



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO OSTUTA (2008), ESTADO DE
OAXACA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización.....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincias fisiográficas.....	6
3.2 Clima.....	7
3.3 Hidrografía.....	8
3.4 Geomorfología.....	9
4. GEOLOGÍA.....	10
4.1 Estratigrafía.....	12
4.2 Geología estructural.....	15
4.3 Geología del subsuelo.....	17
5. HIDROGEOLOGÍA.....	18
5.1 Tipo de acuífero.....	18
5.2 Parámetros hidráulicos.....	18
5.3 Piezometría.....	19
5.4 Comportamiento hidráulico.....	19
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	20
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	21
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	22
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA.....	23
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	23
7.1 Entradas.....	24
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	24
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	25
7.2 Salidas.....	26
7.2.1 Bombeo (B).....	26
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	26
7.2.3 Evapotranspiración (ETR).....	27
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	29
8. DISPONIBILIDAD.....	30
8.1 Recarga total media anual (R).....	31
8.2 Descarga natural comprendida (DNC).....	31
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	31
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	32
9. BIBLIOGRAFÍA.....	33

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la "NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales". Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

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

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

1.1 Localización

El acuífero Ostuta, definido con la clave 2008 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroriental del estado de Oaxaca, en el límite con el estado de Chiapas, entre los paralelos 16°00'03" y 16°46'34" de latitud norte y entre los meridianos 93°59'51" y 94°48'08" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 3,785 km².

Limita al norte con el acuífero Coatzacoalcos, al oeste con Tehuantepec, ambos del estado de Oaxaca; al noreste y este con el acuífero Cintalapa y al sureste con Arriaga-

Pijijiapan, ambos pertenecientes al estado de Chiapas. Al sur su límite natural es el Golfo de Tehuantepec en el Océano Pacífico (Figura 1).

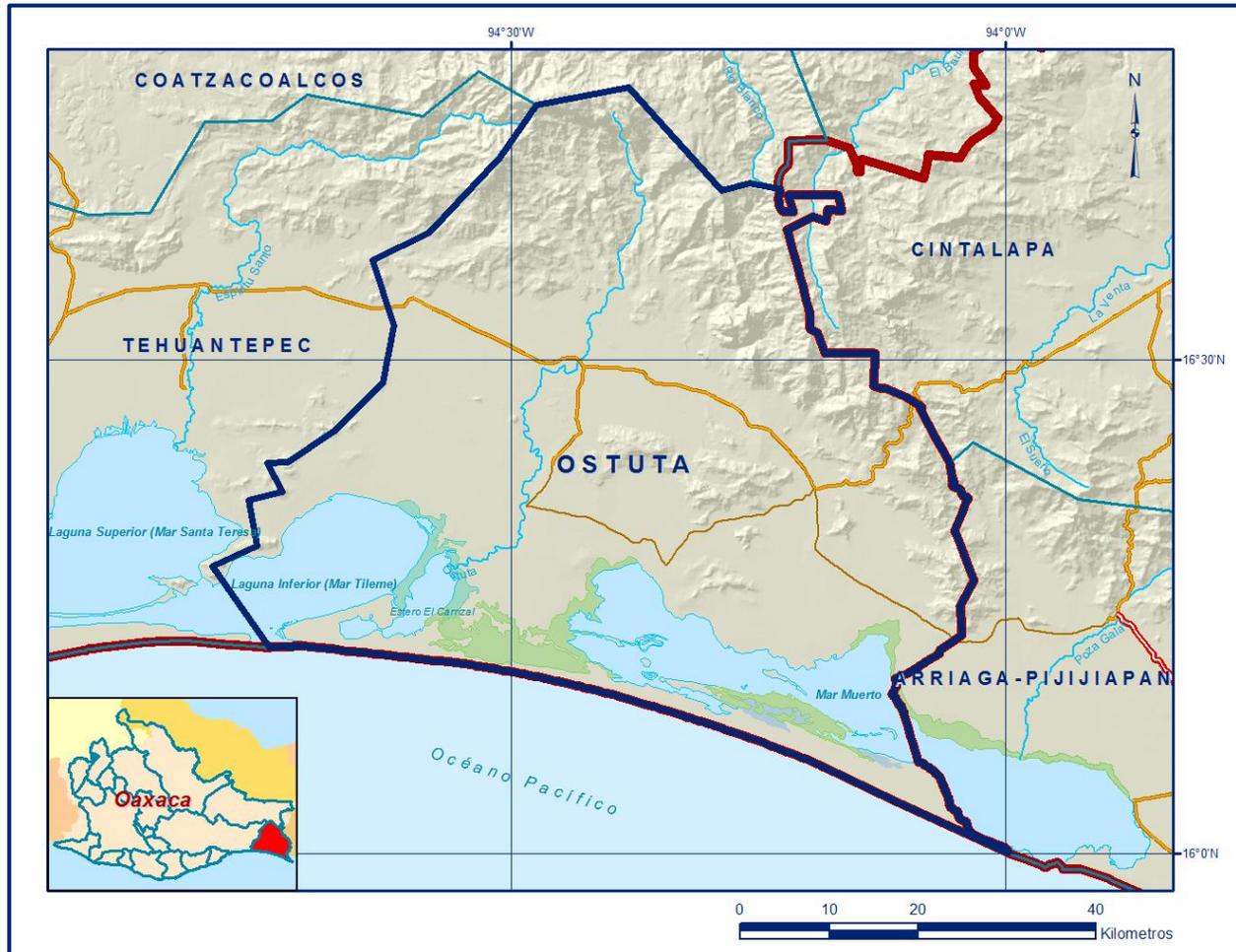


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la superficie que cubre el acuífero comprende totalmente los municipios Santo Domingo Zanatepec, San Francisco del Mar, San Francisco Ixhuatán, Reforma de Pineda, San Pedro Tapanatepec y Chahuities; y de manera parcial los municipios San Dionisio del Mar, Santiago Niltepec y San Miguel Chimalapa.

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

ACUÍFERO 2008 OSTUTA							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	94	44	49.4	16	23	43.5	
2	94	43	33.0	16	23	44.2	
3	94	40	48.5	16	25	38.8	
4	94	37	49.4	16	28	33.1	
5	94	37	7.4	16	32	3.0	
6	94	38	25.1	16	36	0.3	
7	94	34	57.3	16	37	43.1	
8	94	30	41.7	16	42	16.3	
9	94	28	29.7	16	45	27.0	
10	94	22	53.5	16	46	31.2	
11	94	17	13.4	16	40	15.0	
12	94	15	31.9	16	40	42.4	
13	94	13	45.2	16	40	21.0	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL
14	93	59	50.8	16	0	2.6	DEL 14 AL 15 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
15	94	44	40.2	16	12	31.5	
16	94	48	7.4	16	17	26.4	
17	94	45	23.8	16	18	39.8	
18	94	45	57.2	16	21	25.6	
19	94	43	54.1	16	21	58.1	
1	94	44	49.4	16	23	43.5	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Pacífico Sur y al Consejo de Cuenca Costa de Oaxaca, instalado el 7 de abril de 1999. Su territorio se encuentra parcialmente vedado. Sólo una pequeña área de su extremo nororiental se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto de veda *“Acuerdo que establece el Distrito de Riego, Drenaje y Control de Inundaciones del Bajo Río Grijalva, en el estado de Tabasco”*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 19 de octubre de 1957. Esta veda es tipo II en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

En la mayor parte de la superficie no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. La porción no vedada del acuífero Ostuta, clave 2008, 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

El uso principal del agua subterránea es el agrícola. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En su extremo nororiental, en el límite con el estado de Chiapas, se localiza parte de la Reserva de la Biosfera “La Sepultura”, decretada el 6 de junio de 1995.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo algunos estudios geohidrológicos de evaluación, entre los más importantes podemos mencionar los siguientes:

INFORME DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DEL RÍO OSTUTA, OAXACA. Realizado en 1972 por HIDROTEC, S.A. para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). El estudio tuvo como objetivo tener el primer conocimiento de la distribución de las zonas acuíferas y su probable funcionamiento, para realizar una evaluación preliminar de los recursos disponibles y establecer la conveniencia de continuar con investigaciones futuras. Entre sus actividades de campo relevantes destacan el censo de aprovechamientos, hidrometría de las extracciones, nivelación de brocales de pozos, ejecución de pruebas de bombeo, toma de muestra de agua subterránea para análisis fisicoquímicos, reconocimientos hidrogeológicos y exploraciones geoeléctricas. Concluye que los materiales de relleno forman acuíferos granulares en cuatro valles desarrollados alrededor de los principales ríos: Unión Hidalgo-Niltepec, Reforma – Ixhuatán, Ostuta y Tapanatepec-Chahuities, que tienen un espesor de relleno de 60 a 100 m; conforman acuífero de tipo libre, con una transmisividad promedio de $4.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y un coeficiente de almacenamiento regional de 2.5×10^{-3} . El volumen de extracción era de 1.0 hm^3 anuales en tanto que su recarga media anual se calculó en 25.0 hm^3 .

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN EL DISTRITO DE RIEGO EN EL ISTMO DE TEHUATEPEC, OAXACA. Realizado en 1990 por GEOELEC, S. A. DE C.V., para la Comisión Nacional del Agua. Identifica un espesor de hasta 350 m de depósitos

aluviales del acuífero en explotación en la región comprendida al oeste de las localidades de Espinal, norte de Juchitán y suroeste de Comitancillo. Las calizas cretácicas que afloran en la región constituyen una fuente potencial debido sus condiciones favorables de permeabilidad secundaria por fracturamiento.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS EN LOS ACUÍFEROS TEHUATEPEC, RÍO OSTUTA, NOCHIXTLÁN Y HUATULCO DEL ESTADO DE OAXACA Y CUAJINICUILAPA DEL ESTADO DE GUERRERO. Realizado en 2002 por COPEI, Ingeniería, S.A. de C.V, para la Comisión Nacional del Agua. Recaba información piezométrica y realiza configuraciones del nivel estático para analizar y describir su comportamiento.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO OSTUTA, OAXACA. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincias fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964) el área que cubre el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierras Cristalinas de Chiapas (Manuel Álvarez Jr., 1959). Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI, se localiza en la Provincias Fisiográficas Cordillera Centroamericana, la porción norte y el extremo nororiental en la Subprovincia Sierras del Sur de Chiapas y la región centro y sur en la Discontinuidad Llanura del Istmo.

La Provincia Cordillera Centroamericana inicia en el Istmo de Tehuantepec y se extiende en dirección sureste hasta la República de Nicaragua, atravesando los territorios de Guatemala, Honduras y El Salvador, es otro gran batolito ígneo emergido sobre el sitio de subducción de la placa de Cocos. En casi todo Chiapas, el cuerpo intrusivo ígneo está plenamente expuesto, pero a partir del volcán Tacaná, compartido entre México y Guatemala, queda casi todo sepultado por los productos de los numerosos volcanes juveniles de los países centroamericanos. En México abarca parte de los estados de Chiapas y Oaxaca, así como una pequeña porción de Veracruz.

En la Subprovincia Sierras del Sur de Chiapas afloran las rocas graníticas del batolito, integrando sierras de orientación noroeste-sureste que se internan en territorio de

Guatemala; sólo al norte de Santiago Niltepec, Oaxaca, se presenta un afloramiento de rocas volcánicas seguido por otro de rocas metamórficas con manchones calcáreos. Esta subprovincia forma parte de la zona conocida regionalmente como Sierra Atravesada.

La Discontinuidad Llanura del Istmo inicia al oeste de Santo Domingo Tehuantepec en Oaxaca y se extiende con rumbo sur-sureste hasta Tonalá, Chiapas; tiene una longitud y un ancho máximo aproximados de 185 y 50 km, respectivamente. El origen de esta llanura costera con línea de costa cóncava hacia el Océano Pacífico, se relaciona tanto con el depósito de materiales del Pleistoceno al Reciente, provenientes de las sierras cercanas, como con procesos de emersión de la zona. Encierra a las lagunas Superior, Inferior y Mar Muerto por medio de barras anchas de bocas estrechas, tiene la particularidad de presentar al norte del Mar Muerto, afloramientos pequeños de rocas ígneas intrusivas, extrusivas y metamórficas.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima que predomina en la superficie baja del acuífero, en una franja orientada en sentido noroeste-sureste, es de tipo cálido subhúmedo $Aw_1(w)$, con humedad intermedia dentro de este tipo, que cambia a clima A $w_2(w)$, el más húmedo dentro de este tipo, conforme se eleva la topografía. Ambas variantes presentan un régimen de lluvias en verano y un porcentaje de lluvias invernales entre 5 y 10.2% del total anual, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm y la relación entre precipitación y temperatura (P/T) entre 43.2 y 55.3.

En las zonas topográficamente más altas del extremo norte y noreste, se presenta el clima (A)C(w2), semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Régimen de lluvias de verano con índice P/T mayor de 55; y el clima C(m) templado, húmedo, 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 cálido menor de 22°C. En ambos tipos de clima la precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 10 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie del acuífero que contienen registros para diferentes periodos: San Francisco del Mar, Chahuities, Reforma, San Pedro Tapanatepec, Zanatepec, La Providencia, Ostuta, San Miguel Chimalapa, Niltepec y La Venta. Con estos datos, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **1177.4 mm**, **26.9 °C** y **2000 mm**, respectivamente, representativos del acuífero.

3.3 Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se ubica en dos Regiones Hidrológicas (RH), la zona occidental en la RH-22 "Tehuantepec" y la zona oriental en la RH-23 "Costa de Chiapas". Subregión Hidrológica Resto de la Región, subcuencas de los ríos Ostuta, Niltepec, Tanatepec, Mar Muerto y Lago Superior e Inferior. Debido a la escasa pendiente de la planicie costera, el sistema de drenaje se encuentra poco desarrollado; sólo se observan los ríos Espíritu Santo, Cazadero, Niltepec y Ostuta

El río Chicapa nace en la Sierra Madre del Sur, al norte de la zona, a una elevación de 2,200 msnm, con el nombre del río Espíritu Santo; desciende de la sierra pasando por el ingenio de Santo Domingo y La Venta hasta llegar al poblado de Chicapa de Castro, para desembocar en la Laguna Superior. A partir del ingenio de Santo Domingo, cambia de nombre a río Chicapa. Su extensión es de 72 km y cuenta con una estación hidrométrica del mismo nombre ubicada sobre el puente de la carretera internacional Cristóbal Colón, a 5 km del ingenio de Santo Domingo. Hasta esta estación, el río drena un área de 435 km², constituidos esencialmente por superficie montañosa y aguas abajo de ésta, después de pasar frente a los poblados La Venta, Unión Hidalgo y Chicapa de Castro, drena un área adicional de 146 km², por lo que la superficie total drenada es de 581 km².

El río Cazadores nace al sur del río Chicapa, recogiendo los escurrimientos entre los cerros Guajolote y Atravesado. Desemboca en la Laguna Superior, 2 km al oriente de la desembocadura del río Chicapa, después de un recorrido de 50 km, en el cual cruza el valle que se localiza entre Unión Hidalgo y Niltepec. El área de esta cuenca cubre una extensión de 474 km² y se localiza al occidente de la población Niltepec.

Por su parte, el río Niltepec nace al noreste del poblado de mismo nombre, en la Sierra Madre del Sur, en la cota de 2,200 msnm; sus escurrimientos se descargan en la porción oriental de la Laguna Inferior; su recorrido es de 45 km, drenando un área

total de 422 km². Este río cruza la parte oriental del valle de Unión Hidalgo, para, posteriormente, entrar en una formación compacta que se localiza al sur del poblado de Niltepec y desembocar en la Laguna Inferior, en un pequeño valle al occidente del valle de San Francisco Ixhuatán. Su drenaje es muy ramificado al norte de Niltepec, donde corta muy pocos rellenos.

Al igual que los otros ríos de la zona, el río Ostuta nace en la Sierra Madre del Sur, a una altitud de 2,300 msnm, tiene un desarrollo de 65 km hasta su desembocadura en la Laguna Oriental. Su principal afluente es el río Zanatepec que se le une al norte del poblado Huanacastal; después, bajo el nombre de río Ostuta, pasa por las poblaciones de Reforma y San Francisco Ixhuatán

Al oriente de la cuenca del río Ostuta se localiza la cuenca del río Tapanatepec, el cual nace en el parteaguas continental cerca de los límites de los estados de Chiapas y Oaxaca. Al descender a la sierra, entra en un valle que se localiza entre los poblados de San Pedro Tapanatepec y Chahuites, posteriormente, descarga sus aguas en la parte oriental del Mar Muerto. Su longitud es de 55 km y drena un área de 425 km², localizada entre el cerro Loma Alta y la Sierra de Chiapas. Los escurrimientos de este río no son medidos en ninguna estación hidrométrica, por lo que no se conoce su descarga hacia el Golfo de Tehuantepec.

3.4 Geomorfología

La zona comprende las planicies, lagunas y esteros del Golfo de Tehuantepec. En general, se trata de una planicie costera con una amplitud variable de 20 a 50 km, de poco relieve, que se encuentra en un periodo de estabilización, lo cual se confirma por las planicies aluviales y barras que se han formado. La planicie es interrumpida por algunas elevaciones montañosas intermedias de origen volcánico y metamórfico con alturas del orden de 200 a 500 msnm. También abarca Sierras Orientales que van de norte a sur en la parte centro-oriente del estado, Sierras Centrales de Oaxaca del centro hacia el norte y paralelamente al occidente de la Mixteca Alta.

La planicie tiene una elevación máxima de 50 msnm y desciende hasta la costa, se caracteriza por una serie de lagunas marginales separadas del Océano Pacífico por medio de barras conocidas como Laguna Superior y Laguna Inferior. Esta planicie contiene lomeríos con elevaciones variables entre 50 y 60 m sobre el nivel del terreno que constituyen estrangulamientos del cauce del río Tehuantepec a la altura del

poblado del mismo nombre y otro cerca de Huilotepec. Está rodeada hacia el oeste y norte por serranías con elevaciones hasta de 1,300 msnm.

Las unidades geomorfológicas corresponden a un valle en la zona sur, en etapa de madurez, y sierras escarpadas en la parte norte, en una etapa de juventud o juventud tardía. Actualmente, los valles están siendo labrados por corrientes de régimen permanente que descienden de las sierras y desembocan en la línea costera del Golfo de Tehuantepec, rellenando las lagunas marginales y los esteros.

4. GEOLOGÍA

A nivel regional, en la zona se encuentran implicados los Terrenos Tectonoestratigráficos Xolapa y Maya, así como los bloques Arco Chontal y Mixtequita. El Terreno Xolapa aflora en el extremo suroccidental y está constituido por ortogneises, migmatitas, anfibolitas y diques aplíticos con metamorfismo en facies de anfibolita. La interpretación de la edad de esta unidad es compleja ya que estudios isotópicos ha reportado edades desde el Precámbrico hasta el Paleoceno. Otras edades miocénicas están relacionadas con grandes emplazamientos plutónicos no deformados de composición granodiorítica con variaciones a dioritas. El Bloque Arco Chontal se presenta en la porción suroriental; se constituye como el arco volcánico mesozoico más oriental con respecto a los situados al occidente de México. El Basamento de este bloque no se reconoció, sin embargo, algunos autores consideran que puede ser rocas pertenecientes al Complejo Xolapa. El Arco Chontal consiste de una secuencia vulcanosedimentaria conformada por andesitas, areniscas, lutitas y limolitas con interestratificaciones de lentes calcáreos. La parte superior está constituida por estratos delgados de calizas marmorizadas y esquistosas; conglomerados polimícticos con clastos calcáreos y andesitas; fragmentos de rudistas le dan una edad Neocomiano-Turoniano o Cretácico Temprano (Carfantán, 1981, 1983). La cubierta del Arco Chontal está representada por calizas y dolomías pertenecientes a la Formación Teposcolula, a la cual la sobreyace en concordancia la Formación Yucunama constituida por calizas y lutitas (Figura 2).

El Bloque La Mixtequita se caracteriza por contener dos unidades que se han denominado Complejo Guichicovi y Batolito La Mixtequita. Las rocas más antiguas de la región corresponden al Complejo Guichicovi conformado por paragneises, ortogneises, charnoquitas y anortositas de edades isotópicas entre 911 y 1,760 Ma que corresponden al Proterozoico Medio, coincidiendo tanto en litología como en edades con el basamento del Terreno Oaxaca (Complejo Oaxaqueño). Por otra parte, el

Batolito La Mixtequita está constituido por granitos con variaciones a granodioritas de edades isotónicas que varían de 196 a 318 Ma, correspondientes al Carbonífero-Jurásico, la relación con el Complejo Guichicovi es por intrusión. Estas unidades se encuentran cubiertas discordantemente por limolitas, conglomerados, areniscas y andesitas de la Formación Todos Santos (?) del Jurásico Medio.

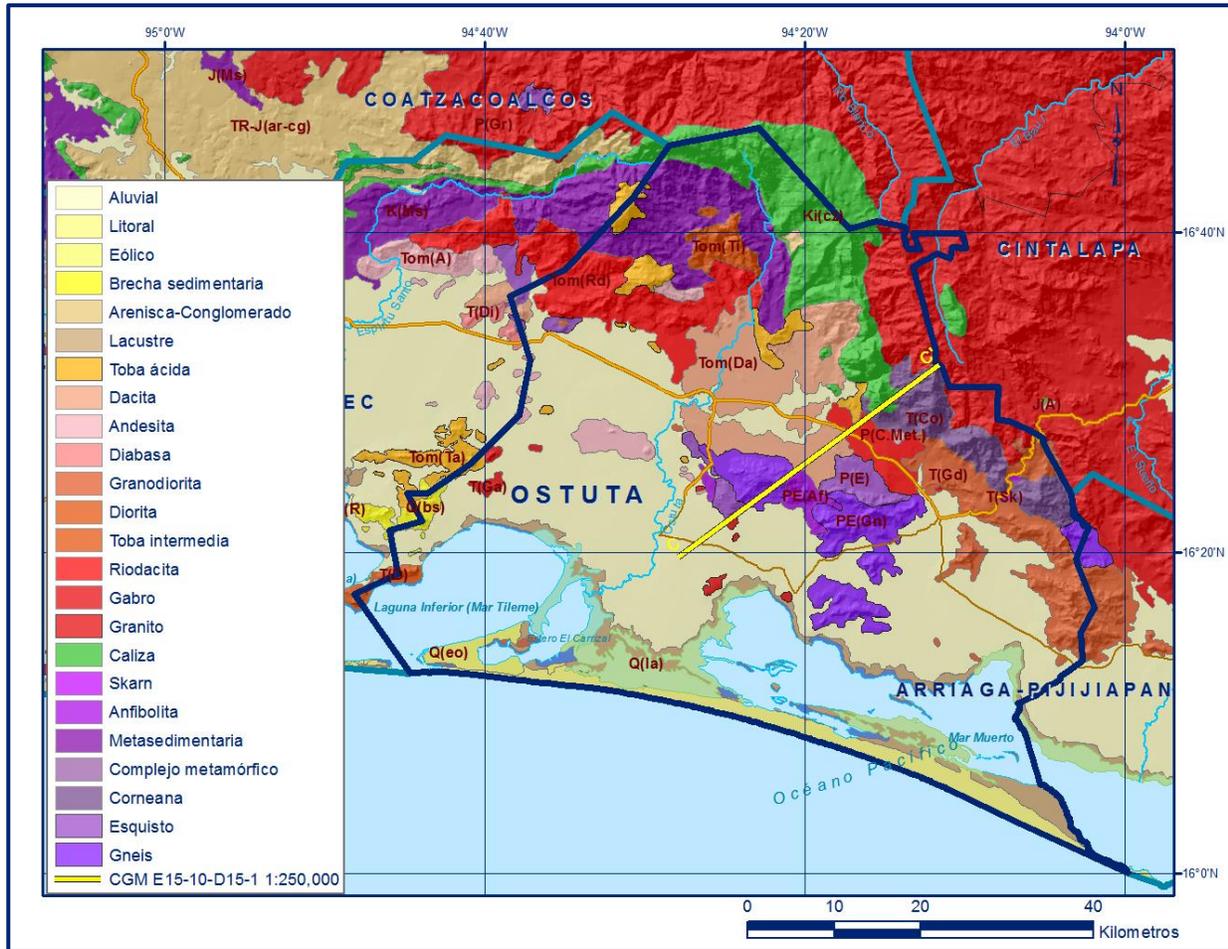


Figura 2. Geología general del acuífero

El Terreno Maya comprende la mayor parte del área de estudio y su basamento lo constituye el Complejo Sierra de Juárez, de probable edad Carbonífero-Pérmico. Está constituido por una potente secuencia de esquistos de clorita, sericita y cuarzo, metasedimentos cuarzopelíticos, rocas verdes y gabroicas metamorizadas en facies de esquistos verdes, ocasionalmente se encuentran serpentinitas y franjas milonitizadas. A partir del Pérmico hasta el Triásico se desarrolla un arco magmático continental en la margen pacífica que origina rocas de composición granítico-granodiorítico, con variaciones a dioritas y tonalitas, que constituyen el Macizo de

Chiapas. Sobreyaciendo discordantemente a las unidades anteriores, se encuentra la Formación Todos Santos (?) del Jurásico Medio, constituida por limolitas, areniscas y conglomerados polimícticos, con intercalación de coladas andesíticas. Sobre esta formación se depositan las secuencias relacionadas a la cuenca jurásica de la Depresión Ístmica y jurásica-cretácica de la Sierra de Chiapas.

La Cuenca de la Depresión Ístmica se caracteriza por secuencias sedimentarias de edad Jurásico Superior, de distribución restringida. En la zona solo aflora su unidad basal que es la Formación Mogoñé, de edad Calloviano-Oxfordiano, constituida por calizas y lutitas apizarradas. La Cuenca de Chiapas está constituida por la Formación Uxpanapa del Kimmeridgiano-Tithoniano, formada por calizas y dolomías, sobreyacida discordantemente por la Formación San Ricardo de edad Hauteriviano-Barremiano, conformada por areniscas y limolitas. La Unidad Indiferenciada del Jurásico Medio al Cretácico Inferior está constituida por areniscas, esquistos y filitas, las cuales se encuentran en una zona de cizalla en la región de La Ventosa y que pueden corresponder a la Formación Todos Santos y formaciones del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, pero metamorfizadas. Yaciendo discordantemente sobre esta unidad se presentan metacalizas de color gris claro a gris oscuro, en parte masivas, marmorizadas y foliadas, lo que sugiere que esta unidad está muy tectonizada y pudiera participar de la deformación de las zonas de cizalla. Cubriendo discordantemente a las formaciones anteriores, aflora la Formación Sierra Madre de edad Albiano-Turoniano, formada por calizas y dolomías. A partir del Paleoceno-Eoceno el Terreno Maya y Bloque Chontal comparten una cubierta terciaria representada por molasas continentales constituidas por conglomerados polimícticos con clastos de rocas metamórficas, calizas, fragmentos de cuarzo y areniscas. Sobreyaciendo en discordancia a los conglomerados aflora una secuencia volcánica constituida por tobas andesíticas, andesitas, dacitas y riolitas con intercalaciones delgadas de areniscas y calizas lacustres pertenecientes a la Formación Laollaga. Durante el Pleistoceno se depositaron arenas, arcillas y limos mal consolidados. Por último, se tienen depósitos de aluvión, palustre, litoral eólico de edad Holoceno (Carta Geológico-Minera Juchitán E15-10 D15-1. Escala 1:250,000. SGM, 2000).

4.1 Estratigrafía

En la región en la que se ubica el acuífero aflora una secuencia estratigráfica constituida por rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas cuya edad comprende del Precámbrico al Reciente. A continuación, se describen de manera general las distintas unidades litológicas, comenzando con la más antigua.

TERRENO XOLAPA

PRECÁMBRICO

Presenta un basamento conocido como **Complejo Xolapa** (De Cserna, 1965) constituido por ortogneises y paragneises con migmatitas en intervalos anatexíticos, diques aplíticos y pegmatíticos, mármoles, anfibolitas y esquistos. Consta de dos grandes grupos de rocas cuya unidad más antigua está constituida por paragneises, esquistos pelíticos, esquistos de biotita y cuarcita, cuyos protolitos sedimentarios son interpretados como interestratificaciones de grauwacas, rocas pelíticas y carbonatos. El segundo grupo es el más ampliamente distribuido y su litología consiste principalmente de ortogneises, anfibolitas y migmatitas en facies de anfibolita. En este grupo se desarrolló un metamorfismo de alto grado y una migmatización a gran escala. La interpretación de su edad ha presentado siempre serias dudas, ya que se han realizado estudios isotópicos con resultados desde Precámbrico hasta Oligoceno-Mioceno (Tolson, 1998); aunque algunas edades terciarias podrían estar relacionadas a emplazamientos plutónicos no deformados con los que concluyó el magmatismo por acreción plutónica contra los terrenos adyacentes; que afectan a este basamento con cuerpos calcoalcalinos de composición generalmente granodiorítica con variaciones a granitos, dioritas, cuarzomonzonitas y cuarzodioritas, que conforman el batolito de la costa.

PALEOZOICO-JURÁSICO

El mismo autor asigna al Paleozoico y Jurásico a la migmatita, gneis y esquisto de facies de anfibolita, que están afectadas por cuerpos intrusivos de granito, granodiorita, tonalita y diorita, desde el Cretácico tardío al Terciario inferior, que a su vez son intrusionados por diques pegmatíticos.

Formación Todos Santos

Sobreyaciendo al Complejo Oaxaqueño en clara discordancia erosional, se encuentran los lechos rojos de la Formación Todos Santos, formada por areniscas y limolitas de estratificación delgada. Se considera que esta formación pertenece al Jurásico Medio. Se presenta al norte de Valle de Etna, en contacto con la Formación Jaltepetongo, en un pequeño afloramiento.

CRETÁCICO

En este periodo quedan incluidos los mármoles que De Cserna (1965) y Ortega (1981) incluyen en el Complejo Xolapa, que suponen son derivados de rocas pelíticas poco

calcáreas, y originados por los cuerpos intrusivos de composición granítico-granodiorítico que causaron el metamorfismo de contacto.

Desde el Cretácico al Reciente, ocurrieron eventos magmáticos en la zona, que hacen incongruentes las edades reportadas por diferentes autores y métodos para la datación de las rocas intrusivas cartografiadas. Esto lleva a la conclusión de que el magmatismo y la intrusión de todos los cuerpos que afectan al Complejo Xolapa, comenzó probablemente desde el Jurásico y continuó quizá hasta el Mioceno.

Formación Teposcolula

Conformada por calizas biomicríticas poco fosilíferas de tipo arrecifal, dispuestas generalmente en estratos gruesos que contienen nódulos de pedernal. Son de color gris claro a café claro y parcialmente dolomitizadas. Afloran al este y sureste, en donde se observan de color gris claro a crema que al intemperizarse se vuelve gris blanquecino, textura criptocristalina y compacta. Se le asigna una edad que corresponde al Cretácico Medio (Albiano-Cenomaniano).

Rocas ígneas intrusivas

El Cretácico Superior está representado por rocas ígneas intrusivas de tipo granítico, que intrusionan a las rocas calizas. Tiene dimensiones y estructuras de batolito y otras secundarias como diques y troncos que afloran de manera extensa en la porción centro y norte. En la franja de 5 a 10 km de la zona costera se encuentran cubiertas por depósitos de areniscas del Terciario y sedimentos de Cuaternario. Su expresión morfológica varía de acuerdo si se encuentra en contacto con micaesquistos o independientemente; formando una topografía que se eleva rápidamente para constituir un conjunto montañoso abrupto y de difícil acceso cuando es granito principalmente, y ondulado con cerros de poca elevación en presencia de micaesquistos. Presentan un sistema tectónico que controla la evolución sedimentaria posterior

TERCIARIO

A este periodo pertenecen las andesitas y dacitas que afloran en el valle formando pequeños montículos agrupados, y esporádicamente forman cuerpos irregulares hacia la porción norte del valle. En esta misma región norte se localiza tobas y cenizas volcánicas del Mioceno.

A esta edad corresponden también los conglomerados, clastos calcáreos y volcánicos con cementante arcilloso calcáreo. Es muy compacto y actúa como material impermeable. Pequeños cuerpos de caliza del Terciario afloran al este y noreste de La Ventosa, aparentemente son dos bloques afallados; son extremadamente porosas y con cavernas de disolución, por el aspecto que presentan parecen ser de origen lacustre.

CUATERNARIO

Del Holoceno se diferenciaron tres depósitos sedimentarios: Aluviales y fluviales que se desarrollan en las planicies y cauces de los ríos y arroyos, constituidos por cantos rodados, gravas, arenas y limos; depósitos litorales que se formaron a lo largo de la línea de costera conformados principalmente de arenas finas, bioclastos y limo que forman actualmente playas, sujetos a la acción de las mareas y niveles máximos actuales del mar. Por último, los depósitos de zona de inundación, representados por sedimentos palustres originados y expuestos en las zonas planas, lagunares y de inundación, a lo largo de la planicie costera, conformados principalmente de materia orgánica, limo, arcilla y arena fina de composición variable

4.2 Geología estructural

Parte del Terreno Maya en esta región, se relaciona con la evolución tectónica del Golfo de México, que inicia con la separación de la región sureste de México de la Pangea. Algunos autores consideran que durante el Triásico Tardío-Jurásico Medio el bloque Yucatán, localizado para ese tiempo en la porción que ocupa el Golfo de México, se movió hacia el sur, a su posición actual a través de una falla transformante que permitió la expansión del Golfo y la deriva del Bloque Yucatán. Otros autores consideran que esta falla transformante de movimiento dextral cruzaba el Istmo de Tehuantepec; discrepan en el sentido de la rotación del Bloque Yucatán. Dickinson y Coney (1980) suponen que el Bloque Yucatán se separó de Norteamérica mediante una megacizalla, con movimiento izquierdo que conectaba el sistema de expansión del Golfo de México con una zona de subducción que actuaba a lo largo de la costa del Pacífico y consideran que este bloque durante su separación de Norteamérica permaneció unido al borde noroccidental de América del Sur, del cual se separó al terminar el movimiento de la megacizalla, ocurrido entre 150 y 125 Ma. La actual posición del Complejo Guichicovi puede estar asociado con desplazamientos transcurrentes dextrales ocurridos durante el Mesozoico. Murillo (1994), propone un modelo con dos alternativas; una que este complejo se desplazó desde el NW a través

de la falla Valle Nacional, o bien que se movió a través de la falla Villa Alta, viajando 300 km.

Se identificaron dos etapas de intrusión, la primera está representada por el Tronco de Jalpa del Marqués, de composición granítica-granodiorítica, probablemente del Cretácico Superior, y rocas de composición granodiorítica con edades que varía de 14.2 ± 7 y 27.9 ± 1.8 Ma, y por migración del magmatismo hacia el oriente esos intrusivos presentan una edad miocénica. Las estructuras más importantes son las siguientes: Falla Chacalapa, con una orientación general W-E, constituye el límite tectónico entre el Terreno Xolapa y el Bloque Chontal, tiene deformación dúctil con desarrollo de milonitas y desplazamiento lateral izquierdo. La Falla Astata, con rumbo general $N80^{\circ}W$, pertenece al mismo sistema de desplazamiento. La Falla Tehuantepec representa el límite entre el Bloque Chontal y el Terreno Maya, con rumbo general $N45^{\circ}W$, de movimientos lateral derecho afecta a rocas de la Formación Teposcolula e intrusivas del Cretácico Superior, con reactivación a falla normal durante el Terciario. La Falla Villa Alta Cruz tiene un rumbo general $NW 65^{\circ}SE$ y es lateral dextral, con reactivación a falla normal en la región del Istmo; en la región suroriental se desarrollaron zona de milonitas, afectando a rocas intrusivas terciarias. La Falla Valle Nacional presenta orientación $NW35^{\circ}SE$, es el límite entre el Bloque Mixtequita y el Terreno Maya, es lateral sinistral y en la unidad litológica Indiferenciado presenta reactivación a fallas normales. El sistema de estructuras entre las fallas Valle Nacional y Villa Alta Cruz, conforman una zona compleja de cizalla en la región del Istmo, reflejada en la unidad litológica Indiferenciado y calizas. En la porción oriental, se presentan las fallas Chepe Negro, El Baúl, y Rizo de Oro, las primeras dos son normales y la última es lateral derecha, relacionadas al Cinturón Milonítico de Chiapas.

El Terreno Xolapa se ha considerado como alóctono (Campa y Coney, 1983), proveniente del Pacífico que acrecionó al continente en el Mesozoico; sin embargo Robinson (1989) y Morán (1992) plantean la hipótesis de que sea la raíz de un arco magmático autóctono Mesozoico desplazado hacia el sureste junto con la tectónica de desplazamiento lateral izquierdo del Bloque Chortis, resultado de la interacción de la unión triple de las placas Norteamericana-Cocos-caribe y su migración hacia el este (Tolson, 1989). El Bloque Chontal, se relaciona con el desarrollo de un arco de islas, cuyo emplazamiento probablemente inició en el Jurásico Superior-Cretácico Inferior, su deformación y acreción a la placa de Norteamérica ocurrió durante las Orogenia Laramide (Carta Geológico-Minera Juchitán E15-10 D15-1. Escala 1:250,000. SGM, 2000).

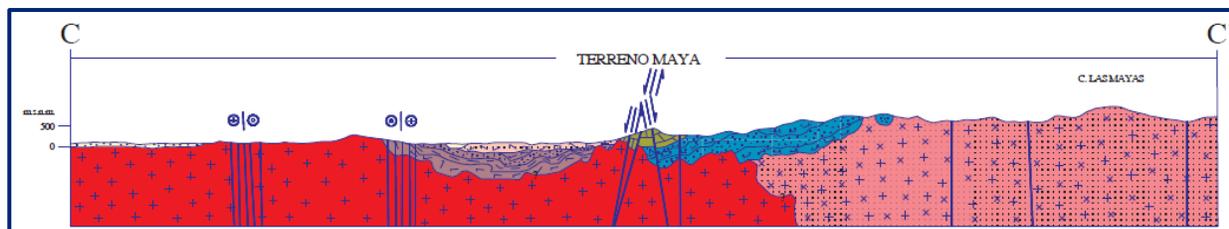
Las rocas que forman el llamado Macizo Granítico de Chiapas ocupan una franja de 70 km de ancho promedio, paralela a la costa del Océano Pacífico, más angosta en su extremo SE que en el NW. Se extiende desde el Istmo de Tehuantepec hasta la región de Chicomuselo y Guatemala, con una longitud de 250 km. La provincia está formada por rocas ígneas intrusivas, que han sido cubiertas, en varias etapas, por rocas extrusivas y contienen localmente rocas metamórficas con edades que varían desde el Precámbrico al Mioceno.

Uno de los rasgos estructurales más notorios que cruza esta provincia es la Falla Polochic. Esta falla atraviesa el territorio guatemalteco, donde controla notablemente el curso del río Polochic, y continúa en Chiapas por la Barranca del Bacantón, Motozintla y Mapastepec, hasta la planicie costera del Pacífico, desplazando la Fosa Mesoamericana en el Golfo de Tehuantepec, en una distancia de 130 km. Esta falla pone en contacto dos regiones geológicas muy diferentes debido a que representa el límite de placas tectónicas. Superficialmente la región septentrional está formada por el batolito paleozoico de la Sierra Madre de Chiapas y su cubierta sedimentaria mesozoica, y la zona meridional donde afloran rocas fuertemente metamorfizadas y sobre todo, un complejo volcánico-plutónico epimetamórfico terciario.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica 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 de granulometría variada, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Ostuta, Niltepec, Tanatepec y arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, lacustres, y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen algunas decenas de metros de espesor.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas, entre las que destacan andesitas, dacitas y tobas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento, así como la parte alterada de rocas intrusivas y metamórficas (figura 3). Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, intrusivas y metamórficas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas. La secuencia de rocas calcáreas cretácicas constituye un acuífero potencial, que puede presentar condiciones de semiconfinamiento o confinamiento debido cuando están sobreyacidas por lutitas y limolitas.



FUENTE: Carta Geológico-Minera E15-10-D15-1 "Juchitán" Escala 1:250.000 (SGM, 2000).

Figura 3. Sección geológica esquemática

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

A partir de la información geológica e hidrogeológica superficial y del subsuelo, recabada en el acuífero, así como lo observado en otros acuíferos vecinos que tienen el mismo origen, evolución y constitución geológica, es posible definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, tanto en sentido horizontal como vertical, de baja capacidad de almacenamiento, conformado por dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado. El medio poroso constituye la unidad superior y está representado por los sedimentos aluviales de granulometría que varía de gravas a arcillas, que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos Ostuta, Niltepec, Tanatepec y arroyos tributarios, así como depósitos eólicos, litorales y conglomerados que conforman la planicie costera. Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas principalmente volcánicas, entre las que destacan andesitas, dacitas y tobas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de **confinamiento o semiconfinamiento**, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

5.2 Parámetros hidráulicos

En el estudio realizado en 1972 (SRH) se llevaron a cabo 10 pruebas de bombeo de corta duración, en pozos y norias, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, como parte del estudio llevado a cabo en 2010 en acuíferos vecinos que tiene origen, evolución y constitución geológica común se ejecutaron otras pruebas de bombeo. Los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales reportaron valores de transmisividad que varían

en un rango muy amplio de **2.5×10^{-4} a $50.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (21.6 a 4320.0m²/día)**. La conductividad hidráulica varía de **6.5 a 181.4 m/d (7.5×10^{-5} a $2.1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)**. Los valores más altos corresponden a los sedimentos clásticos de mayor granulometría y mejor clasificados que constituyen el cauce de los ríos y arroyos, o a zonas de mayor espesor saturado.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Por solución de ecuaciones simultáneas para el planteamiento del balance de aguas subterráneas en los valles de la zona, realizadas en el estudio de 1972, se obtuvieron valores de rendimiento específico de 0.02 a 0.04. Sin embargo, para fines del balance de aguas subterráneas, se adoptó un valor de rendimiento específico S_y de **0.06**.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades del estudio realizado en 2002 además de registros históricos durante el periodo 2000-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur, en la red de monitoreo piezométrico. Para el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2002-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2017.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron desde menos de 1 m en la zona costera y de las lagunas, hasta 10 m, los cuales se incrementan ligeramente por efecto de la topografía de la planicie costera y del cauce de los ríos Ostuta, Niltepec y Tanatepec, hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles, conforme se asciende topográficamente. Los niveles estáticos más someros, menores de 2 m, se registraron en la porción costera, en la zona que bordea a la Laguna Inferior y al Mar Muerto; en tanto que las mayores profundidades, de 8 a 10 m, se presentaron en las porciones noroccidental y suroriental del acuífero, hacia los poblados Santiago Niltepec y Chahuities, respectivamente (Figura 4).

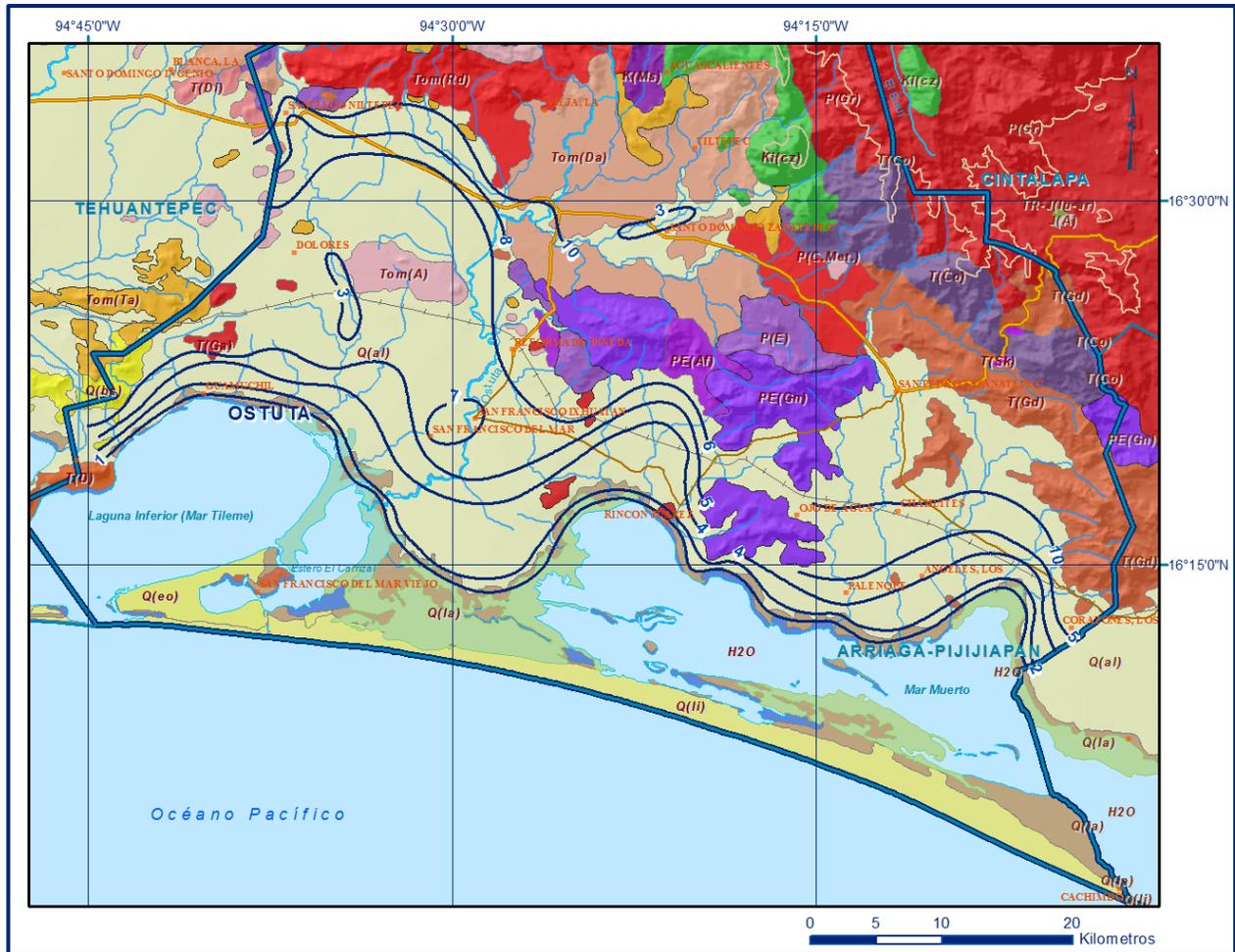


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 1 a 50 msnm, que se incrementan de la planicie costera y del cauce de los ríos Ostuta, Niltepec y Tanatepec, en dirección a los flancos de las sierras que delimitan los valles. Los valores más altos, 30 a 50 msnm, se registran en el extremo noroccidental del acuífero, hacia Santiago Niltepec, desde donde descienden gradualmente hacia el sur por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la planicie costera y hacia la Laguna Inferior. Los valores más someros, de 1 a 2 msnm, se presentan en la zona que rodea a la Laguna Inferior y al Mar Muerto, así como en la barra arenosa costera, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo norte sur, paralela a la dirección del escurrimiento superficial (Figura 5).

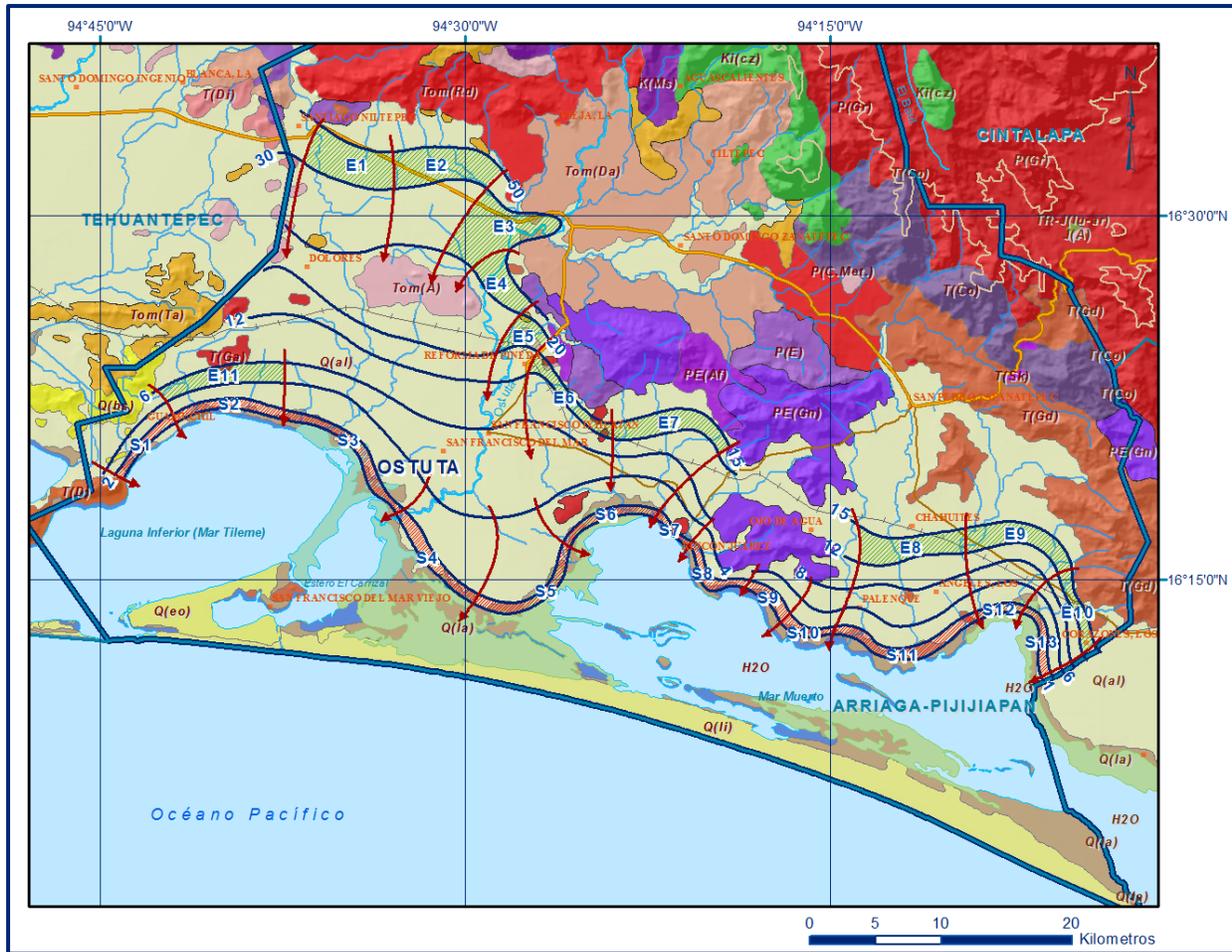


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2002-2019 registró valores de abatimiento de 1 a 3 m, es decir de 0.06 a 0.2 m anuales, en las porciones centro y occidental del acuífero, entre las poblaciones San Francisco Ixhuatán, San Francisco del Mar, Rincón de Pineda, Guamuchil, Dolores y Santiago Niltepec. En las inmediaciones de San Francisco del mar se registran los abatimientos de 3 m y al norte de Rincón Juárez el abatimiento local fue de 10 m, que representa 0.6 m anual. En la porción oriental del acuífero que comprende desde San Pedro Tapanatepec, Chahuites, Ojo de Agua y Palenque hasta Los Corazones, los niveles del agua subterránea no presentan variaciones en su posición (Figura 6).

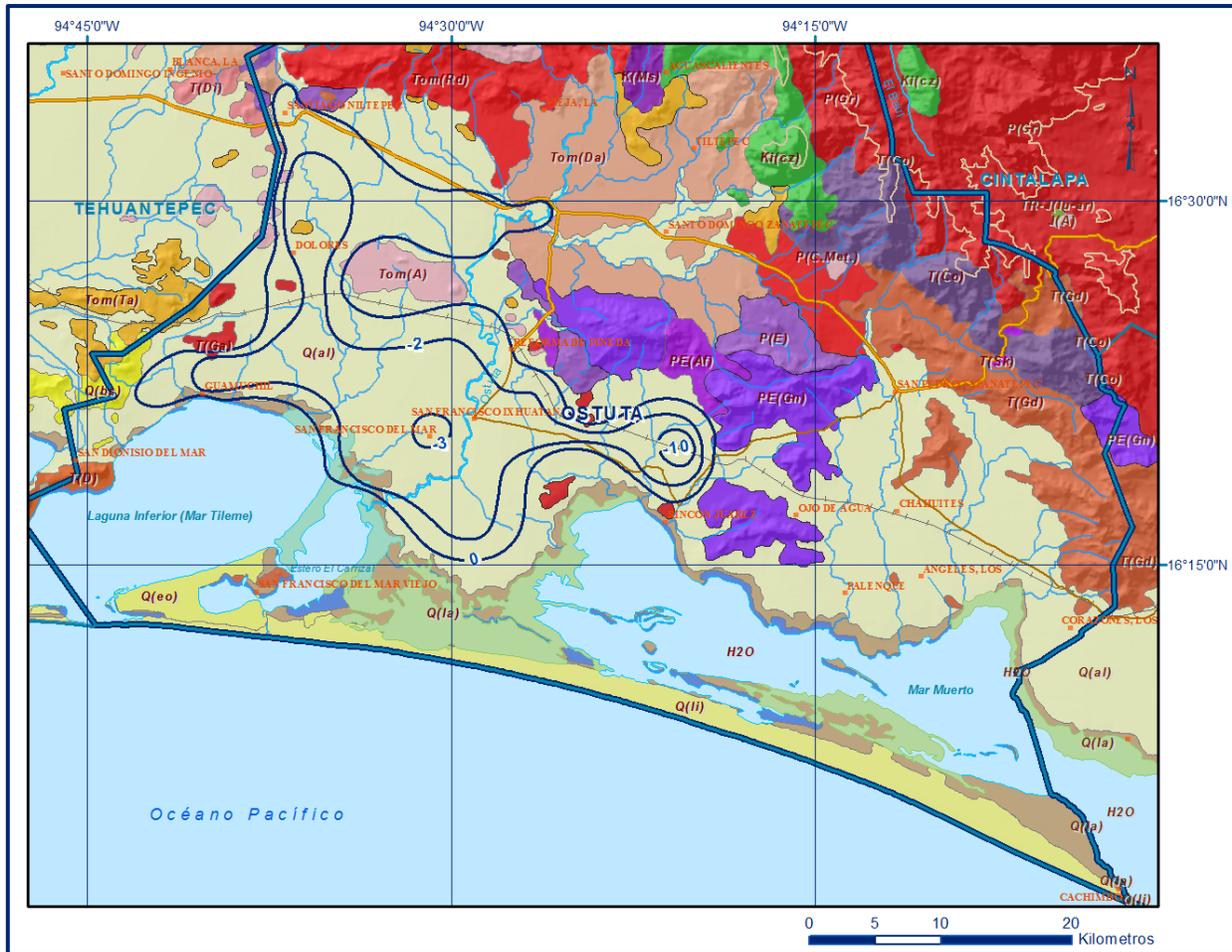


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2002-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2002, se tomaron 29 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación para su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron: temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, iones mayoritarios, sólidos disueltos totales (SDT), hierro, manganeso, nitratos y análisis bacteriológicos.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasaron los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos presenta valores que varían de 105 a 765 mg/l, que no sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del

agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. 12 muestras presentaron concentraciones de fierro que sobrepasaron el LMP de 0.3 mg/l que establecía la norma mencionada y en 10 muestras se excedió el LMP de 0.15 mg/l en la concentración de manganeso.

Con respecto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica de manera general como dulce, de acuerdo al criterio establecido por la American Potability and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 180 a 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, se identificó como familia dominante la bicarbonatada-sódica-cálcica, que corresponde a agua de reciente infiltración, con periodos cortos de residencia, que han circulado a través de rocas volcánicas y calcáreas.

De acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída se clasificó como de salinidad baja (C1) y contenido bajo de sodio intercambiable (S1), lo que indica que es apropiada para su uso en riego sin restricciones.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRIA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos del año 2002, proporcionada por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur, se registró la existencia de 254 aprovechamientos del agua subterránea, de cuales 16 son pozos, 235 norias y 3 manantiales; del total de aprovechamientos, XXX se encuentran activos y XX inactivos temporalmente. De acuerdo con los datos reportados por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se tiene registrado un volumen de extracción de **7.1 hm³ anuales**, a la fecha de corte del 30 de diciembre del 2022, de los cuales 2.5 hm³ (35.2%) son para uso agrícola, 2.2 hm³ (31.0%) para abastecimiento de agua potable a las comunidades y 2.4 hm³ (33.8%) para uso doméstico-pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2002-2019, en un área de balance de **1,023 km²**, que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el

almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh). De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri). Debido a que los volúmenes de agua subterránea para uso público-urbano y agrícola son pequeños, se considera para fines del balance que la recarga incidental es despreciable

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración
- $\Delta V(S)$:** Cambio en el volumen almacenado

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

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

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

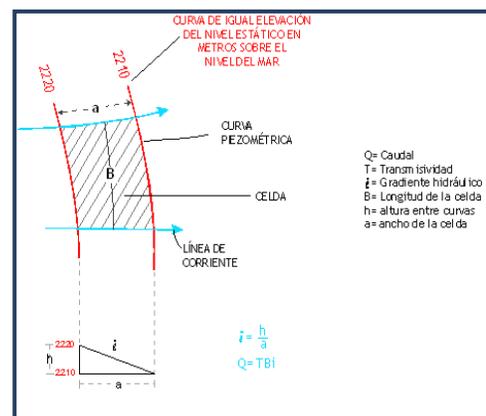
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

- Q:** Caudal (m^3/s)
- T:** Transmisividad (m^2/s)
- B:** Longitud de la celda (m)
- i:** Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **29.9 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	6600	2900	20	0.0069	0.0070	0.3186	5.0
E2	7750	2500	20	0.0080	0.0050	0.3100	4.8
E3	8000	6000	10	0.0017	0.0120	0.1600	2.5
E4	5000	2000	10	0.0050	0.0070	0.1750	2.7
E5	2900	2100	5	0.0024	0.0070	0.0483	0.8
E6	8200	950	3	0.0032	0.0080	0.2072	3.2
E7	9400	1950	3	0.0015	0.0080	0.1157	1.8
E8	8000	1600	3	0.0019	0.0100	0.1500	2.3
E9	8800	1800	3	0.0017	0.0080	0.1173	1.8
E10	6400	800	3	0.0038	0.0080	0.1920	3.0
E11	9200	1400	2	0.0014	0.0100	0.1314	2.0
TOTAL							29.9

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas.

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh) y por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros.

7.2.1 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo es de **7.1 hm³ anuales**.

7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **20.1 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	6000	700	1	0.0014	0.0070	0.0600	1.9
S2	8500	850	1	0.0012	0.0050	0.0500	1.6
S3	12000	800	1	0.0013	0.0050	0.0750	2.4
S4	8800	900	1	0.0011	0.0070	0.0684	2.2
S5	9500	700	1	0.0014	0.0050	0.0679	2.1
S6	7600	900	1	0.0011	0.0050	0.0422	1.3
S7	3400	450	1	0.0022	0.0040	0.0302	1.0
S8	6300	1000	1	0.0010	0.0030	0.0189	0.6
S9	4000	1062	1	0.0009	0.0030	0.0113	0.4
S10	4000	771	1	0.0013	0.0030	0.0156	0.5
S11	12000	1200	1	0.0008	0.0080	0.0800	2.5
S12	3500	800	1	0.0013	0.0100	0.0438	1.4
S13	5600	650	1	0.0015	0.0080	0.0689	2.2
TOTAL							20.1

7.2.3 Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

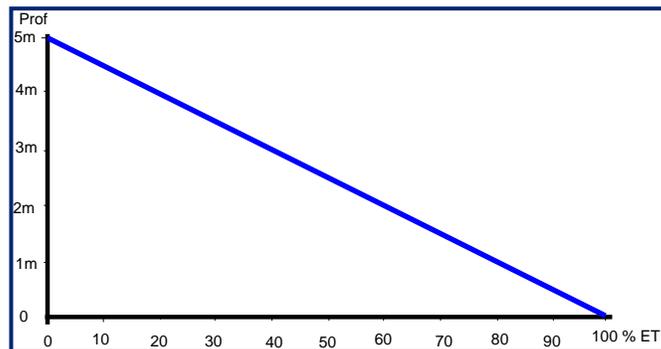
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 26.9 °C y 1177.4mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 1046.4 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	26.9		
P(mm) =	1177.4	P ² =	1386270.76
L =	1945.75545	L ² =	3785964.27
ETR (mm)	1046.4		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR = 153.2 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
2 a 1	1.5	67.5	1.0464	0.7	49.4
4 a 2	3	201.3	1.0464	0.4	84.3
3	3	13.5	1.0464	0.4	5.7
5 a 4	4.5	132.1	1.0464	0.1	13.8
	Total	414.5		TOTAL	153.2

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2002-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico $S_y = 0.06$ se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

ΔVS : Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de -59.0 hm^3 , es decir, un promedio anual de -3.5 hm^3 .

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2002-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	S_y	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-3	-3.0	5.4	0.06	-1.0
-10	-10.0	5.6	0.06	-3.4
-2 a -3	-2.5	260.7	0.06	-39.1
0 a -2	-1.0	258.3	0.06	-15.5
	TOTAL	530.1	TOTAL	-59.0
		Promedio anual		-3.5

Solución a la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= Sh + B + ETR - Eh \pm \Delta V(S) \\ R_v &= 20.1 + 7.1 + 153.2 - 29.9 - 3.5 \\ R_v &= 147.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} R &= R_v + Eh \\ R &= 147.0 + 29.9 \\ R &= 176.9 \text{ hm}^3/\text{anuales} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

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

Donde:

DMA: Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R: Recarga total media anual

DNC: Descarga natural comprometida

VEAS: Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **176.9 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 está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero.

Para el caso del acuífero Ostuta, se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de **135.9 hm³ anuales**, de los cuales 20.1 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia la zona costera y la Laguna Inferior y 114.9 hm³ al 75% del volumen de evapotranspiración para protección de los ecosistemas costeros y ribereño de los ríos. Por lo tanto, **DNC = 135.0 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **38'462,316 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 176.9 - 135.0 - 38.462316 \\ \text{DMA} &= 3.437684 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible de **3'437,684 m³** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 1990. Exploración geofísica en el distrito de riego en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Realizado en 1990 por GEOELEC, S. A. DE C.V.

Comisión Nacional del Agua. 2002. Estudio de actualización de mediciones piezométricas en los acuíferos Tehuantepec, Río Ostuta, Nochixtlán y Huatulco del estado de Oaxaca, y Cuajinicuilapa del estado de Guerrero. Realizado por COPEI, Ingeniería, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Sur, 2019. Información Piezométrica del acuífero Ostuta, estado de Oaxaca.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SAH), 1972. Informe del estudio geohidrológico preliminar de la zona del río Ostuta, Oaxaca. Realizado por HIDROTEC, S. A.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera E15-10 D15-1 "Juchitán". Escala. 1:250.000.