CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO JAMILTEPEC (2004), ESTADO DE OAXACA

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 1
Antecedentes 1
1.1. Localización 1
1.2. Situación administrativa del acuífero 5
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 7
3. FISIOGRAFÍA 8
3.1. Provincia fisiográficas 8
3.2. Clima 9
3.3. Hidrografía 10
3.4. Geomorfología 11
4. GEOLOGÍA 12
4.1. Estratigrafía 13
4.2. Geología estructural 16
4.3. Geología del subsuelo 17
5. HIDROGEOLOGÍA 17
5.1. Tipo de acuífero 17
5.2. Parámetros hidráulicos 18
5.3. Piezometría 18
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 HIDROMETRÍA 22
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 23
7.1. Entradas 23
7.1.1. Recarga vertical (Rv) 24
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 24
7.1.3. Recarga incidental (Ri) 25
7.2. Salidas 26
7.2.1. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 26
7.2.2. Evapotranspiración (ETR) 26
7.2.3. Bombeo (B) 28
7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb) 28
7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S) 28
8. DISPONIBILIDAD 29
8.1. Recarga total media anual (R) 30
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) 30
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 30
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 31
9. BIBLIOGRAFÍA 32

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 Jamiltepec, definido con la clave 2004 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroccidental del estado de Oaxaca, en el límite con el estado de Gurrero, entre los paralelos16°34'12" y 17°20'21"de latitud norte, y entre los meridianos 96°14'57" y 97°00'55" de longitud oeste, cubriendo una superficie de 11,992 km^2.

Limita al norte con los acuíferos Tamazulapan y Nochixtlán; al noroeste con Juxtlahuaca, al noreste con Valles Centrales, al este con los acuíferos Valles Centrales y Río Verde-Ejutla; al sureste con Miahuatlán y Colotepec-Tonameca; al sur con los acuíferos Bajos de Chila y Chacahua; al suroeste limita con el acuífero Pinotepa

Nacional, todos ellos pertenecientes al estado de Oaxaca; al oeste con el acuífero Cuajinicuilapa, del estado de Guerrero. Al suroeste tiene como límite natural el Océano Pacífico (figura 1).

Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, la superficie del acuífero comprende de manera total o parcial los siguientes municipios: Chalcatongo de Hidalgo, Constancia del Rosario, Constancia del Rosario, Heroica Ciudad de Tlaxiaco, La Reforma, Magdalena Jaltepec, Magdalena

Mixtepec, Magdalena Peñasco, Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz, Mesones Hidalgo, Miahuatlán de Porfirio Díaz, Putla Villa de Guerrero, San Agustín Amatengo, San Agustín Chayuco, San Agustín Tlacotepec, San Andrés Cabecera Nueva, San Antonino el Alto, San Antonio Huitepec, San Antonio Sinicahua, San Bartolomé Yucuañe, San Bernardo Mixtepec, San Cristóbal Amoltepec, San Esteban Atatlahuca, San Francisco Cahuacuá, San Francisco Sola, San Ildefonso Sola, San Jacinto Tlacotepec, San Jerónimo Coatlán, San Juan Achiutla, San Juan Diuxi, San Juan Lachao, San Juan Quiahije, San Juan Tamazola, San Juan Teita, San Lorenzo Texmelucan, San Martin Huamelulpam, San Martín Itunyoso, San Mateo Peñasco, San Mateo Sindihui, San Miguel Achiutla, San Miguel Coatlán, San Miguel el Grande, San Miguel Mixtepec, San Miguel Panixtlahuaca, San Miguel Peras, San Miguel Piedras, San Pablo Coatlán, San Pablo Cuatro Venados, San Pablo Tijaltepec, San Pedro Juchatengo, San Pedro Molinos, San Pedro Teozacoalco, San Pedro Tidaá, San Sebastian Coatlan, San Simón Almolongas, San Vicente Coatlan, San Vicente Lachixio, San Vicente Nuñú, Santa Ana, Santa Catarina Juquila, Santa Catarina Loxicha, Santa Catarina Tayata, Santa Catarina Ticuá, Santa Catarina Yosonotu, Santa Cruz Itundujia, Santa Cruz Mixtepec, Santa Cruz Tacahua, Santa Cruz Tayata, Santa Cruz Zenzontepec, Santa Inés del Monte, Santa Lucía Miahuatlán, Santa Lucía Monteverde, Santa María del Rosario, Santa María Huazolotitlán, Santa María Lachixío, Santa María Nduayaco, Santa María Peñoles, Santa Maria Sola, Santa María Tataltepec, Santa María, Yolotepec, Santa María Yosoyua, Santa María Yucuhiti, Santa María Zacatepec, Santa María Zaniza, Santiago Amoltepec, Santiago Ixtayutla, Santiago Jamiltepec, Santiago Juxtlahuaca, Santiago Minas, Santiago Nuyoo, Santiago Tetepec, Santiago Textitlan, Santiago Tilantongo, Santiago Tlazoyaltepec, Santiago Yaitepec, Santiago Yosondua, Santo Domingo Ixcatlan, Santo Domingo Nuxaá, Santo Domingo Teojomulco, Santo Tomás Ocotepec, Tataltepec de Valdés, Villa de Tututepec de Melchor, Villa Sola de Vega, Yogana, Yutanduchi de Guerrero, Zapotitlán del Rio, y Zimatlán de Álvarez.

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada que delimitan el acuífero

ACUÍFERO 2004 JAMILTEPEC

VÉRTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	97	0	55.7	16	14	10.7	
2	97	4	2.3	16	12	2.7	
3	97	7	44.9	16	12	46.3	
4	97	10	23.1	16	14	14.4	
5	97	13	0.4	16	14	18.2	
6	97	15	13.5	16	12	32.5	
7	97	26	53.4	16	12	27	
8	97	37	13.6	16	9	47	
9	97	38	30.8	16	5	15.9	
10	97	47	49.9	15	59	29.2	DEL 10 AL 11 POR LA LÍNEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
11	97	54	38.4	16	3	55.8	
12	97	52	24.5	16	7	15	
13	97	52	39.3	16	8	24	
14	97	52	7.6	16	9	21.5	
15	97	52	14.8	16	11	28.8	
16	97	51	27.7	16	16	21.6	
17	97	44	42.1	16	17	23.7	
18	97	40	26.6	16	16	30.3	
19	97	42	26.4	16	24	20.9	
20	97	40	43.3	16	28	46.8	
21	97	40	24.3	16	30	11.1	
22	97	42	33.3	16	32	17.4	
23	97	44	31.5	16	30	54.6	
24	97	51	7.3	16	32	55.1	
25	97	53	25.6	16	43	1.3	
26	97	52	4.1	16	46	59	
27	97	54	14.6	16	49	53.7	
28	97	54	47.2	16	55	45.6	
29	98	1	29.8	17	1	6.1	DEL 29 AL 30 POR EL LÍMITE ESTATAL
30	98	4	28.3	17	3	47.3	
31	98	4	11.6	17	7	29.5	
32	98	2	34.4	17	8	9.8	
33	98	1	0.6	17	10	6.2	
34	98	0	38.1	17	12	23.1	
35	97	56	45	17	13	31.9	
36	97	52	59.7	17	13	31.9	
37	97	50	29.2	17	11	16.8	
38	97	48	27.3	17	6	51	
39	97	45	5.1	17	4	15	
40	97	41	8.9	17	6	27.9	

41	97	36	59.6	17	8	4.6	
42	97	35	52.3	17	13	41.5	
43	97	34	37.6	17	17	22	
44	97	35	54.7	17	20	47	
45	97	35	33.2	17	22	56	
46	97	29	27.3	17	25	4.8	
47	97	26	35.4	17	21	27.5	
48	97	21	0	17	13	52.3	
49	97	14	14.4	17	9	2.2	
50	97	9	29.1	17	5	34.7	
51	97	6	56	17	11	9.5	
52	97	1	4.1	17	8	27.8	
53	96	58	36.7	17	8	13.6	
54	96	57	4.6	17	4	40.3	
54	96	55	32	16	58	19.2	
56	96	52	32.1	16	56	16.8	
57	96	55	1.8	16	56	3.6	
58	96	58	51	16	54	11.5	
59	96	58	56.3	16	50	44.8	
60	96	57	15.9	16	48	52.6	
61	97	0	54.3	16	46	27.7	
62	96	58	40.9	16	43	37.7	
63	97	2	31.2	16	42	7.9	
64	97	0	11.8	16	40	48.8	
65	96	59	41.4	16	39	29.5	
66	96	57	8.2	16	34	22.4	
67	96	52	30.6	16	30	6.1	
68	96	48	14	16	27	42.6	
69	96	49	48.1	16	25	27.6	
70	96	47	29.6	16	23	50.6	
71	96	46	11.8	16	20	33.9	
72	96	43	30.9	16	16	17.9	
73	96	39	36.4	16	14	12.2	
74	96	40	8.9	16	13	0.9	
75	96	37	52.4	16	10	23.5	
76	96	43	37.1	16	11	29.3	
77	96	44	40.7	16	8	17.2	
78	96	49	52.7	16	11	37.9	
79	96	52	23.2	16	11	15.9	
1	97	0	55.7	16	14	10.7	

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.

La porción noreste se encuentra vedada y sujeta a las disposiciones del "*Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona conocida como Valle de Oaxaca, cuya extensión y límites geopolíticos comprenden los ex Distritos de Etla, Centro, Tlacolula, Zimatlán y Ocotlán, Oax*", publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 25 de septiembre de 1967; esta veda es tipo III, en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. Una pequeña área de esta misma región queda incluida en el *"Decreto por el que se declara de interés Público la conservación de los mantos acuíferos de los Municipios de Zaachila, Trinidad de Zaachila y Santa Inés del Monte, Oax., y se establece veda por tiempo indefinido para la extracción, alumbramiento y* aprovechamiento de las aguas del subsuelo en los municipios ya mencionados", publicado en el DOF el 14 de agosto de 1981. 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 Jamiltepec, clave 2004, 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 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 A la fecha no se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En el extremo suroccidental del territorio que cubre el acuífero se localiza parte del Distrito de Riego 110, denominado Río Verde-Progreso. En su porción costera se localiza una pequeña parte del Parque Nacional "Lagunas de Chacahua", decretado el 9 de julio de 1937.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos, algunos de cobertura regional. A continuación, se describen los más importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE JAMILTEPEC, OAXACA, Realizado en 1980 para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos por Rocha y Asociados, S. A. de C.V. (ROASA). El estudio tuvo como objetivos conocer las características geohidrológicas y geoquímicas del acuífero, su condición geohidrológica de explotación y recarga; así como definir la magnitud de la extracción que podría realizarse sin inducir la intrusión marina y proponer áreas favorables para la ubicación de aprovechamientos del agua subterránea. Entre sus actividades más importantes destacan la climatología, fisiografía, geología, nivelación de brocales, geofísica, hidrogeoquímica e hidrología subterránea.

ACTUALIZACIÓN PIEZOMÉTRICA DE LOS ACUÍFEROS DE PINOTEPA NACIONAL, JAMILTEPEC Y CHACAHUA, EN EL ESTADO DE OAXACA. Realizado en 2004 por Tláloc Ingeniería, S.A. de C.V., para la Comisión Nacional del Agua. Los trabajos consistieron en actualizar la posición de los niveles del agua subterránea en la red de medición de los acuíferos y obtener las elevaciones de los brocales o de los puntos de medición; con base en esta información determinar la elevación del nivel estático, elaborar mapas de configuraciones de elevación y profundidad al nivel estático así como de las evoluciones que presentan los niveles del agua, como resultado de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que está sujeto el acuífero.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ACUÍFEROS DEL ESTADO DE OAXACA. Realizado en 2010 para la Comisión Nacional del Agua por la Universidad Autónoma Chapingo. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, 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.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO JAMILTEPEC, 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. Provincia fisiográficas

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964) el área que cubre el acuífero se localiza entre las Provincias Fisiográficas Sierra Madre del Sur y Provincia de Chiapas, en el extremo oriental de la Provincia Fisiográfica Zona Montañosa de Guerrero-Oaxaca, (Manuel Álvarez Jr., 1959). Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI, se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, Subprovincias Cordillera Costera del Sur, Mixteca Alta, Sierras Centrales de Oaxaca y Costas del Sur.

La Provincia Sierra Madre del Sur presenta una estructura compleja, se encuentra constituida por una serie de montañas y sierras que presentan grandes desniveles. Su representación dentro del área estudiada se manifiesta con una serie de prominencias topográficas que adquieren sus mayores elevaciones en la parte meridional, lugar en donde configuran barrancas y hondonadas, así como cimas que alcanzan altitudes mayores a 2,500 msnm. Es una cadena montañosa localizada en el sur de México que se extiende a lo largo de 1200 km desde el sur de Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca. Está orientada de manera paralela a la costa del océano Pacífico y a la porción occidental del Eje Neovolcánico, del que es separada por la Depresión del Balsas. Es la provincia de mayor complejidad geológica, debido a la presencia de rocas sedimentarias, ígneas y la mayor abundancia de rocas metamórficas del país. El choque de las placas tectónicas de Cocos y Norteamericana, provocó el levantamiento de esta sierra y determina en gran parte su complejidad.

La Subprovincia Cordillera Costera del Sur se extiende en sentido noroeste-sureste, desde el sur de la ciudad de Colima hasta el oriente de Pluma Hidalgo, Oaxaca, a lo largo de la zona de subducción de la placa de Cocos a cuyos desplazamientos a través del tiempo debe su origen y evolución. En la porción oaxaqueña dominan rocas metamórficas del Precámbrico, rocas ígneas intrusivas del Mesozoico hacia el norte, noroeste y oeste de Santa Catarina Juquila, así como sedimentarias del Terciario en la zona de Santiago Juxtlahuaca y del Cretácico al norte y este de Putla Villa de Guerrero.

La Subprovincia Mixteca Alta es de geología muy compleja y se extiende en dirección norte-sur a través del estado de Oaxaca, penetrando hasta territorio del estado de Puebla. En su porción central contiene una sierra baja compleja de calizas cretácicas plegadas, al oeste de la cual y casi paralela a ella, se localiza la depresión Villa de Chilapa de Díaz. Las sierras volcánicas más altas se extienden desde el norte en el oriente y poniente, con mesetas y valles pequeños. En el extremo este, en sentido norte-sur aloja al valle de Santo Domingo Yanhuitlán, constituido de materiales arcillosos de origen lacustre del Terciario Inferior, zona muy severamente afectada por procesos erosivos.

La Subprovincia Sierras Centrales de Oaxaca es una región más o menos paralela a la mitad norte de la Subprovincia Sierras Orientales; inicia desde Tehuacán, Puebla, y finaliza hasta la sierra situada al oeste de la ciudad de Oaxaca. Su porción norte, dentro del estado de Puebla, es conocida como sierra de Zapotitlán, donde predominan las rocas calizas del Cretácico, que originan cumbres elevadas a más de 2,000 msnm. En el sur contiene afloramientos de rocas metamórficas, con abundancia de gneis al oeste de la ciudad capital, donde las laderas son escarpadas.

Por su parte, la Subprovincia Costas del Sur comprende la angosta llanura costera del Pacífico, que está orientada más o menos en sentido noroeste-sureste, desde las cercanías de la desembocadura del río Coahuayana, en el límite entre Colima y Michoacán, hasta Salina Cruz, Oaxaca, pasando por el estado de Guerrero. Está conformada por sierras, llanuras y lomeríos; las primeras se localizan a lo largo del límite norte de la subprovincia, se aproximan al litoral cerca de San Pedro Pochutla y Salina Cruz y están constituidas predominantemente por rocas metamórficas precámbricas, aunque en el oriente se encuentran rocas metamórficas y sedimentarias del Cretácico, ígneas intrusivas del Mesozoico e ígneas extrusivas del Terciario. Las llanuras se encuentran a lo largo de la faja costera, cubiertas por suelos del Cuaternario principalmente; y los lomeríos se ubican entre las sierras y las llanuras, y sólo dos de las unidades llegan al litoral, una en Puerto Ángel y otra en Barra de La Cruz.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima predominante en región es cálido subhúmedo con lluvias en verano, el cual comprende toda la zona costera desde el límite con el estado de Guerrero hasta el límite con Chiapas. En este tipo de clima la temperatura media anual es mayor de 22°C y la temperatura del mes más frio mayor de 18°C.

La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm; presenta régimen lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

Conforme se asciende topográficamente hacia el norte, se presenta el clima templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12 y 18°C, temperatura del mes más frio entre -3 y 18°C y temperatura del mes más caliente menor de 22°C. La precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 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 3 estaciones climatológicas que tienen influencia en la superficie de explotación del acuífero, que contienen registros para diferentes periodos: Paso de la Reyna, Campo Agrícola Experimental de Río Grande y Jamiltepec. Con estos datos, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **1,385 mm, 22.9 °C** y **2,380 mm,** respectivamente.

3.3. Hidrografía

El área cubierta por el acuífero se ubica en la Región Hidrológica (RH) RH-20 “Costa Chica de Guerrero”, Subregión Hidrológica “Río Verde”, cuenca del Río Atoyac o Verde, drenada por el río del mismo nombre, que vierte su caudal en el Océano Pacífico.

El Río Verde tiene su origen en la Sierra Madre del Sur a 2,400 msnm, se forma por la integración de los ríos Putla, Tutacuini, Jicaltepec, Cuananá y El Cangrejo; en general tiene dirección norte-sur, y drena un área de 7,990 km^2. Se une por margen derecha al río Atoyac; a partir de esta confluencia toma el nombre de Verde-Atoyac, sigue con dirección al sur en una trayectoria errática que forma meandros de tipo libre hasta su desembocadura en el Océano Pacífico cerca del poblado El Azufre. Los ríos secundarios son los conocidos con los nombres de El Pipe, El Jícaro, La Humedad, Mininyacua, El Tigre, La Soledad, San Francisco, Grande, Mancuernas, Sangala, La Sabana y Cacalotepec.

Existen además arroyos de régimen intermitente, que tienen su origen en la vertiente sur de la Sierra Madre del Sur; siguen un curso más o menos paralelo entre sí, hasta la costa. Como característica, antes de desembocar al mar estos ríos forman lagunas, que representan zonas de inundación a lo largo de todo el litoral.

Estas lagunas se encuentran aisladas del mar por medio de barras, las cuales son rotas por las grandes avenidas de los ríos. Dentro de la superficie del acuífero destaca la presa derivadora Ricardo Flores Magón como la principal obra de infraestructura hidráulica para el aprovechamiento de los escurrimientos superficiales, en beneficio del Distrito de Riego 110, Río Verde-Progreso.

3.4. Geomorfología

La característica geomorfológica predominante en la zona es el contraste del relieve por el cambio abrupto de pendiente entre la región norte, correspondiente a la Sierra Madre del Sur y los valles intermontanos de relieve muy suave, debido a la resistencia a la erosión de las rocas ígneas intrusivas y metamórficas de la sierra, comparadas con los suelos y materiales de relleno que forman la planicie. Contrasta también la etapa geomorfológica de madurez que presentan las sierras que ocupan la mayor superficie del área y que no han alcanzado un nivel base de erosión, con la etapa de juventud avanzada que presentan los valles. En la zona norte el relieve es de montañas complejas posiblemente desarrolladas durante el Mesozoico y posteriormente deformadas y afectadas por cuerpos intrusivos, del Jurásico al Mioceno, constituidas principalmente por gneis, migmatita, granito y granodiorita, disectadas por una intensa red de corrientes que han labrado valles y cañones profundos, y en las que el intemperismo ha originado picachos, bloques semiesféricos de grandes dimensiones y acantilados. La porción sur es un conjunto de lomeríos y cerros formados por una intensa erosión fluvial e intemperismo químico, que actuaron sobre rocas intrusivas y metamórficas del Jurásico-Cretácico, además de una planicie costera originada posiblemente por la subsidencia del terreno debido a la influencia de la Placa de Cocos; está conformada por conglomerados y suelos aluviales y lacustres.

Los valles intermontanos están constituidos por sedimentos aluviales derivados principalmente de las rocas ígneas y metamórficas, erosionados, arrastrados por las corrientes y depositados en las partes bajas. Actualmente los valles, están siendo labrados por corrientes de régimen permanente que descienden de las sierras y desembocan en la línea costera del Océano Pacífico, rellenando las lagunas marginales y los esteros.

El drenaje es de tipo dendrítico, medianamente denso con corrientes consecuentes, longitudinales y rectangulares en el sur y dendrítico paralelo y subparalelo con corrientes consecuentes y tributarios insecuentes en la planicie costera.

4. GEOLOGÍA

La región en la que se ubica el acuífero, al igual que toda la porción sur de México, presenta una geología compleja debido a que en ella confluyen 3 elementos tectónicos amalgamados en diferentes momentos geológicos, que son los Terrenos Tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1983) Xolapa, Oaxaca y Mixteco, relacionados con los complejos metamórficos Xolapa, Oaxaqueño y Acatlán, respectivamente (figura 2).

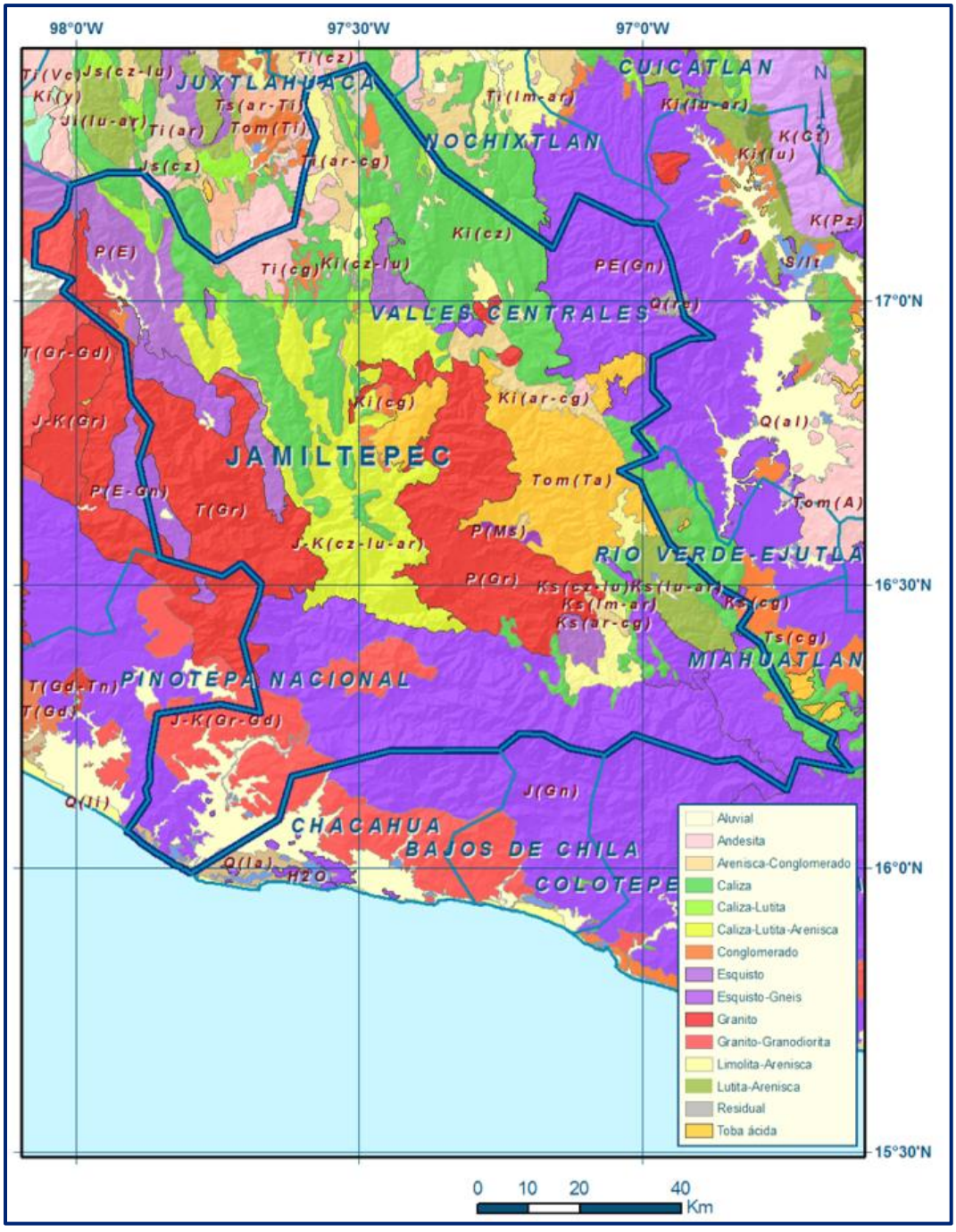


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1. Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en la región comprende un registro cuya edad varía del Precámbrico al Reciente y está conformado por rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y depósitos aluviales. En la región están presentes diferentes terrenos tectonoestratigráficos, que se clasifican de acuerdo con sus basamentos. La cubierta incluye rocas volcánicas y sedimentarias probablemente deformadas durante el Jurásico o el Cretácico, calizas del Cretácico Inferior y conglomerados del Cretácico Inferior-Cretácico Superior, así como rocas volcánicas continentales del Paleógeno y Neógeno.

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.

TERRENO MIXTECO

PALEOZOICO

Aflora en una franja orientada en sentido N-S delimitado al sur por el Terreno Xolapa y al oriente por el Terreno Oaxaca, mediante contactos tectónicos. Tiene como basamento metamórfico al **Complejo Acatlán**. En la cartografía de la zona se consideró al Bloque Juchatenco (sin que se haya comprobado definitivamente), como parte del basamento del Terreno Mixteco y consta de una porción pequeña de rocas metamorfizadas entre los terrenos Xolapa y Oaxaca (Grajales, 1988) que presenta varias unidades; hacia su base comprende diques y troncos de gabro de hornblenda junto con a diques ácidos, le sobreyacen metalavas basálticas almohadilladas y rocas piroclásticas con pizarras y lentes de caliza, y un miembro conformado por esquistos negros, lutitas y cuarcitas e intrusiones de plagiogranitos.

JURASICO

Posteriormente el cuerpo intrusivo de Zaniza de edad Paleozoico, está cubierto discordantemente por el **Grupo Tecocoyunca** (Guzmán, 1950) del Jurásico Medio, conformado por una secuencia rítmica de areniscas, areniscas conglomeráticas, limolitas y lutitas bituminosas fuertemente plegadas y localmente metamorfizadas, al cual sobreyace discordantemente las calizas apizarradas y bituminosas de la **Formación Chimeco** sobreyacida a su vez por calizas negras y lutitas bituminosas de la **Formación Sabinal** (López Ticha, 1970), del Jurásico Superior.

CRETÁCICO

Sobre la secuencia anterior yace concordantemente la **Formación Tlaxiaco** (Varela, 1983) del Cretácico Inferior, constituida por calizas y margas intercaladas con areniscas, limolitas y lutitas, con horizontes arenosos que subyacen a los **Yesos San Juan Teita** (Salas, 1949) de afloramientos muy restringidos, conformados por yesos, calizas y anhidritas del Albiano. Yaciendo sobre esta unidad se encuentra la **Formación Teposcolula** del Albiano-Cenomaniano (Salas, 1949), conformada por biomicritas poco fosilíferas de tipo arrecifal dispuestas en estratos gruesos, con pedernal nodular.

El Cretácico Superior corresponde a la **Formación Tilaltongo** (Salas, 1949), que consiste de margas con intercalaciones de areniscas y limolitas, con abundancia de fósiles. Hacia el oriente esta formación registra un cambio de facies a la **Formación Yucunama** que consta de calizas y lutitas micáceas.

TERRENO OAXACA

PRECÁMBRICO

El Terreno Oaxaca consta de un basamento cristalino conocido como **Complejo Oaxaqueño** (Fries, 1962), conformado por ortogneises cuarzo feldespáticos, paragneises con grafito y mármoles de tipo cipolino, anfibolitas, intrusivos de charnokitas, anortositas, pegmatitas y milonitas, características de una facies de granulita. Existen varias edades isotópicas, aunque variables confirman su edad Proterozoica.

JURÁSICO-CRETÁCICO

Sobreyaciendo al Complejo Oaxaqueño en clara discordancia erosional, se encuentran los lechos rojos de la **Formación Todos Santos** y por una secuencia rítmica de areniscas y lutitas calcáreas con conglomerado basal de edad Jurásico Superior-Cretácico Inferior de la **Formación Sola de Vega.** Cubriendo a las unidades anteriores se encuentra la **Formación Jaltepetongo** del Neocomiano-Aptiano, constituida por una secuencia de tipo flysch de areniscas, lutitas y calizas que subyacen a las calizas de la **Formación Ocotlán**, considerada como un cambio de facies de la **Formación Teposcolula**, la que a su vez es sobreyacida por la **Formación Yucunama**, conformada por calizas margosas y lutitas micáceas con intercalaciones de areniscas. Del Mioceno-Plioceno se presentan pequeños cuerpos intrusivos de composición variable, principalmente granodiorítica y granítica-diorítica.

TERCIARIO

La cubierta terciaria es compartida por los terrenos Oaxaqueño y Mixteco e inicia en el Paleoceno-Eoceno con depósito de potentes espesores de molasa continental constituida en su base por conglomerados polimícticos y calcáreos su cima, intercalados con areniscas y limolitas rojas de la **Formación Tamazulapan** (Ferrusquía, 1976), la que a su vez es sobreyacida por gruesos cuerpos de andesitas y tobas andesíticas hacia el Eoceno-Mioceno, así como diques y sills asociados.

En el Terreno Oaxaqueño, sobre las secuencias andesíticas y coronando las serranías, afloran potentes cuerpos de tobas riolíticas vitrificadas del Plioceno. Del Pleistoceno son los sedimentos lacustres poco consolidados, los conglomerados, areniscas y limolitas, así como otro paquete de conglomerados polimícticos coluviales y aluviales, que rellenan la fosa Miahuatlán. Por último, existen sedimentos recientes en las planicies aluviales y los depósitos costeros. (Carta Geológico-Minera Zaachila E14-12. Escala 1:250,000. SGM, 2000).

4.2. Geología estructural

El Terreno Mixteco y su basamento que es el Complejo Acatlán, en el que se ha comprobado su origen alóctono, no aflora en el área, pero sí su cobertura, denotado por claras estructuras plegadas con ejes N-S casi verticales y abiertos.

Sin embargo, a raíz de los últimos trabajos sobre el Complejo Acatlán y su más antigua cobertura, tomó fuerza la hipótesis de que el Bloque Juchatengo sea parte del Terreno Mixteco, presentando una foliación con orientación NW-SE y metamorfismo de facies de esquistos verdes y se separa basándose en una litología y edad no concordantes con los basamentos adyacentes, ya que presenta edades del Pérmico en rocas correspondientes a piso oceánico o a una secuencia de arco de islas, por lo que se supone alóctono y acrecionado al continente Paleozoico, conformado por el Terreno Mixteco y Oaxaca, durante el Pérmico y antes de la integración del Terreno Xolapa. El Terreno Oaxaca es un alóctono que se ha relacionado a la Provincia de Greenville en Canadá con base en estudios geoquímicos e isotópicos. Está conformado por una gran variedad litológica con foliación general NW-SE con echados variables, que presentan un metamorfismo de facies de granulita, que enmascara su historia anterior (Carta Geológico-Minera Zaachila E14-12. Escala 1:250,000. SGM, 2000).

Estructuralmente el Complejo Oaxaqueño ha sufrido una intensa y continua deformación que impide reconocer las características originales de las rocas, también se caracteriza por desarrollar estructuras planares de foliación penetrativa, así como indicadores cinemáticos, “boudinage” y alargamiento de minerales.

El estilo morfoestructural del Terreno Xolapa representa una de sus principales características tectónicas regionales y está constituida en gran parte por una serie de megaestructuras de cizalla de mecanismo dúctil-frágil. Las rocas del Complejo Xolapa, comprenden diferentes episodios de deformación que se manifiestan por la presencia de foliación penetrativa con rumbos E-W y con echados al sur, pliegues intrafoliales, isoclinales, disarmónicos, zonas anastomosadas, boudinage, bandeamiento, lineaciones y otros indicadores cinemáticos que definen la dirección del movimiento.

Regionalmente la estructura de mayor importancia es la falla Chacalapa que representa uno de los contactos más interesantes entre los terrenos cristalinos del sur de México, es el contacto entre los terrenos Oaxaca y Xolapa. En la falla, las rocas de los complejos Oaxaqueño y Xolapa se confunden en un solo cinturón milonítico que tiene un espesor variable, que varía de cientos de metros a varios kilómetros. La

falla Chacalapa es una estructura anastomosada desarrollada en el régimen dúctil que has sido reactivada en régimen dúctil-frágil. Las fallas Pochutla y Figueroa son muy semejantes en sus características a la Chacalapa, por lo que se consideran del mismo sistema, así como las fallas Mixtepec y Limones, en las que se proponen reactivaciones bajo el régimen frágil.

Actualmente la margen pacífica es una zona sísmica activa donde además de registrarse epicentros y focos sísmicos coincidentes con los límites tectónicos, también se ha documentado la presencia de movimientos de bloques, evidenciado por el desplazamiento de fallas normales, inversas y laterales.

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 del río Verde y arroyos tributarios, así como depósitos lacustres y conglomerados que conforman la planicie costera. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varias 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. Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas 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 a que están sobreyacidas por lutitas y limolitas.

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 del río Verde y arroyos tributarios, así como depósitos 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 **semiconfinamiento o confinamiento**, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 5 pruebas de bombeo de corta duración tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se obtuvieron valores de transmisividad que varían entre **8.5 x 10^{-3}** y **6.1 x10^{-2} m^2/s (734 a 5270 m^2/d)**.

La conductividad hidráulica varía de **5.1 x10^{-4}** a**5.8 x10^{-3} m/s (44 a 501 m/d)**. Los valores más altos de estos parámetros 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. Solo una prueba contó con pozo de observación y se obtuvo en rendimiento específico Sy de 0.02.

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 2010 además de registros históricos durante el periodo 2003-2019, 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 2011-2019 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 2019.

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 algunos centímetros que se registran en la zona costera y en la parte baja del Río Verde, cerca de su desembocadura, hasta 9 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan el valle, conforme se asciende topográficamente.

Los niveles estáticos más someros, menores de 2 m, se registran en la porción costera y a lo largo del cauce del Río Verde, desde San José del Progreso hasta su desembocadura al mar; en tanto que las mayores profundidades, de 5 a 9 m, se presentan en las porciones norte y noreste del acuífero, hacia las poblaciones La Huichicata, La Humedad, El Guayabo; y hacia San José del Progreso y La Cañada, respectivamente (figura 3).

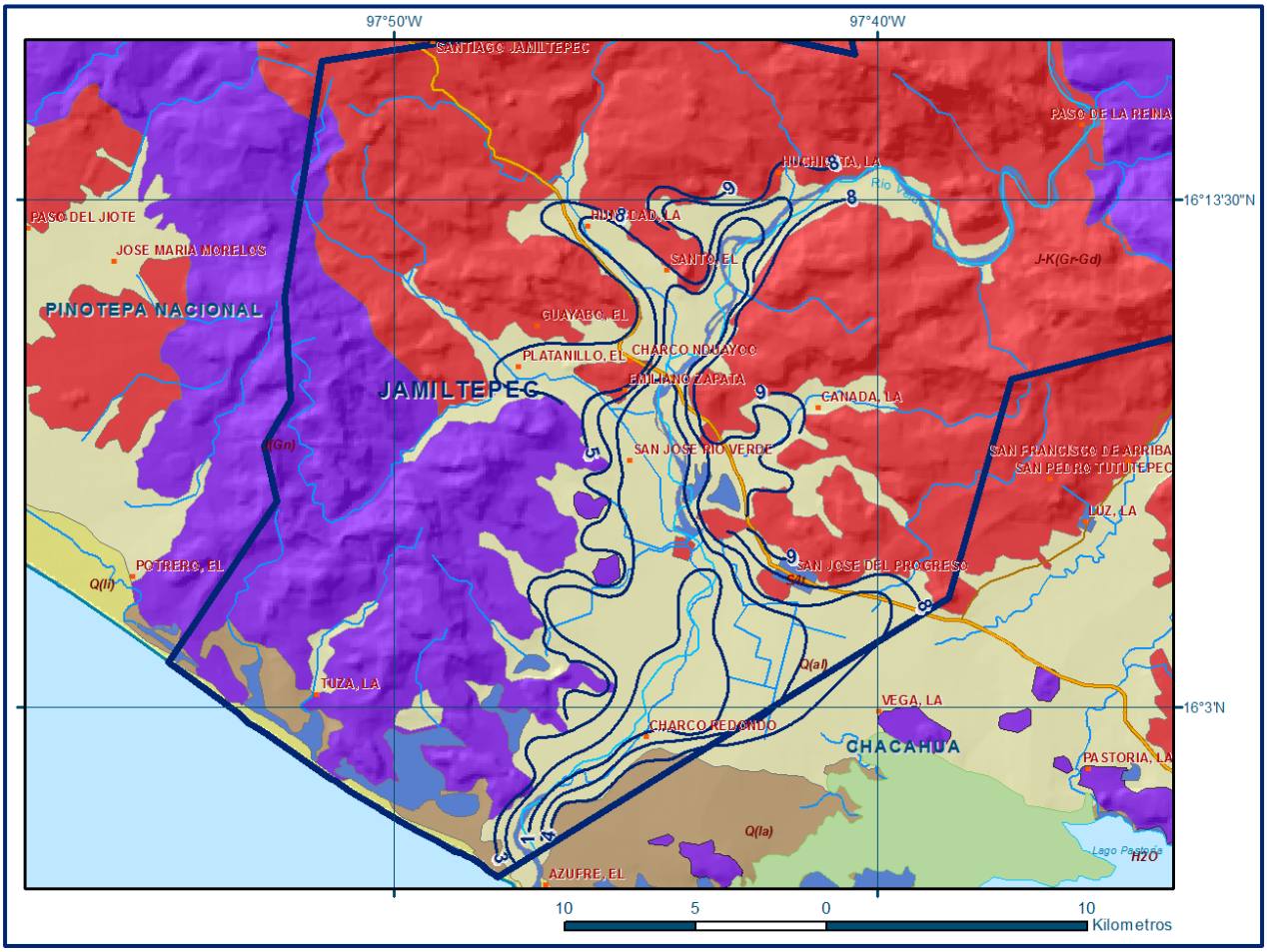


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2019)

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 2 a 55 msnm, que se incrementan de la zona costera y del cauce del Río Verde, en dirección a los flancos de las sierras que delimitan el acuífero. Los valores más altos, 40 a 55 msnm, se registran en el extremo norte del acuífero, entre los poblados El Santo, La Humedad y La Huichicata, desde donde descienden gradualmente hacia el sur por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, a lo largo del cauce del río, hacia la zona costera.

Los valores más bajos, de 2 a 5 msnm, se presentan en la zona costera de la desembocadura del Río Verde, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo norte-sur, con alimentaciones provenientes de los flancos occidental y nororiental, paralela a la dirección del escurrimiento superficial (figura 4).

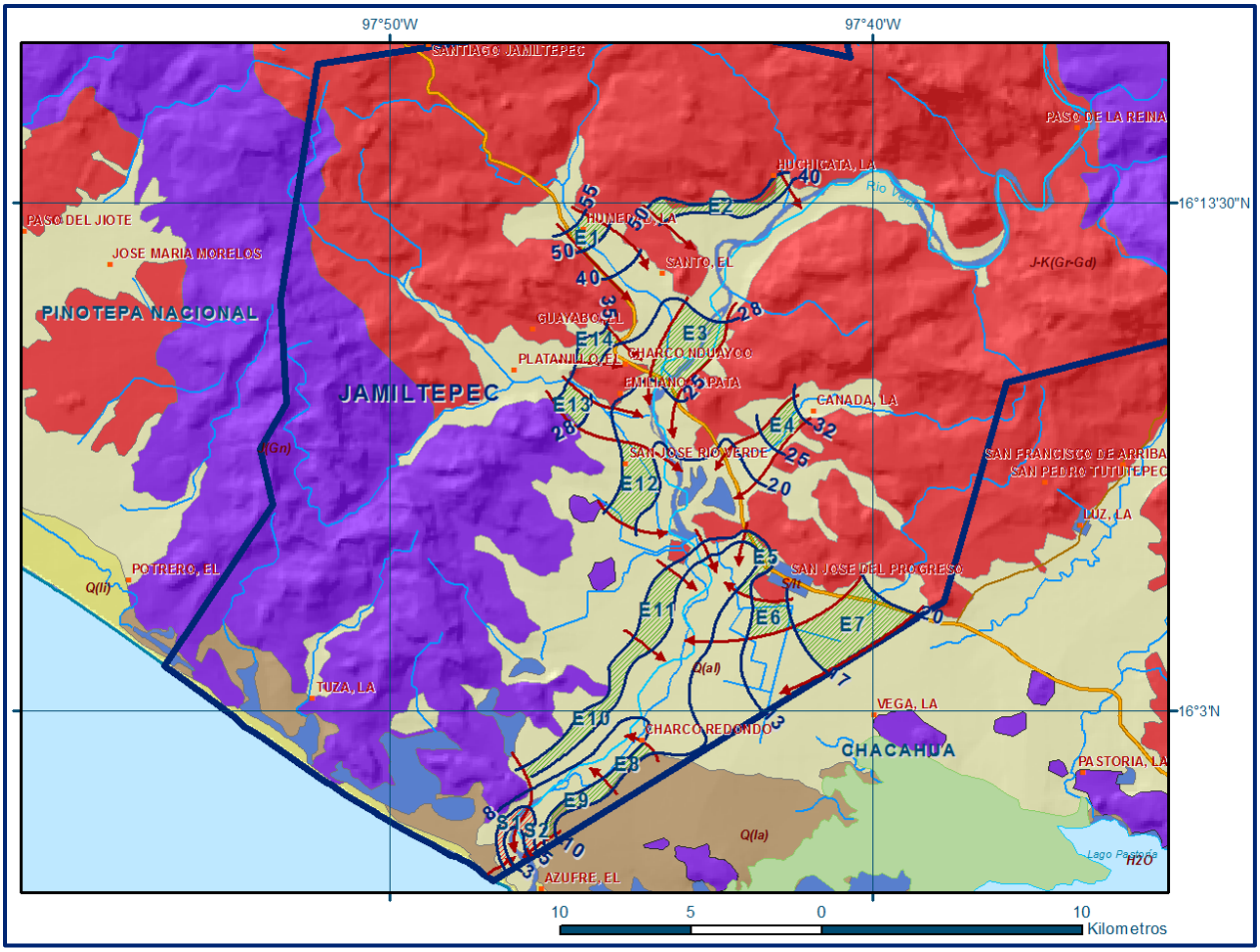


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2019 registró valores tanto de recuperación como de abatimiento. Los primeros son de tan solo 0.5 m, es decir de 0.07 m anuales, y se registran en la porción occidental del valle, entre la zona aleñada al cauce del río Verde y los poblados Charco Redondo y San José del Progreso. Los abatimientos varían de 0.5 a 2.0 m, que representan 0.07 a 0.25 m anuales, y se presentan en la zona central del valle en ambas márgenes del Río Verde y arroyos tributarios, entre los poblados La Huichicata, La Humedad, El Santo, San José Río Verde y la zona occidental del San José del Progreso. Abatimientos puntuales de hasta 6 m, que representa 0.75 m anuales, se presentaron en las inmediaciones del poblado La Cañada.

En la mayor parte de la zona de explotación los niveles del agua subterránea no presentan variaciones importantes en su posición (figura 5).

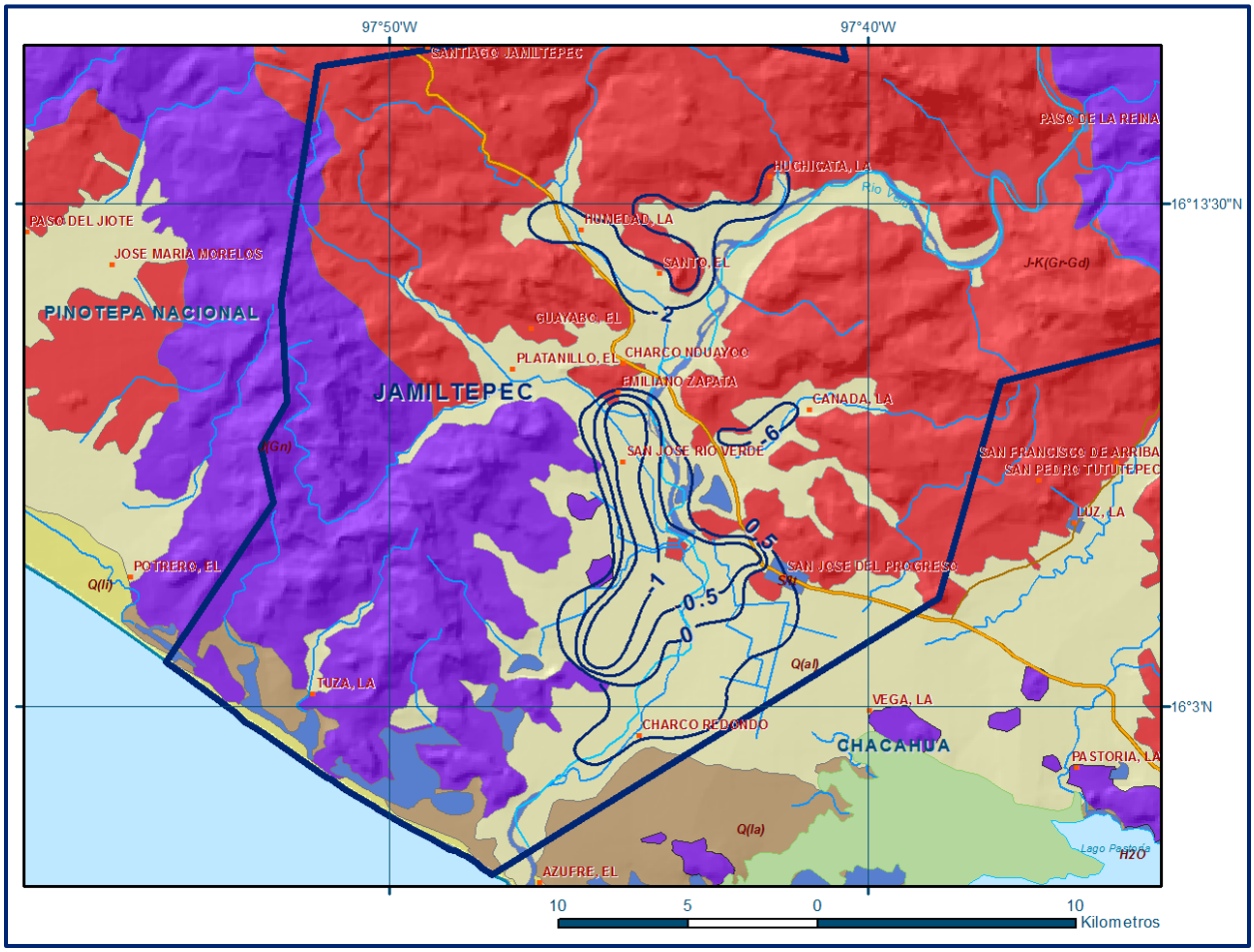


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (2011-2019)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en 2010, se tomaron 18 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) y análisis bacteriológicos.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece 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. La concentración de SDT presenta valores que varían de 100 a 975 mg/l, que no sobrepasan el límite máximo permisible (LMP) de 1000 mg/l establecido en la norma referida.

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 Asociation (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 170 a 1,980 □S/cm. La temperatura del agua medida directamente a la salida de las obras de captación varía entre 28.9° C y 32° C. El pH varía entre 6.6 y 7.9. Algunas muestras presentaron concentraciones altas de carbonatos, de 230 a 622 mg/l, que superan el límite máximo permisible establecido en la norma mexicana.

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 ha 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 clasifica como de salinidad baja (C1) y contenido medio (S2) a alto (S3) de sodio intercambiable, lo que indica que solo es apropiada para su uso en riego con algunas restricciones, como cultivos moderadamente tolerantes a la salinidad, suelos permeables o requerir lavados periódicos.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos realizado como parte del estudio llevado a cabo en 2010, complementada con información del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de 2022, se registró la existencia de 307

aprovechamientos, de los cuales 73 son norias y 234 pozos. De ellos, 304 están activos y 3 están abandonados.

El volumen de extracción conjunto estimado es de **8.1 hm³anuales**, de los cuales 7.8 hm^3 (96.3%) se utilizan para las actividades agrícolas, 0.05 hm^3 (0.6%) para uso doméstico, 0.2 hm^3 (2.5%) para satisfacer las necesidades del uso público-urbano, y los 0.05 restantes (0.6%) para usos múltiples.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La superficie del acuífero es muy extensa pero sólo en la cuenca baja del Río Verde se aprovecha el agua subterránea. El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2011-2019, en un área de balance de **196 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con 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:

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:

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). Debido a que el volumen de agua subterránea para uso púbico-urbano es pequeño, sólo se considera la recarga incidental debida a los retornos del riego agrícola.

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 (ΔVS) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical
Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
Ri: Recarga Incidental
B: Bombeo
Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
Dfb: Descarga por flujo base
ETR: Evapotranspiración
ΔV(S): Cambio en el volumen almacenado

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

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

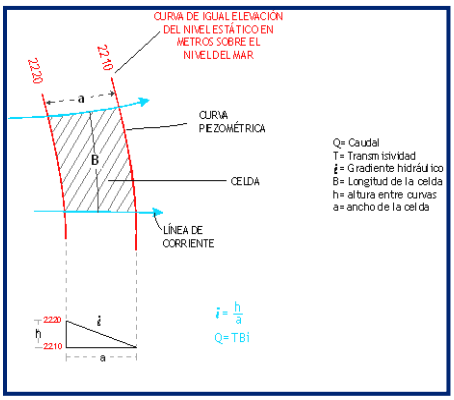
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

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 4. 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 **16.7 hm^3/año**.

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

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	T (m^2/s)	CAUDAL Q (m^3/s)	VOLUMEN (hm^3/año)
E1	1190	1050	5	0.006	0.0340	1.1
E2	5200	790	10	0.001	0.0658	2.1
E3	1850	3200	28	0.006	0.0971	3.1
E4	1000	1620	7	0.006	0.0259	0.8
E5	2900	550	3	0.002	0.0316	1.0
E6	1250	1500	4	0.005	0.0167	0.5
E7	2050	3500	3	0.005	0.0088	0.3
E8	2100	450	2	0.001	0.0093	0.3
E9	3250	650	2	0.001	0.0100	0.3
E10	6850	710	3	0.003	0.0868	2.7
E11	3000	1200	3	0.004	0.0300	0.9
E12	3160	1350	5	0.004	0.0468	1.5
E13	1100	1170	7	0.005	0.0329	1.0
E14	1550	940	7	0.003	0.0346	1.1
					TOTAL	**16.7**

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.

7.1.3. Recarga incidental (Ri)

Aún en sistemas de riego eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como

retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40 % del volumen usado en la irrigación.

Debido a la falta de información de láminas de riego por cultivo, se considera que el 30% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en las zonas agrícolas y la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo. De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 7.8 hm^3, al aplicar el 30% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 2.3 hm^3. Por tanto, **Ri = 2.3 hm^3 anuales**.

7.2. Salidas

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

7.2.1. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 4, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **2.0 hm^3/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	2220	650	2	0.0031	0.006	0.0410	1.3
S2	1300	690	2	0.0029	0.006	0.0226	0.7
						TOTAL	2.0

7.2.2. 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.

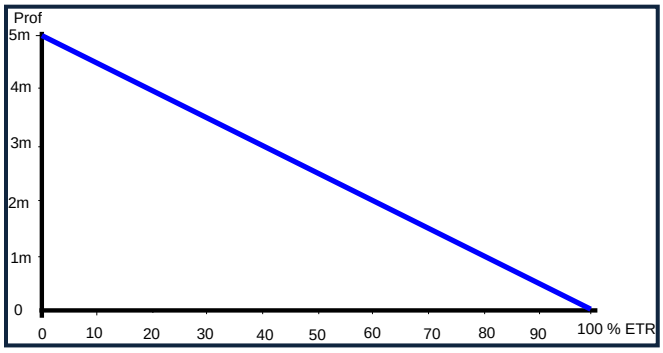
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 22.9 °C y 1,385 mm. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 1,036.9 mm anuales, como se muestra a continuación:

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

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

T (°C) =	22.9		
P(mm) =	1385	P^2 =	1918225
L =	1472.94945	L^2 =	2169580.08
ETR (mm)	1036.9		

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 =64.3 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)
1	1.0	19.0	1.0369	0.8	15.8
3 a 5	4.0	10.8	1.0369	0.2	2.2
1 a 3	2.0	52.8	1.0369	0.6	32.8
3 a 4	3.5	43.4	1.0369	0.3	13.5
	Total	**126.0**			**64.3**

7.2.3. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo calculado es de **8.1 hm³/año.**

7.2.4. Descarga por flujo base de ríos (Dfb)

De acuerdo con la información proporcionada por el Organismo de Cuenca Pacífico Sur, el Río Verde presentó un caudal estimado de 0.492 m^3/s de flujo base, en el estiaje del periodo 1975-2015, que representan un volumen de 15.5 hm^3 anuales. Por lo tanto, **Dfb = 15.5 hm³ anuales.**

7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2019 que se muestra en la figura 5. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy = 0.05 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 -3.5 hm^3**,** es decir, un promedio anual de **-0.4hm^3.**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2011-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
-6	-6	2.1	0.05	-0.6
-2	-2	17.0	0.05	-1.7
-1	-1	11.6	0.05	-0.6
-0.5 a -1	-0.75	17.6	0.05	-0.7
0 a -0.5	-0.25	16.6	0.05	-0.2
0.5 a 0	0.25	23.3	0.05	0.3
	TOTAL	**88.1**	**TOTAL**	**-3.5**
		Promedio anual		**-0.4**

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:

$$Rv = Sh + B + ETR + Dfb - Eh - Ri \pm \Delta V(S)$$
$$Rv = 2.0 + 8.1 + 64.3 + 15.5 - 16.7 - 2.3 - 0.4$$
$$Rv = 70.5\ hm^3/año$$

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

$$R = Rv + Eh + Ri$$
$$R = 70.5 + 16.7 + 2.3$$
$$R = 89.5\ hm^3 anuales$$

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:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA DEL SUBSUELO EN UN ACUÍFERO	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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 **89.5 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 Jamiltepec, su valor es **49.7 hm³ anuales**, de los cuales 2.0 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia la zona costera, 15.5 hm³ al flujo base del Río Verde, y 32.2 hm³ al 50% del volumen de evapotranspiración para protección de los ecosistemas costeros y ribereño del Río Verde. Por lo tanto, **DNC= 49.7 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 **48’454,666 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.

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 89.5 – 49.7 – 48.454666
DMA = – 8.654666 hm³ anuales

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones, por el contrario, su déficit es de **8’654,666 m³.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2004. Actualización piezométrica de los acuíferos de Pinotepa Nacional, Jamiltepec y Chacahua, en el estado de Oaxaca. Realizado por Tláloc Ingeniería, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2010. Estudio para determinar la disponibilidad de aguas subterráneas en acuíferos del estado de Oaxaca, acuífero Jamiltepec. Realizado por la Universidad Autónoma Chapingo.

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

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1980. Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Jamiltepec, Oaxaca. Realizado por Rocha y Asociados, S. A. de C.V. (ROASA).

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológica-Minera E14-12“Zaachila”. Escala. 1:250.000.