua predominante es la bicarbonatada-cálcica, que representa agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que ha 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 76 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 31 son pozos, 42 norias y 3 manantiales; de ellos, 70 se consideran activos (27 pozos, 40 norias y 3 manantiales) y 6 inactivos (4 pozos y 4 norias). De las obras activas, 19 se destinan al uso público-urbano, 2 para uso agrícola y 49 para uso pecuario-doméstico. El volumen de extracción calculado es de 0.8 hm³ anuales, de los cuales 0.3 hm³ (37.5%) se utilizan para abastecimiento de agua potable a las poblaciones, 0.1 (12.5%) hm³ para uso agrícola y 0.4 hm³ (50.0%) para usos pecuario-doméstico.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRANEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el año 2013, en una superficie de 66.5 km² del acuífero, divididos en 10 áreas de balance, en las que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos.

Estas zonas son Ziritzicuaró con 2.3 km², Aratichanguio que tiene una superficie de 6.5 km², Hacienda Vieja con 10.1 km², La Parota con 17.5 km², Cupuan tiene un área de 5.7 km², Carachurio 5.0 km², Guayameo 3.3 km², San José 2.0 km², La Madera con 6.2 y finalmente la zona denominada Barrio Lozano con 7.9 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:

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

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:

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

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 (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 (R_i). Para este caso, debido a que el volumen de extracción es incipiente y no se utiliza agua superficial para riego agrícola, se considera que recarga inducida es nula.

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 las zonas de balance denominadas Ziritzicuaro, Aratichanguio, Hacienda Vieja y La Parota, en las que la ecuación de balance definida es:

$$D_{fb} = \pm \Delta V(S) + R_v + E_h - S_h - B - ETR \quad (1)$$

Para las otras 6 zonas de balance definidas, Cupuan, Carachurio, Guayameo, San José, La Madera y Barrio Lozano, que no tienen flujo base, la recarga vertical es la incógnita de la ecuación:

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

Donde:

- R_v** = Recarga vertical;
- E_h** = Recarga por flujo horizontal;
- B** = Bombeo;
- S_h** = Salidas por flujo horizontal;
- D_{fb}** = Descarga natural por flujo base;
- ETR** = Evapotranspiración real;
- $\Delta V(S)$** = Cambio de almacenamiento;

En las zonas de balance Ziritzicuaro, Aratichanguio, Hacienda Vieja y La Parota, tomando en cuenta los valores de precipitación de 701 mm, para la primera zona y 690 mm, para las otras tres, y áreas de 2.3, 6.5, 10.21 y 17.5 km², respectivamente, se obtiene un volumen de lluvia de 1.6, 4.4, 7.0 y 12.1 hm³ anuales, también respectivamente.

Al aplicar el coeficiente de infiltración obtenidos de 11.0 % para todas las zonas, el valor de la recarga vertical R_v es de 0.2, 0.5, 0.8 y 1.3 hm³ anuales, respectivamente, 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 11, 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 12.4 hm³ anuales.

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.

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 ZIRITZICUARO							
E1	765	355	10	0.02817	0.00014	0.0030	0.10
						SUBTOTAL	0.10
ZONA ARATICHANGIO							
E1	1180	395	10	0.02532	0.00032	0.0096	0.30
E2	1070	320	10	0.03125	0.00032	0.0107	0.34
E3	125	470	10	0.02128	0.00032	0.0009	0.03
						SUBTOTAL	0.67
ZONA HACIENDA VIEJA							
E1	615	315	5	0.01587	0.00025	0.0024	0.08
E2	195	370	5	0.01351	0.00025	0.0007	0.02
E3	1160	300	5	0.01667	0.00025	0.0048	0.15
E4	805	310	5	0.01613	0.00025	0.0032	0.10
						SUBTOTAL	0.35
ZONA LA PAROTA							
E1	1015	375	5	0.01333	0.00161	0.0218	0.69
E2	315	265	5	0.01887	0.00161	0.0096	0.30
E3	240	540	5	0.00926	0.00161	0.0036	0.11
E4	430	360	5	0.01389	0.00161	0.0096	0.30
E5	2410	275	5	0.01818	0.00161	0.0705	2.22
E6	575	265	5	0.01887	0.00161	0.0175	0.55
						SUBTOTAL	4.18
ZONA CUPUAN							
E1	545	530	10	0.01887	0.00110	0.0113	0.36
E2	380	295	10	0.03390	0.00110	0.0142	0.45
						SUBTOTAL	0.80
ZONA CARACHURIO							
E1	475	290	5	0.01724	0.00048	0.0039	0.12
E2	325	370	5	0.01351	0.00048	0.0021	0.07
E3	390	250	5	0.02000	0.00048	0.0037	0.12
E4	300	315	5	0.01587	0.00048	0.0023	0.07
E5	345	170	5	0.02941	0.00048	0.0049	0.15
						SUBTOTAL	0.53
ZONA GUAYAMEO							
E1	355	225	20	0.08889	0.00019	0.0060	0.19
E2	1135	385	10	0.02597	0.00019	0.0056	0.18
E3	295	220	5	0.02273	0.00019	0.0013	0.04
						SUBTOTAL	0.41
ZONA SAN JOSÉ							
E1	307	434	10	0.02304	0.01038	0.0734	2.32
E2	202	584	10	0.01712	0.01038	0.0359	1.13
						SUBTOTAL	3.45
ZONA LA MADERA							
E1	455	275	10	0.03636	0.00067	0.0111	0.35
E2	1050	520	10	0.01923	0.00067	0.0135	0.43
E3	665	325	10	0.03077	0.00067	0.0137	0.43
						SUBTOTAL	1.21
ZONA BARRIO LOZANO							
E1	950	240	5	0.02083	0.00067	0.0133	0.42
E2	920	315	5	0.01587	0.00067	0.0098	0.31
						SUBTOTAL	0.73
TOTAL ENTRADAS							12.42

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)

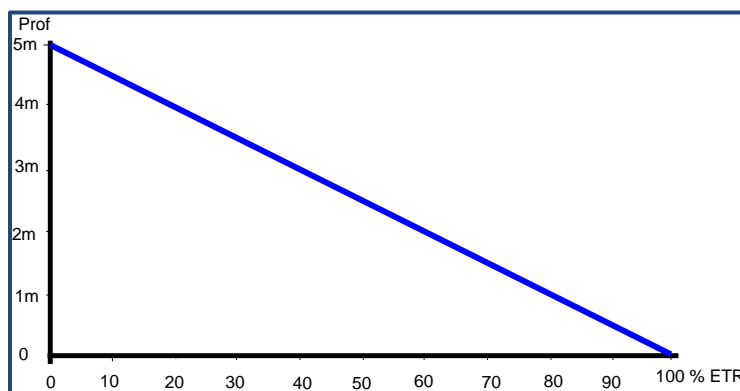
Esta componente se presenta en las 10 zonas de balance, en las que se registran niveles freáticos someros. La precipitación y temperatura utilizadas son las obtenidas en las normales climatológicas de las estaciones de mayor proximidad a cada área de balance referida.

Considerando para la zona Zirizticuaro, los valores medios anuales de temperatura y precipitación de 28 °C y 709 mm, la lámina de ETR que se obtiene es de 704 mm; para las zonas Hacienda Vieja, Aratichanguio, La Parota y Cupuan, con los valores medios anuales de temperatura de 28.5°C y precipitación de 696 mm, la lámina de ETR que se obtiene es de 695 mm; mientras que para las zonas Carachurio y Guayameo los valores promedio anual de temperatura y precipitación son 26.5 °C y 885 mm y con ellos se obtiene una lámina de ETR de 837 mm; por último, para las zonas San José, La Madera y Barrio Lozano, con valor de temperatura de 27 °C y precipitación de 768 mm, se obtiene una lámina de ETR de 748 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 11.6 hm³/año. **ETR = 11.6 hm³/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 Mm ³ /año
ZONA GUAYAMEO					
0 A1	0.00	0.00	90%	0.837	0.00
1 A 2	0.00	0.00	70%	0.837	0.00
2 A 3	1.06	1.06	50%	0.837	0.44
3 A 4	0.59	0.59	30%	0.837	0.15
4 A 5	0.53	0.53	10%	0.837	0.04
TOTAL		2.19			0.63
ZONA SAN JOSÉ					
0 A1	0.00	0.00	90%	0.748	0.00
1 A 2	0.00	0.31	70%	0.748	0.16
2 A 3	1.06	0.80	50%	0.748	0.30
3 A 4	0.59	0.08	30%	0.748	0.02
4 A 5	0.53	0.09	10%	0.748	0.01
TOTAL		1.28			0.49
ZONA LA MADERA					
0 A1	0.00	0.84	90%	0.748	0.56
1 A 2	0.00	0.66	70%	0.748	0.35
2 A 3	1.06	0.89	50%	0.748	0.33
3 A 4	0.59	0.79	30%	0.748	0.18
4 A 5	0.53	1.66	10%	0.748	0.12
TOTAL		4.84			1.54
ZONA BARRIO LOZANO					
0 A1	0.00	0.00	90%	0.748	0.00
1 A 2	0.00	1.14	70%	0.748	0.60
2 A 3	1.06	0.75	50%	0.748	0.28
3 A 4	0.59	0.75	30%	0.748	0.17
4 A 5	0.53	0.86	10%	0.748	0.06
TOTAL		3.50			1.11
SUMA					11.56

7.2.2 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría el volumen de extracción por bombeo es de **0.8 hm³/año**, en todo el acuífero, distribuidos de la siguiente manera: 0.2 hm³ en Hacienda Vieja, 0.3 hm³ en La Parota, 0.2 hm³ en Carachurio y 0.1 hm³ en Aratichanguio. En las demás zonas de explotación la extracción por bombeo es incipiente.

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 11. 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 ZIRITZICUARO							
S1	540	395	10	0.02532	0.00008	0.0011	0.03
						SUBTOTAL	0.03
ZONA ARATICHANGIO							
S1	260	550	10	0.01818	0.00040	0.0019	0.06
S2	585	445	10	0.02247	0.00040	0.0053	0.17
S3	180	500	10	0.02000	0.00040	0.0014	0.05
						SUBTOTAL	0.27
ZONA HACIENDA VIEJA							
S1	715	220	5	0.02273	0.00007	0.0011	0.04
S2	1765	305	5	0.01639	0.00007	0.0020	0.06
S3	1890	430	5	0.01163	0.00007	0.0015	0.05
S4	1575	335	5	0.01493	0.00007	0.0016	0.05
						SUBTOTAL	0.20
ZONA LA PAROTA							
S1	530	470	2.5	0.00532	0.00092	0.0026	0.08
S2	1825	350	2.5	0.00714	0.00092	0.0120	0.38
S3	1505	475	2.5	0.00526	0.00092	0.0073	0.23
						SUBTOTAL	0.69
ZONA CUPUAN							
S1	995	355	10	0.02817	0.00073	0.0205	0.65
						SUBTOTAL	0.65
ZONA CARACHURIO							
S1	655	295	5	0.01695	0.00038	0.0042	0.13
S2	520	295	5	0.01695	0.00038	0.0033	0.11
						SUBTOTAL	0.24
ZONA GUAYAMEO							
S1	415	250	5	0.02000	0.00019	0.0016	0.05
						SUBTOTAL	0.05
ZONA SAN JOSÉ							
S1	527	460	10	0.02174	0.00865	0.0991	3.13
						SUBTOTAL	3.13
ZONA LA MADERA							
S1	300	410	10	0.02439	0.00058	0.0042	0.13
S2	690	350	10	0.02857	0.00058	0.0114	0.36
						SUBTOTAL	0.49
ZONA BARRIO LOZANO							
S1	810	375	5	0.01333	0.00058	0.0063	0.20
S2	805	385	5	0.01299	0.00058	0.0061	0.19
						SUBTOTAL	0.39
TOTAL SALIDAS							6.14

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 las 2 zonas que lo presentan, de acuerdo con la ecuación (1):

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

Zona Ziritzicuaro:

$$Dfb = 0.0 + 0.2 + 0.1 - 0.0 - 0.0 - 0.2$$
$$Dfb = 0.1 \text{ hm}^3$$

Zona Aratichanguio:

$$Dfb = 0.0 + 0.5 + 0.7 - 0.3 - 0.1 - 0.2$$
$$Dfb = 0.6 \text{ hm}^3$$

Zona Hacienda Vieja:

$$Dfb = 0.0 + 0.8 + 0.3 - 0.2 - 0.2 - 0.7$$
$$Dfb = 0.0 \text{ hm}^3$$

Zona La Parota:

$$Dfb = 0.0 + 1.3 + 4.2 - 0.7 - 0.3 - 3.5$$
$$Dfb = 1.0 \text{ hm}^3$$

Para las zonas Cupuan, Carachurio, Guayameo, San José, La Madera y Barrio Lozano, 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 Cupuan:

$$Rv = 0.6 + 0.0 + 2.7 - 0.0 - 0.8$$

$$\mathbf{Rv = 2.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Zona Carachurio:

$$Rv = 0.2 + 0.2 + 0.5 - 0.0 - 0.5$$

$$\mathbf{Rv = 0.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Zona Guayameo:

$$Rv = 0.1 + 0.0 + 0.6 - 0.0 - 0.4$$

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

Zona San José:

$$Rv = 3.1 + 0.0 + 0.5 - 0.0 - 3.5$$

$$\mathbf{Rv = 0.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Zona La Madera:

$$Rv = 0.5 + 0.0 + 1.5 - 0.0 - 1.2$$

$$\mathbf{Rv = 0.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Zona Barrio Lozano:

$$Rv = 0.4 + 0.0 + 1.1 - 0.0 - 0.7$$

$$\mathbf{Rv = 0.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

Por lo tanto, la Rv total de las 10 zonas de balance es

$$Rv = 0.2 + 0.5 + 0.8 + 1.3 + 2.5 + 0.4 + 0.3 + 0.1 + 0.8 + 0.8$$

$$\mathbf{Rv = 7.8}$$

Y la recarga total (R) es igual a:

$$\mathbf{R = Rv + Eh}$$

$$\mathbf{R = 7.8 + 12.4}$$

$$\mathbf{R = 20.2 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

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:

$$\text{DMA} = \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \quad (3)$$

Donde:

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

R = Recarga total media anual;

DNC = Descarga natural comprometida;

VEAS = Volumen concesionado de agua subterránea;

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. Para este caso, su valor es de **20.2 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 **2.9 hm³ anuales**, que corresponden a la descarga del flujo base y a las salidas por flujo subterráneo hacia el Río Balsas (zonas Ziritzicuaró, Aratichanguio, Hacienda Vieja y La Parota).

8.3 Volumen concesionado de agua subterránea (VEAS)

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, con fecha de corte al **30 de diciembre de 2022** es de **943,419 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 20.2 - 2.9 - 0.943419 \\ \text{DMA} &= 16.356581 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **16,356,581 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.