CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Subdirección General Técnica

Gerencia de Aguas Subterráneas

Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Palmillas Jaumave (2810), estado de Tamaulipas

Ciudad de México, 2024

Contenido

1 GERERALIDADES 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 Provincia fisiográfica 6
3.2 Clima 7
3.3 Hidrografía 8
3.4 Geomorfología 8
4 GEOLOGÍA 9
4.1 Estratigrafía 10
4.2 Geología estructural 19
4.3 Geología del subsuelo 20
5 HIDROGEOLOGÍA 21
5.1 Tipo de acuífero 21
5.2 Parámetros hidráulicos 21
5.3 Piezometría 22
5.4 Comportamiento hidráulico 22
5.4.1 Profundidad al nivel estático 22
5.4.2 Elevación del nivel estático 25
5.4.3 Evolución del nivel estático 27
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 29
6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 30
7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 30
7.1 Entradas 30
7.1.1 Recarga vertical (Rv) 31
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 32
7.2 Salidas 33
7.2.1 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 33
7.2.2 Evapotranspiración (ETR) 33
7.2.3 Bombeo (B) 35
7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb) 35
7.2.5 Descarga de manantiales (Dm) 36
7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S) 36
8 DISPONIBILIDAD 38
8.1 Recarga total media anual (R) 38
8.2 Descarga natural comprometida (DNC) 38
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 39
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 39
9 BIBLIOGRAFÍA 40

1 GERERALIDADES

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 Palmillas-Jaumave, definido con la clave 2810 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-oeste del estado de Tamaulipas, entre los paralelos 23° 0' y 24° 6' de latitud norte y los meridianos 99° 04' y 99° 53' de longitud oeste; abarcando una superficie de 4,471 km^2 (figura 1).

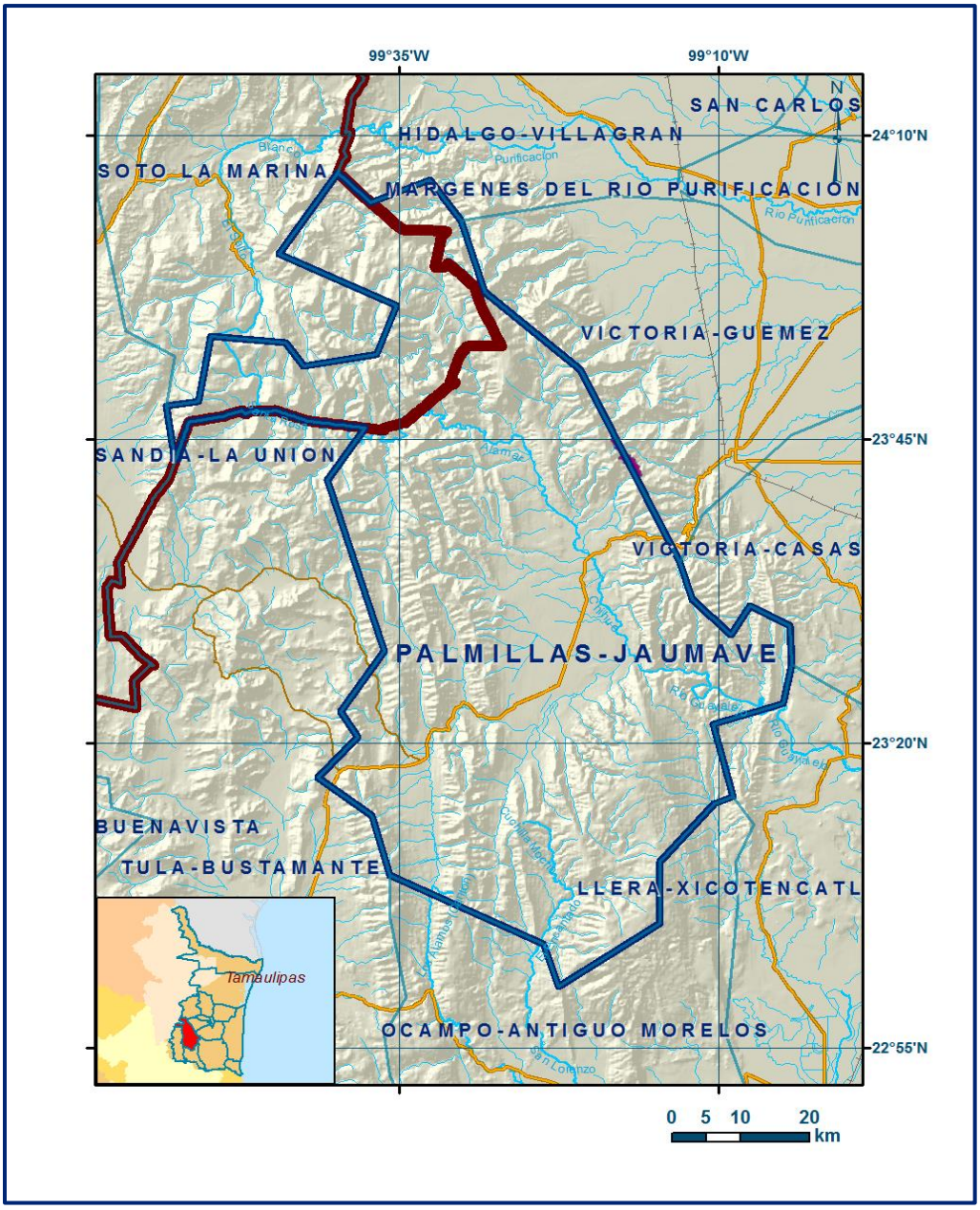


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente, el acuífero está comprendido casi en su totalidad en los municipios Palmillas y Jaumave; pequeñas porciones pertenecen a los municipios Güemez, Hidalgo, Victoria, Llera, Gómez Farías, Ocampo, Tula, Bustamante y Miquihuana. Otras áreas pequeñas del extremo norte del acuífero se ubican en los municipios General Zaragoza y Aramberri del Estado de Nuevo León. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2810 PALMILLAS-JAUMAVE							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	39	51.7	24	6	53.3	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE ESTATAL
2	99	37	14.3	24	4	26.1	
3	99	32	39.5	24	6	16.9	
4	99	30	12.4	24	2	58.5	
5	99	28	20.6	23	57	3.4	
6	99	20	49.5	23	50	42.4	
7	99	13	0.9	23	34	53.5	
8	99	12	2.2	23	31	50.0	
9	99	8	59.9	23	28	54.0	
10	99	7	32.0	23	31	15.4	
11	99	4	26.6	23	29	41.1	
12	99	4	14.3	23	26	29.3	
13	99	4	54.8	23	23	13.7	
14	99	10	25.1	23	21	33.8	
15	99	8	53.9	23	15	37.9	
16	99	10	21.4	23	15	0.5	
17	99	14	35.9	23	10	14.3	
18	99	14	34.2	23	5	11.4	
19	99	22	32.3	23	0	0.7	
20	99	23	44.7	23	3	31.1	
21	99	35	45.4	23	9	6.6	
22	99	37	11.8	23	14	4.5	
23	99	41	27.4	23	17	12.0	
24	99	38	19.8	23	20	28.7	
25	99	39	37.1	23	22	35.6	
26	99	36	14.8	23	27	33.5	
27	99	40	39.6	23	41	37.4	
28	99	37	45.1	23	45	54.5	DEL 28 AL 29 POR EL LIMITE ESTATAL
29	99	52	37.4	23	43	14.1	
30	99	53	20.9	23	47	43.7	
31	99	50	49.8	23	48	5.1	
32	99	49	51.0	23	53	25.9	
33	99	43	55.8	23	52	54.1	
34	99	42	35.0	23	50	59.0	
35	99	36	47.2	23	51	57.8	
36	99	35	14.2	23	55	56.8	
37	99	44	26.9	24	0	11.9	
1	99	39	51.7	24	6	53.3	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Palmillas-Jaumave pertenece al Organismo de Cuenca IX "Golfo Norte". El acuífero se encuentra totalmente vedado. La mayor parte de su territorio se encuentra sujeta a las disposiciones del *"Decreto que establece el Distrito de Riego Llera, Tam., y declara de utilidad pública la construcción de las obras que lo formen y la adquisición de los terrenos necesarios para alojarlas y operarlas"*, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 21 de febrero de 1955. Una porción pequeña al norte y al este del territorio del acuífero se encuentran sujetas a las disposiciones del *"Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende los Municipios de Madero, Villagrán, San Carlos y otros del estado de Tamaulipas"*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 10 de febrero de 1964. Ambos decretos de veda se clasifican como tipo III, la cual permite extracciones limitadas para usos doméstico, industrial, de riego y otros. En su porción norte se ubica parte de la Reserva de la Biosfera "El Cielo".

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el Público Urbano.

En su territorio no se localiza Distrito o Unidad de Riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca de los Ríos San Fernando–Soto la Marina, instalado el 26 de agosto de 1999.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero Palmillas-Jaumave sólo se han se han realizado dos estudios hidrogeológicos de evaluación que se describen a continuación:

ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LOS ACUÍFEROS DENOMINADOS: PALMILLAS-JAUMAVE Y OCAMPO-ANTIGUO MORELOS, EN EL ESTADO DE TAMAULIPAS, elaborado por la Empresa NR MAQUINARIA, S. A. DE C. V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2008. El objetivo de este estudio fue realizar un recorrido piezométrico y nivelar los brocales de una red de pozos piloto que se definió para el monitoreo de los niveles del agua subterránea, con la información obtenida fue posible elaborar las configuraciones del nivel estático. Incluyo actividades de campo como piezometría, nivelación de brocales y toma de muestras de agua para su análisis químico correspondiente.

Entre sus conclusiones más importantes destacan que los valores de profundidad al nivel estático varían de 10 a 40 m, con los valores más profundos registrados en el extremo norte; se definió una piezométrica y se registró la existencia de 83 aprovechamientos (58 pozos, 15 norias, y 10 manantiales). Los valores de conductividad eléctrica variaron entre 500 y 2300 ⌠S/cm.

ESTUDIOS PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE LOS ACUÍFEROS: PALMILLAS-JAUMAVE, OCAMPO-ANTIGUO MORELOS Y SAN CARLOS EN EL ESTADO DE TAMAULIPAS, elaborado por la empresa Sanx Ingeniería Integral y Desarrollo S. A. de C. V., para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de las condiciones geohidrológicas de los acuíferos mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para contar con información necesaria que permita 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 y reconocimientos geológicos, fue posible platear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo con la clasificación de Provincias Fisiográficas de Erwin Raisz (1964) y de INEGI (1997), la superficie cubierta por el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica V Sierra Madre Oriental, Subprovincias Gran Sierra Plegada y Sierras y Llanuras Occidentales. La mayor parte del acuífero se encuentra en la subprovincia La Gran Sierra Plegada. La Sierra Madre Oriental, corre en sentido paralelo a la Costa del Golfo de México desde la frontera norte del país hasta sus límites con el Eje Neovolcánico. A la altura de Monterrey, N. L. una de sus ramas tuerce abruptamente al oeste para extenderse hasta la Sierra Madre Occidental; la otra continúa hacia el norte para terminar en la región de Big Bend, Texas.

Está integrada principalmente por sedimentos calcáreos del Cretácico y Jurásico (principalmente calizas, lutitas y areniscas) que se encuentran plegados, formando valles estructurales (Manuel Álvarez Jr.) en los sinclinales y serranías en los anticlinales cuando las formaciones son resistentes a la erosión, pero cuando estos últimos dejan al descubierto un núcleo constituido por rocas menos resistentes, entonces se forman valles en su centro. Debido a la intensidad de los plegamientos, la topografía es sumamente accidentada, ofreciendo perfiles típicamente aserrados

La Subprovincia Gran Sierra Plegada presenta sistemas de topoformas que se designan como sierra pliegue y sierra compleja, pero también se encuentran bajadas, lomeríos, mesetas, llanuras y valles. En esta subprovincia existe gran diversidad de vegetación, que depende en gran medida de las variaciones climáticas que imperan en esta sierra.La Subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales se localiza al oeste de la Gran Sierra Plegada y en ella predominan las sierras constituidas principalmente por calizas orientadas en sentido norte-sur, y enlazadas entre sí por brazos cerriles que siguen ese mismo sentido o de forma oblicua.

Los sistemas de topoformas que se encuentran en la porción tamaulipeca de esta subprovincia son: en el norte, las sierras complejas, y las bajadas -aunque hay pequeñas llanuras y valles-; en el sur, las llanuras de diferentes tipos.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García para nuestro país, se determina que en la región prevalece grupo de clima templado subhúmedo (CW) y semicálido subhúmedo (ACW). De acuerdo a la elevación topográfica de la zona, se presentan variantes en franjas paralelas orientadas en sentido norte sur.

En las partes topográficamente más bajas es clima es de tipo BS1hw semiárido, semicálido, temperatura media anual mayor de 18° C, temperatura del mes más frio menor de18° C, temperatura del mes más cálido mayor de 22° C. En la porción norte y sur es de tipo C(w1) templado subhúmedo, 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, precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, lluvias en verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual, y C(w2) templado subhúmedo con temperatura media anual entre 12 y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18° C y temperatura del mes más cálido menor de 22° C, precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, lluvias en verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 y 10% del total anual.

En la porción centro-este y oeste es de tipo (A)C(wo), semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18° C, temperatura del mes más frio menor de 18° C, temperatura del mes más cálido mayor de 22° C.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 2 estaciones que tienen influencia en el área del acuífero: Jaumave y Palmillas, cuyo registro comprende los periodos 1961-2007 y 1998-2008, respectivamente.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual de **292.8 mm y 20° C**, respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor promedio anual de **1332 mm**.

3.3 Hidrografía

El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica 26 "Río Pánuco" dentro de las Cuencas Rio Tamesí y Rio Soto la Marina, subcuencas Santiaguillo-Chihue y Dulces Nombre.

La cuenca hidrológica del Río Tamesí tiene una superficie de 15,256.5 km^2 y se encuentra delimitada al norte por la cuenca hidrológica del Río Soto-La Marina, al este por la cuenca hidrológica Laguna de San Andrés-Laguna Morales, al sur por las cuencas Río Tamuín y Río Panuco en el estado de Veracruz, al oeste con la cuenca Sierra Madre.

Sus principales afluentes son los ríos Pánuco, Tamesí, Guayalejo, Chihue, Comandante, Jaumave, Cojo y San Vicente; los arroyos más importantes son los denominados Las Ánimas y Las Maravillas.

Las principales corrientes se originan en el estado de Tamaulipas y son los afluentes más importantes del Río Pánuco. Gran parte de su recorrido lo realizan con el nombre de Río Guayalejo, drenado con un rumbo dominante noroeste-sureste.

El Río Guayalejo nace al norte de Miquihuana a una elevación de 3,400 msnm, en esta zona se le conoce como río Alamar; sin embargo, al recibir las aguas del arroyo Maravillas cambia su nombre por el Río Chihue, hasta llegar a la confluencia del Río Jaumave, donde ya se le denomina como Río Guayalejo.

El valle es atravesado por el rio Guayalejo, el cual procede del norte y circula sobre el flanco este del valle; a la altura de Jaumave cambia de dirección hacia el este y cruza la sierra, llegando a la planicie del costera a la altura de Llera, para después continuar su recorrido hasta su desembocadura en el Golfo de México. En la zona no existen estaciones hidrométricas ni tampoco infraestructura hidráulica para el almacenamiento y control de las corrientes superficiales. La red de drenaje presenta un patrón dendrítico.

3.4 Geomorfología

De acuerdo a los rasgos geomorfológicos presentes en el acuífero se identifican los valles de Palmillas y Jaumave, las sierras calcáreas pertenecientes a la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo de México en el extremo oriental.

El Valle de Jaumave se encuentra localizado a 40 km al suroeste de Ciudad Victoria y está separado de ella por una gran sierra. Corresponde a un valle intermontano de forma alargada, cuyo eje mayor tiene una dirección norte – sur, paralela a la de las elevaciones que forman la Sierra Madre Oriental.

Se encuentra limitado por espectaculares elevaciones que forman parte de la Sierra Madre Oriental, las cuales están constituidas por rocas calcáreas.

En la porción oriental, las calizas pertenecen a la formación El Abra, la cual se caracteriza por presentar un gran fracturamiento que permite la formación de acuíferos. La sierra que limita al valle en el extremo occidental, corresponde a areniscas calcáreas de la formación Cárdenas, la cual presenta baja permeabilidad.

El valle puede dividirse en dos porciones. La región norte se caracteriza por la presencia de lomeríos labrados por el Rio Guayalejo, constituidos por los depósitos de baja permeabilidad representados por las lutitas de la Formación Méndez y conglomerados de la Formación Reynosa.

La porción sur corresponde a una extensa zona plana con ligera pendiente hacia el este y oeste, constituida por materiales granulares areno – arcillosos, de permeabilidad media, cuyo espesor es menor de 50 m.

4 GEOLOGÍA

La geología regional de la zona está representada por rocas sedimentarias marinas y continentales así como ígneas intrusivas y extrusivas, cuyo registro estratigráfico comprende edades que varían del Precámbrico al Reciente. Este máximo intervalo de tiempo es posible debido a la existencia de una ventana geológica que pone al descubierto rocas precámbricas. La distribución de las diferentes unidades litológica se presenta en la figura 2.

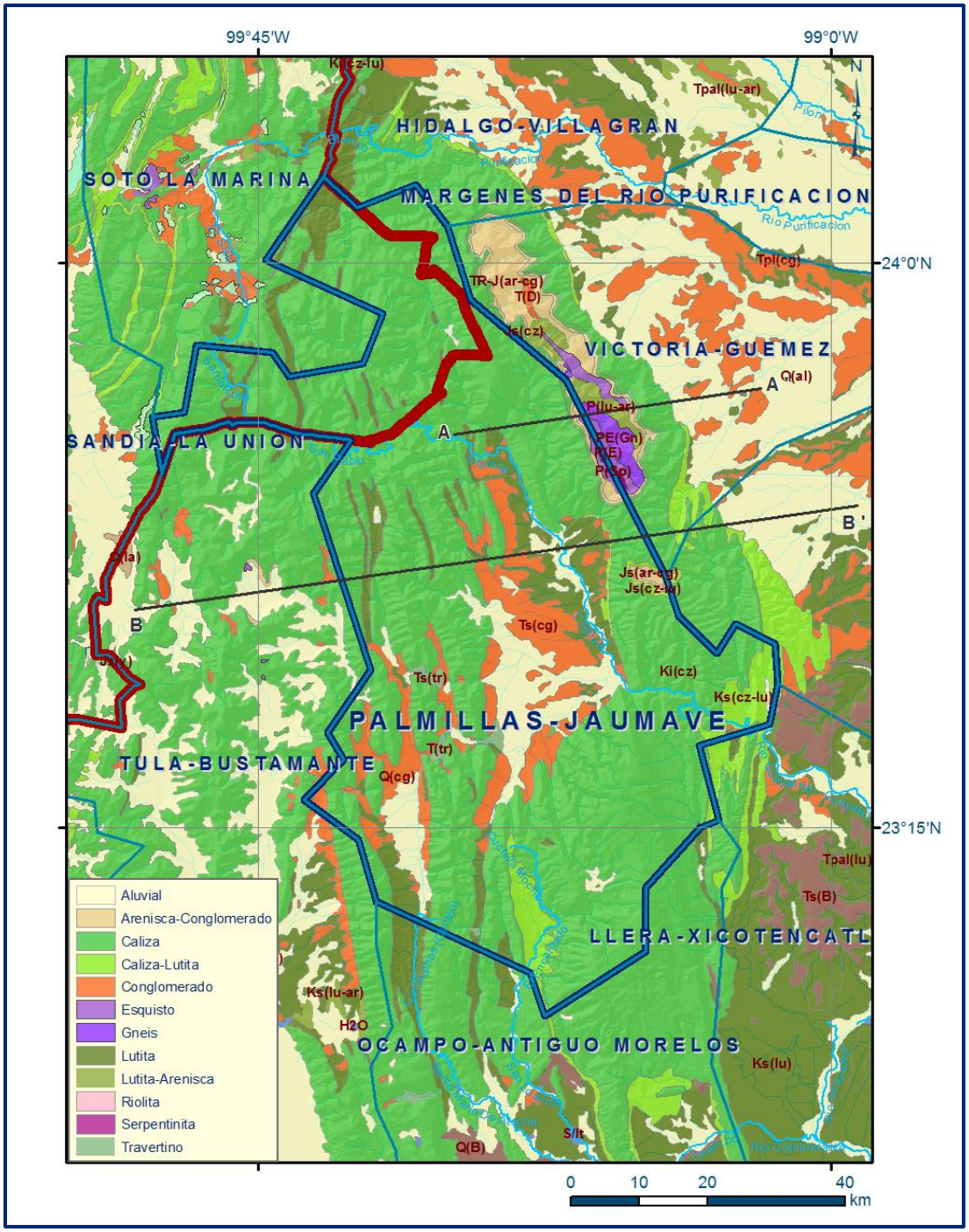


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

Los materiales más antiguos corresponden a rocas metamórficas del Precámbrico, las cuales se encuentran intrusionadas. Sobre ellas se presenta la Formación Huizachal de Triásico, cubierta a su vez por las formaciones La Joya, Zuloaga, Olvido y La Casita del Jurásico Superior; Tamaulipas Inferior, Otates, Tamaulipas Superior,

El Abra, Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe, Cárdenas y Méndez de Cretácico. Coronan la secuencia estratigráfica la Formación Reynosa del Paleógeno-Neógeno, así como rocas ígneas extrusivas y aluviones del Cuaternario. Por otra parte, afloran rocas ígneas intrusivas las cuales no se incluyeron dentro de la columna estratigráfica con una edad definida.

A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas, de la más antigua a la más reciente:

Rocas metamórficas precámbricas

En el Cañón del Novillo, ubicado en la porción noreste del acuífero, afloran rocas metamórficas que han sido ampliamente estudiados por varios autores. El Ing. E. López Ramos (1980), describe dos unidades metamórficas al oeste de Ciudad Victoria, las cuales corresponden al Gneiss Novillo (Precámbrico) y los Esquistos Granjero; estos últimos son ubicados en la columna estratigráfica como precámbrica y sobre ellos al Gneiss Novillo.

Rocas ígneas Intrusivas Pre-jurásicas

Estas son realmente escasas, sin embargo se mapearon algunas pequeñas intrusiones al suroeste y oeste de Ciudad Victoria, afloran en forma de diques de diferente composición:

Diabasa (Doleita)

Se localiza entre el Cañón del Novillo y en el Cañón de La Boca, intrusionando a las capas rojas triásicas. Subyace discordantemente a los hechos rojos del Triásico Superior.

Granito

Aflora cerca del Cañón de Caballeros. En este sitio parece que el granito intrusiona a los gneises. En los Cañones del Novillo y Peregrina, Heim (1926) observó granitos con bajo grado de metamorfismo. Es de color claro, ligeramente verdoso, con poco cuarzo y mica, y escaso zircón.

Traquitas

Varios diques de traquitas que cortan a lechos rojos triásicos, fueron observados en el Cañón de Guayabas y en el Cañón de Novillo (Carrillo, 1960).

Granodiorita

Aflora en el Cañón del Rosario, subyaciendo en discordancia a capas de la Formación Huizachal, aparentemente intrusionando a rocas pre-jurásicas.

Formación Huizachal

Esta formación fue propuesta por Seemes en 1921 y publicada por Imlay en 1948; consiste en una secuencia de hasta 2,000 m de espesor de lutitas, lutitas arenosas, areniscas y conglomerados de color rojo, verde y gris verdoso. Su localidad tipo se localiza a 20 km al suroeste de Ciudad Victoria, Tamaulipas.

Dentro del área aflora al oeste de Ciudad Victoria, en la zona denominada "Peregrina", pero también se ha identificado en el Valle de Huizachal, además de los Cañones Peregrina, Caballeros, Arroyo Seco, Santa Lugarda, La Boca, La Esperanza, El Olmo, El Rosario, Guayabas y el Rio Purificación. Esta formación está constituida por rocas clásticas de color rojizo, las cuales aparentemente se formaron en fosas tectónicas que fueron rellenas por sedimentos continentales.

No se le ha encontrado fauna marina a estos depósitos, por lo que su edad ha sido determinada por su posición estratigráfica, que la ubica en el Triásico Superior.

Formación La Joya

Definida por Nixon en 1958, quien dio este nombre a una sección constituida por una serie de conglomerados de rocas ígneas y metamórficas, areniscas rojizas, calizas laminares de color gris rojizo, lutitas y areniscas de origen marino.

Dentro del área aflora al suroeste de Ciudad Victoria, en forma de cordones alargados que circundan a dos ventanas geológicas. Los afloramientos situados a lo largo del lado Norte del Valle del Huizachal y del Rancho de La Joya Verde, ubicado sobre el camino Jaumave-Ciudad Victoria, constituyen su localidad tipo.

Está constituida por un conglomerado basal de espesor muy variable, desde unos centímetros hasta más de 20 m, mal clasificado, constituido por fragmentos de rocas ígneas, de rocas metamórficas y de lechos rojos subyacentes.

Sobre el conglomerado descansa un delgado cuerpo de calizas y conglomerados calcáreos.

Sobre las calizas se hallan lutitas y limolitas y suprayaciendo a estas últimas rocas, se observan areniscas de color rojo, verde y gris verdoso. A lo largo del camino que va del Huizachal a Ciudad Victoria, al Oeste del Rancho La Joya, Nixon midió 63.3 m.

Descansa discordantemente sobre la Formación Huizachal y su contacto superior con la Formación Zuloaga presenta una discordancia erosional muy clara. Su ambiente de depósito refleja condiciones de margen continental con entradas rápidas de mar que permitieron el depósito de delgados espesores de calizas laminares, areniscas y conglomerados marinos.

Formación Zuloaga

Definida por Buckhardt, en 1930. Este autor la llamo inicialmente Calizas de Nerineas. Posteriormente R. W. Imlay en 1938 le asigno el nombre de Calizas Zuloaga a una secuencia incompleta de 548 m, constituida en su mayor parte por calizas, ocasionalmente dolomitizadas, de estratificación media a gruesa, cuya localidad tipo se encuentra en la Sierra de Sombreretillo, localizada al Norte de Melchor Ocampo, Zacatecas.

Dentro del área esta formación esta agrupada junto con las Formaciones Olvido y La Casita, cuya edad se ha denominado Jurásico Superior y aflora al suroeste de Ciudad Victoria. Su ambiente depósito de litoral de plataforma indica condiciones climáticas cálidas y uniformes. Se encuentran sobreyaciendo a la Formación La Joya en discordancia erosional y subyaciendo a la Formación Olvido, cuyo contacto es concordante y claro. Por sus relaciones estratigráficas, se le asigna una edad correspondiente a la base del Oxfordiano.

Formación Olvido

Fue definida por Heim, en 1940 para referirse a una secuencia estratigráfica representada por anhidritas, yesos, calizas y lutitas de colores claros que subyace a la Formación La Casita. Tiene una gran distribución en el Noreste de México y ha sido observada en los cañones de El Huizachal, El Novillo, La Peregrina y Caballeros. Dentro del área se encontró a esta formación en forma de un cordón alargado que circunda a los afloramientos precámbricos al oeste y suroeste de Ciudad Victoria así como sobre la carretera Ciudad Victoria-Jaumave. Se le asigna una edad Oxfordiano Superior.

Formación La Casita

Definida por Imlay en 1943. Corresponde a una secuencia de margas arenosas y carbonosas, calizas arcillo-carbonosas en parte fosfáticas y areniscas hacia la porción basal.

Ocasionalmente presenta conglomerados, areniscas, lutitas, margas y yesos.
Aflora al norte del acuífero, en los cortes de la carretera Victoria-Jaumave y en forma de un cordón alargada, circundando sedimentos más antiguos.

En algunos sitios no es posible su diferenciación, razón por la que se mapea como una sola unidad junto con las formaciones Olvido y Zuloaga, como Jurásico Superior. Se correlaciona con la Formación Pimienta y de acuerdo con su contenido de fósiles, se le ha asignado al Kimmeridgiano-Tithoniano.

Formación Tamaulipas Inferior

Este nombre fue utilizado originalmente por L. W. Stephenson en 1921 para nombrar a una serie de calizas y dolomías de color gris claro con fractura aporcelanada, lentes y nódulos de pedernal ámbar a blanco, que afloran en el núcleo de la Sierra de Tamaulipas.

Dentro del área del acuífero aflora al suroeste de Ciudad Victoria en forma de cordón alargado que circunda a los dos afloramientos de rocas jurásicas. Su espesor varía de 40 a 260 m, este último se midió en Miquihuana, en donde las rocas presentan abundantes líneas estilolíticas paralelas a la estratificación y nódulos de pedernal de color castaño.

Por sus relaciones estratigráficas, entre las formaciones La Casita y Otates, se asigna al Neocomiano. Se correlaciona con la Formación Cupido y se considera que fue depositada en un medio ambiente de mar abierto, donde se propiciaba la precipitación de carbonatos.

Formación Otates

El nombre por Muir en 1936, para denominar el intervalo arcillo-calcáreo que separa estratigráficamente a los paquetes de calizas de las Formaciones Tamaulipas Inferior y Superior. Su localidad tipo se encuentra en el Cañón de los Otates, ubicado sobre el flanco occidental de la Sierra de Tamaulipas.

Inicialmente se consideró como horizonte y posteriormente se le ha dado el rango de formación debido a su amplia extensión y significado en cuanto a la magnitud del evento geológico-sedimentológico que representa. En el norte del país (Nuevo León y Coahuila) se correlaciona con la Formación La Peña. Se le asigna una edad correspondiente al Aptiano Superior debido a la presencia del fósil índice *Dufrenoya Justinae*.

Aflora en el núcleo del Anticlinal Huizachal, sobre el curso del Rio Guayalejo, así como sobre la Carretera Ciudad Victoria-Jaumave. Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Tamaulipas Inferior y Superior, respectivamente, y están definidos por el cambio de los cuerpos de micrita de las formaciones encajonantes. Por su contenido fósil se asigna al Aptiano Superior y su ambiente de depósito es de mar abierto con aporte de terrígenos de áreas tectónicamente activas.

Formación Tamaulipas Superior

Este nombre fue introducido a la literatura geológica por la L.W. Stephenson en 1921, para designar una sección de calizas criptocristalinas de color crema claro y capas medianas, con líneas estilolíticas gruesas paralelas a los planos de estratificación y lentes de pedernal de color gris y castaño oscuro, cuya localidad tipo se localiza en la Sierra de Tamaulipas.

Es posible distinguir dos miembros: el inferior está representado por calizas de textura fina, de color crema en capas de espesor medio y ocasionalmente con lentes de pedernal; el miembro superior se compone de calizas de color amarillento, en capas de espesor delgado y con nódulos de pedernal de color gris.

En el norte del país (Nuevo León y Coahuila) se correlaciona con la Formación Aurora. Dentro del área del acuífero consiste en más de 550 m de calcilutitas y calcarenitas de color gris a gris claro, con lentes y nódulos de pedernal, la cual aflora en el cauce del rio Guayalejo al oeste de Ciudad Victoria. Contienen pellets, foraminíferos y calciesferúlidos.

Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Otates y Agua Nueva, respectivamente.

Aflora en una gran extensión del frente de la Sierra Madre Oriental, al Norte del rio Guayalejo, zona que paleográficamente se ubica al Norte de la Plataforma Valles–San Luis Potosí, razón por la que en esta área los sedimentos corresponden a micritas, mientras que las formaciones depositadas al sur equivalentes principalmente a la Formación El Abra que fueron depositadas sobre la plataforma, corresponden en gran proporción a sedimentos arrecifales.

Formación El Abra

Nombre dado al complejo calcáreo arrecifal, de edad Albiano-Cenomaniano, que bordea la Plataforma Valles-San Luis Potosí y que se puede correlacionar con la formación arrecifal de la Faja de Oro y la Formación El Doctor. Se considera como facies pre-arrecifal de la formación "El Abra", a un conjunto litológico constituido por rocas clásticas de talud arrecifal, dolomitizadas o parcialmente dolomitizadas, así como a la zona de interdigitación de calizas de la cuenca y la Formación Cuesta del Cura, con calizas clásticas biocalcáreas, derivadas de las zonas arrecifales.

La facies arrecifal de la Formación El Abra, en general, está representada por calizas masivas de color crema amarillento y gris crema, constituidas principalmente por un conjunto de bancos arrecifales de caprínidos, separados uno de otro por calcarenitas, calcarenitas oolíticas y elásticos biógenos.

El cementante entre los fósiles es generalmente de calcita espática de grano fino. Estas rocas generalmente son compactas y las únicas zonas porosas se hallan en algunas cavidades dejadas por los fósiles. La porosidad secundaria producida por lixiviación y fracturamiento es grande, desarrolla un complejo sistema de grietas y cavernas.

Al centro de los anticlinales, se le encuentra fuertemente carstificada, por lo que su rasgo geomorfológico más importante lo constituye la gran cantidad de sumideros, circulares a suavemente ovalados. Esta formación constituye las sierras de Tamalave y de Cucharas que representan el límite con el acuífero Ocampo-Antiguo Morelos.

Formación Cuesta del Cura

En el área del acuífero está representada por un paquete de 200 m de espesor de calizas que se pueden dividir en tres cuerpos: el primero en la base con 10 m de espesor corresponde a un horizonte masivo de calizas de color gris y gris obscuro.

El miembro intermedio tiene un espesor de 160 m y corresponde a capas delgadas y medianas de calizas de color gris obscuro y gris claro, moteadas, de estratificación ondulada con bandeamiento de pedernal obscuro y con frecuentes intercalaciones de margas laminares de color gris claro pardusco y al intemperismo rosado. La porción superior de esta formación está constituida por 30 m de capas de regular espesor de calizas grises laminares y escasos lentes de pedernal negro. Su ambiente de depósito está asociado a mares poco profundos en los que junto con la precipitación del carbonato de calcio se depositaron arenas, arcillas y sílice que formaron la gran cantidad de bandas de pedernal negro.

Formación Agua Nueva

Está constituida por calizas arcillosas de estratificación mediana a gruesa con estructura laminar de color gris obscuro y negro que alternan con lutitas y margas laminadas de color café a gris obscuro, a veces bituminosas y carbonosas. Es común encontrar hacia la base de esta formación, capas de bentonita de color verde que sirven como horizonte índice para marcar su contacto inferior. Por su contenido faunístico, se le ha asignado una edad Cenomaniano-Turoniano y se le correlaciona con la Formación Indidura del noreste del país. Sobreyace a la Formación Cuesta del Cura y subyace a la Formación San Felipe.

Formación San Felipe

Esta formación fue descrita inicialmente por Jeffreys en 1910, en su localidad tipo de la ranchería de San Felipe y San Luis Potosí, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, donde consiste de calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentoníticas de colores verde y gris claro. Su espesor promedio es de 130 m y se correlaciona con la Formación Parras en el estado de Coahuila.

Está constituida por una alternancia de calizas y lutitas grises que presentan intercalaciones de calizas arcillosas, margas de color gris y verde, así como bentonita. En el área se encuentra sobre los flancos de las sierras. Subyace a la Formación Méndez cuyo contacto es transicional y sobreyace a la Formación Agua Nueva en forma concordante.

Formación Méndez

Nombre que Jeffreys utilizó, para describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris azuloso y café con fractura nodular, que sobreyace a la Formación San Felipe.

Su localidad tipo se ubica sobre el km 62 de la vía del ferrocarril Tampico - San Luis Potosí, a 300 m al este de la estación Méndez. En el área está representada por lutitas de fractura concoidal con aislados estratos de areniscas de grano fino color café. Su fracturamiento es típico por el intemperismo, produciéndose un intenso lajamiento y pizarrocidad, dando origen a montículos con apariencia de dunas, subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales. Su espesor promedio es de 300 m y en el estado de Coahuila se correlaciona con la Formación Difunta.

Se le asigna una edad Campaniano–Maestrichtiano y aparentemente fue depositada en un fondo marino de aguas relativamente profundas, con abundante aporte de material terrígeno fino.

Formación Cárdenas

Fue definida por E. Bose en 1906, para referirse a los sedimentos arcillo – calcáreos y arenosos del Cretácico que afloran en las cercanías de la estación Cárdenas–San Luis Potosí. Heim en 1925 y C. Buckhardt (1930) las denominaron como capas Cárdenas; finalmente Imlay en 1944 la definió formalmente con Formación Cárdenas. Está constituida por una alternancia de margas y delgados cuerpos de areniscas calcáreas de color gris, las cuales cambian de facies hacia la porción noroccidental del área a rocas más compactas, como calizas arcillosas de estratificación delgada y media, las cuales se denominan como Formación Cárdenas – calcáreo.

Esta formación se depositó en un ambiente de aguas someras de alta energía en el cual existía un gran aporte de terrígenos. De acuerdo con su contenido faunístico y posición estratigráfica se le asigna una edad Campaniano – Maestrichtiano. Se ha estimado su espesor 1000 m.

Formación Reynosa

Unidad litoestratigráfica constituida por un conglomerado de cantos de caliza y rocas ígneas, bien empacados por un cementante calcáreo. Presenta un color gris claro y son poco resistentes al intemperismo.

Tiene un espesor muy variable, pero generalmente pequeño de 2 a 15 m, forma lomeríos redondeados. Su depósito se llevó a cabo por corrientes fluviales y se encuentra cubriendo discordantemente a rocas prexistentes, principalmente del Cretácico Superior.

Rocas ígneas extrusivas

En la porción central-este y sureste del área de trabajo se encuentran afloramientos de rocas ígneas extrusivas principalmente en los alrededores del poblado Llera de Canales, donde afloran una serie de materiales lávicos y piroclásticos.

Están representadas por basaltos vesiculares de olivino, asociados con productos piroclásticos. Se presentan en forma de derrames lávicos de forma tabular y se asocian a la actividad volcánica que tuvo lugar al finalizar la Orogenia Laramide, por lo que se les asigna una edad Paleógeno-Neógeno.

Aluvión Cuaternario

Está representado por abanicos aluviales, terrazas y depósitos granulares, constituidos principalmente por arcillas y gravas, producto de la erosión de las rocas calcáreas que constituyen las sierras, que se acumularon en las partes topográficamente más bajas. Su espesor es muy reducido en los valles, menor de 20 m, y aumenta un poco en los cauces fluviales principalmente en la porción norte del acuífero.

4.2 Geología estructural

Los rasgos estructurales más importantes del acuífero corresponden a fallas y plegamientos originados por la Orogenia Laramide; en menor proporción se presentan fracturas y estructuras de colapso en rocas calcáreas como las dolinas.

Los pliegues corresponden a estructuras anticlinales y sinclinales, tanto simétricas como recumbentes, de grandes dimensiones, característicos de las sierras formadas por rocas calcáreas competentes, contrario a los materiales poco compactos de las formaciones Méndez y Cárdenas en los que estas estructuras son de menor tamaño.

Las rocas y estructuras se encuentran afectadas por una gran cantidad de fallas, entre las cuales destacan las cabalgaduras formadas como consecuencia de los plegamientos. Este tipo de falla predomina en la porción suroeste de Llera de Canales, donde se formaron estructuras complejas.

En menor proporción se presentan fallas normales que alcanzan entre 2 y 5 km de longitud en promedio.

A escala regional, se pueden inferir dos fases tectónicas de deformación: la primera de tipo compresional se inició a finales del Cretácico y culminó en el Eoceno, originando plegamientos y el cabalgamiento de las rocas sedimentarias cretácicas; la segunda etapa, de tipo distensiva, se originó durante el Oligoceno-Mioceno y propició el emplazamiento de cuerpos intrusivos. Esta fase provocó la dislocación y fallamiento normal de grandes bloques.

Durante el Paleógeno-Neógeno se depositaron sedimentos terrígenos, representados por el Conglomerado Reynosa, provenientes de la porción occidental del México y para el Reciente predomina un proceso erosivo, que favorece el depósito de material aluvial y coluvial, que presentan la expresión topográfica actual.

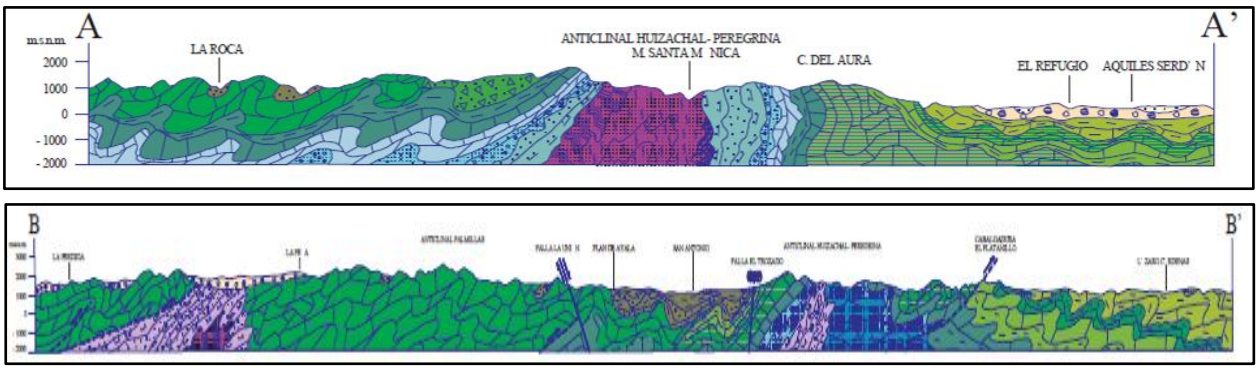
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información hidrogeológica, geofísica y de la geología superficial 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 variable y conglomerados, de permeabilidad baja a media, que constituyen los valles y los piedemontes.

La porción inferior está conformada por los depósitos clásticos del Conglomerado Reynosa así como la secuencia de lutitas y margas de las formaciones Cárdenas, Méndez y San Felipe, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Este es el acuífero que actualmente se explota, de bajo rendimiento, que generalmente proporciona caudales inferiores a 5 lps. Las calizas de las formaciones Cuesta del Cura y El Abra, constituyen horizontes acuíferos profundos que no han sido explorados en la zona.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas sedimentarias, al desaparecer el fracturamiento, así como los esquistos y rocas ígneas intrusivas. A mayor profundidad las barreras al flujo subterráneo y el basamento están representadas las margas de la Formación La Casita.

En la figura 3 se presentan dos secciones geológicas esquemáticas, ubicadas en la porción centro y norte del acuífero, que muestran la disposición de las unidades geológicas del subsuelo.



Fuente: Carta Geológico-Minera Ciudad Victoria F14-2, Tamps, N. L. y S.L.P. SGM 2008. Escala 1:250,000

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas, permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre** heterogéneo, tanto en sentido horizontal como vertical, constituido en su porción superior, por sedimentos aluviales de granulometría variada y conglomerados, producto de la erosión de las rocas que constituyen las sierras que delimitan los valles, cuyo espesor es muy reducido y presentan permeabilidad generalmente baja.

La porción inferior se aloja en las lutitas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Los flancos de las sierras están constituidos por calizas de distintas facies, que les confieren permeabilidad de baja a alta.

Debido a la alternancia de secuencias arcillo-calcáreas es posible inferir la presencia de horizontes acuíferos confinados en las calizas cuyas áreas de recarga se localizan en las sierras limítrofes del valle, que no han sido explorados aún.

Esto es más evidente al sur del acuífero, donde las sierras están constitudas por calizas arrecifales que presentan fracturamiento y disolución, facilitan la infiltración de la lluvia, que es descargada sobre el flanco oeste de la sierra, a través de manantiales.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en 2010, se ejecutaron 15 pruebas de bombeo de corta duración en etapa de abatimiento y recuperación.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de transmisividad varían de **0.04** a **31.4x10^{-3} m^2/s**, con un valor promedio de **5.3 x10^{-3} m^2/s**, pero con predominio de valores inferiores a 1.0 x10^{-3} m^2/s; en tanto que los valores de conductividad hidráulica varían de **0.000000723** a **0.000642 m/s** con un valor promedio de **0.000113 m/s.**

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible obtener valores del coeficiente de almacenamiento.

Debido a los materiales que constituyen la parte superior del acuífero, se le asignó un valor de rendimiento específico de **0.01 y 0.02**, para las zonas de Palmillas y Jaumave, respectivamente.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con información piezométrica correspondiente al mes de octubre de 2008 y 2010.

5.4 Comportamiento hidráulico

Debido a que la posición de los niveles del agua subterránea no registró cambios significativos en el periodo 2008-2010, las configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático presentan prácticamente la misma posición y distribución geográfica.

Por esta razón únicamente se describen las configuraciones correspondientes al año 2010. Para fines descriptivos y del planteamiento del balance de aguas subterráneas se identificaron dos zonas: Jaumave y Palmillas.

5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de profundidad al nivel estático para el año 2010, en la zona de Jaumave (figura 4) Los valores varían de 1 a 47 m, aumentando gradualmente a lo largo del cauce de los ríos y arroyos, conforme se asciende topográficamente.

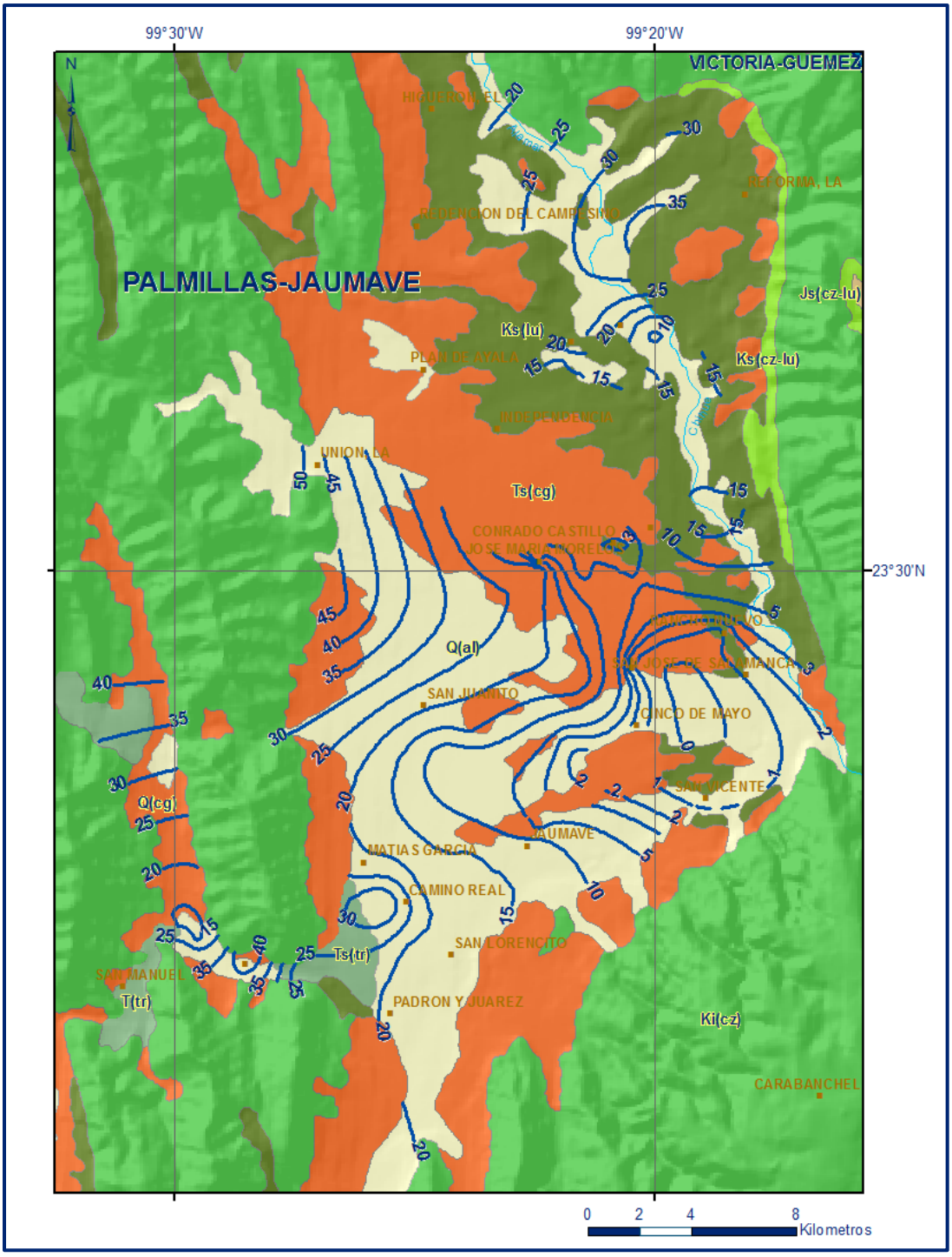


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m), zona Jaumave (2010)

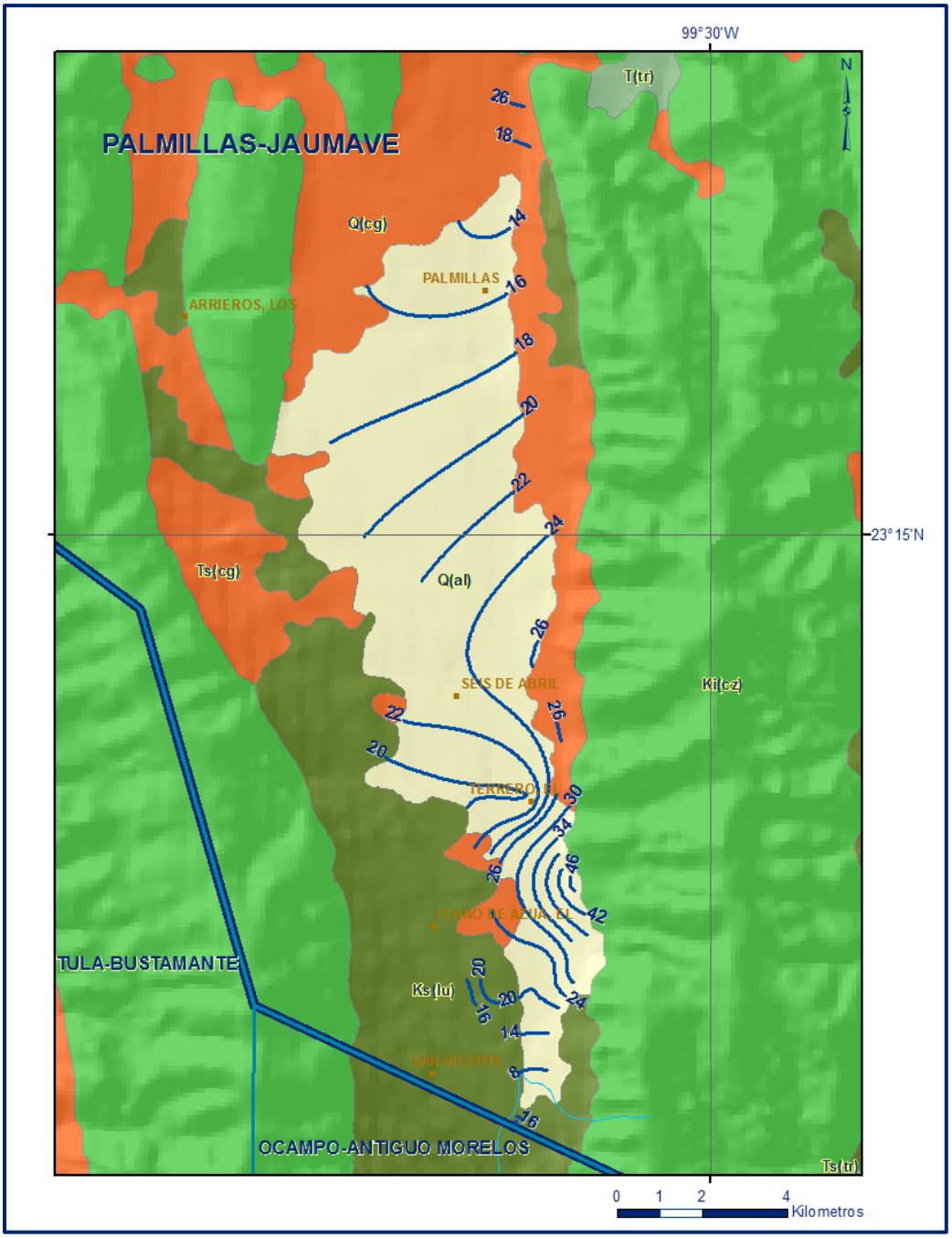


Figura 5. Profundidad al nivel estático en m, zona Palmillas (2010)

Las mayores profundidades se presentan en las inmediaciones de los ejidos La Unión y San Juanito y los valores más someros se registran en la porción central de la zona de explotación. Para la zona de Palmillas, la configuración de profundidad al nivel estático (figura 5), registra profundidades que varían de 2 a 31 m; las mayores profundidades se presentan en la zona cercana a los ejidos Llano de Azua y El Aguacate, desde donde decrecen hacia el norte y sur del acuífero.

5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, en la zona de Jaumave (figura 6), se observa que los valores varían entre 540 y 1000 msnm, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad.

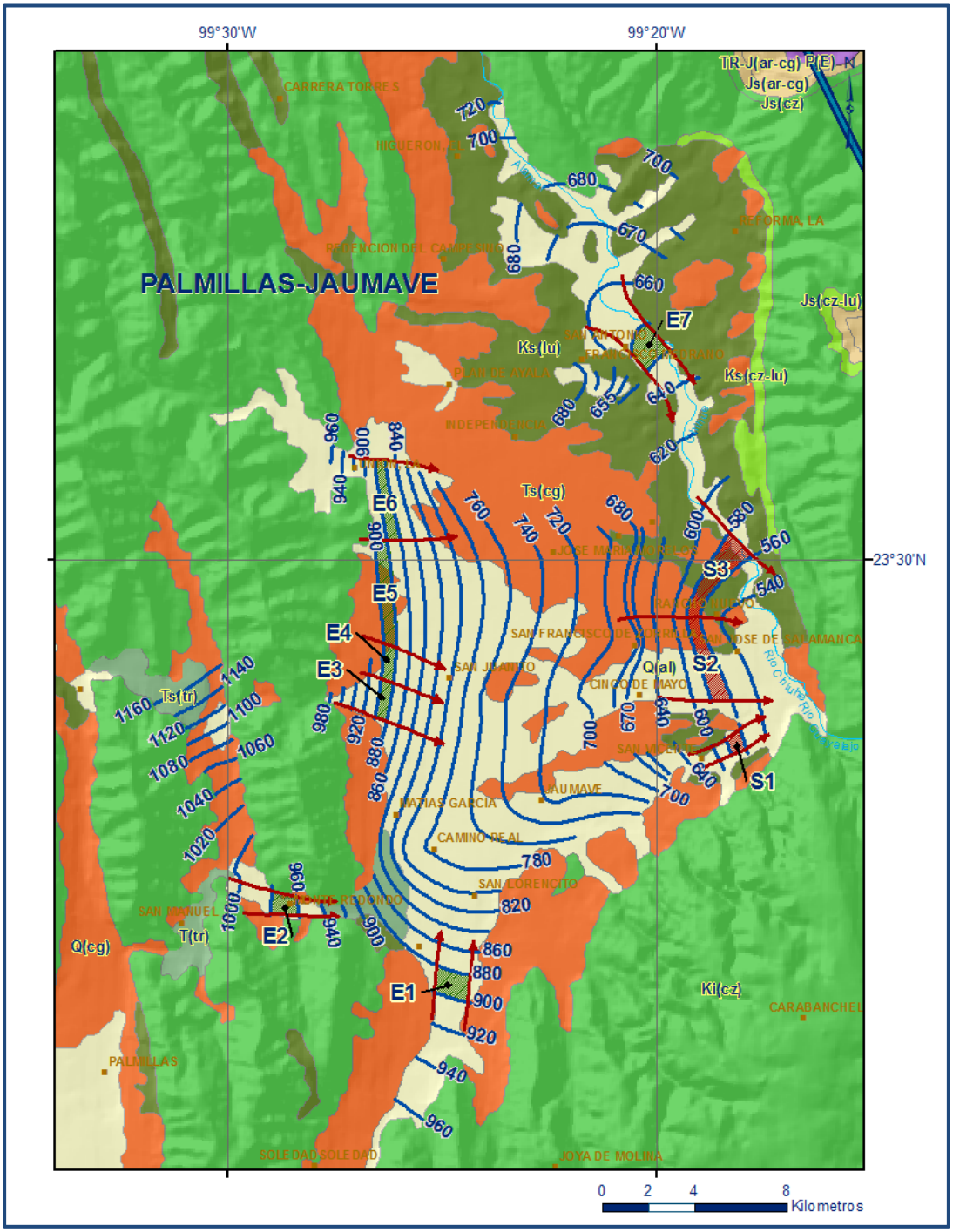


Figura 6. Elevación del nivel estático en msnm, zona Jaumave (2010)

Los valores más bajos se localizan en la porción centro-este de la zona, desde donde se incrementan gradualmente por efecto de la topografía hacia la porción oeste y sur, mostrando de esta manera una dirección preferencial del flujo subterráneo de oriente a occidente y de norte a sur (figura 7).

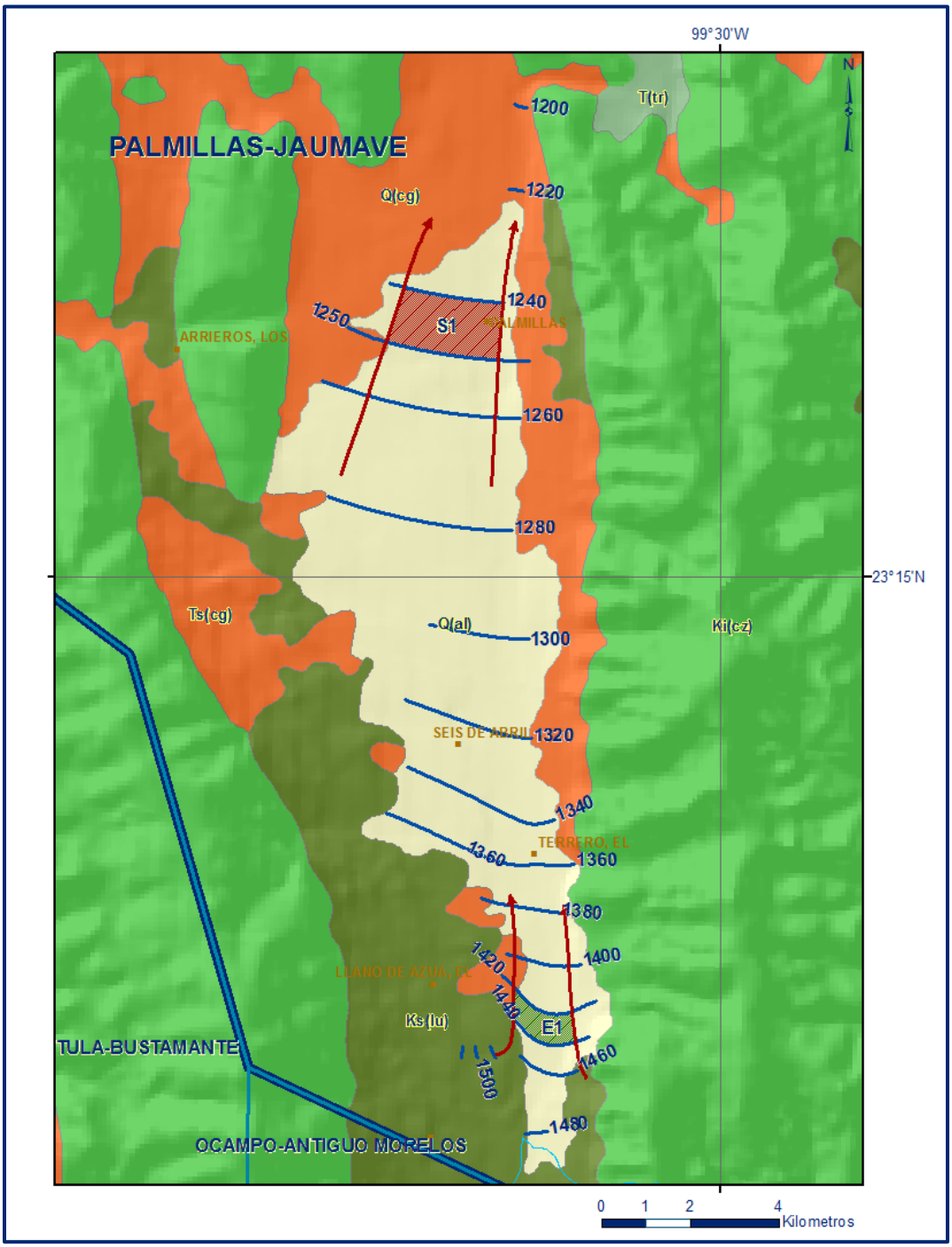


Figura 7. Elevación del nivel estático en msnm, zona Palmillas (2010)

En el caso de la zona de Palmillas se observan elevaciones que varían de 1200 a 1520 msnm, aumentando por efecto de la topografía de sur a norte, reflejando de esta manera la dirección preferencial de flujo de agua subterránea.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 2008-2010, se observan valores tanto de recuperación como de abatimiento. Los primeros se registran hacia las zonas de recarga y los abatimientos en la zona de explotación (figura 8).

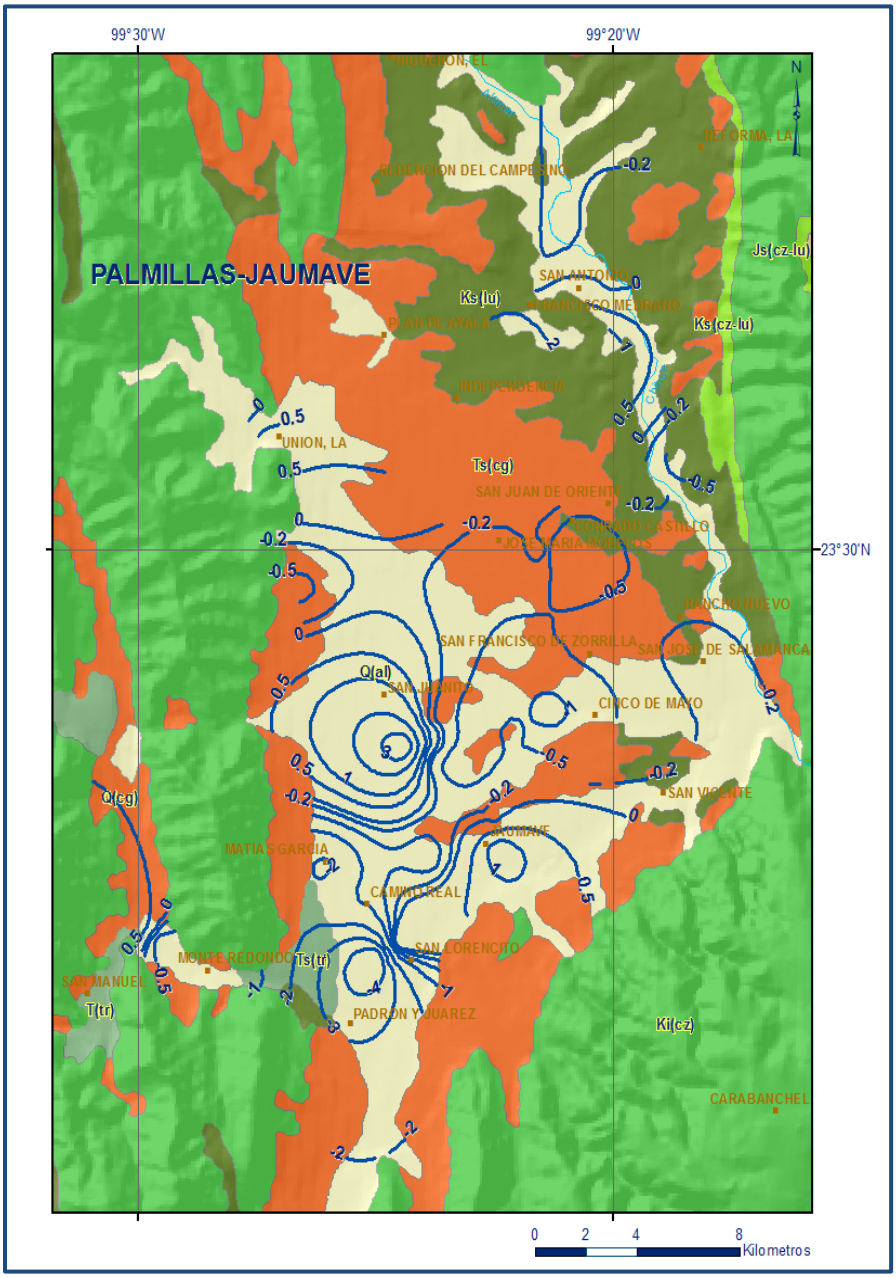


Figura 8. Evolución del nivel estático (m), zona Jaumave, 2008-2010

Para la zona de Jaumave se registran valores puntuales de abatimiento de hasta 5 m y de recuperación de 3.5 m. De manera general, se observa que el valor promedio de evolución es de -1.4 m para la zona de explotación, lo que representa un ritmo anual de abatimiento de 0.7 m y de 0.14 m para toda el área. El mayor abatimiento se registró en las inmediaciones de la comunidad de Padrón y Juárez (figura 9)..

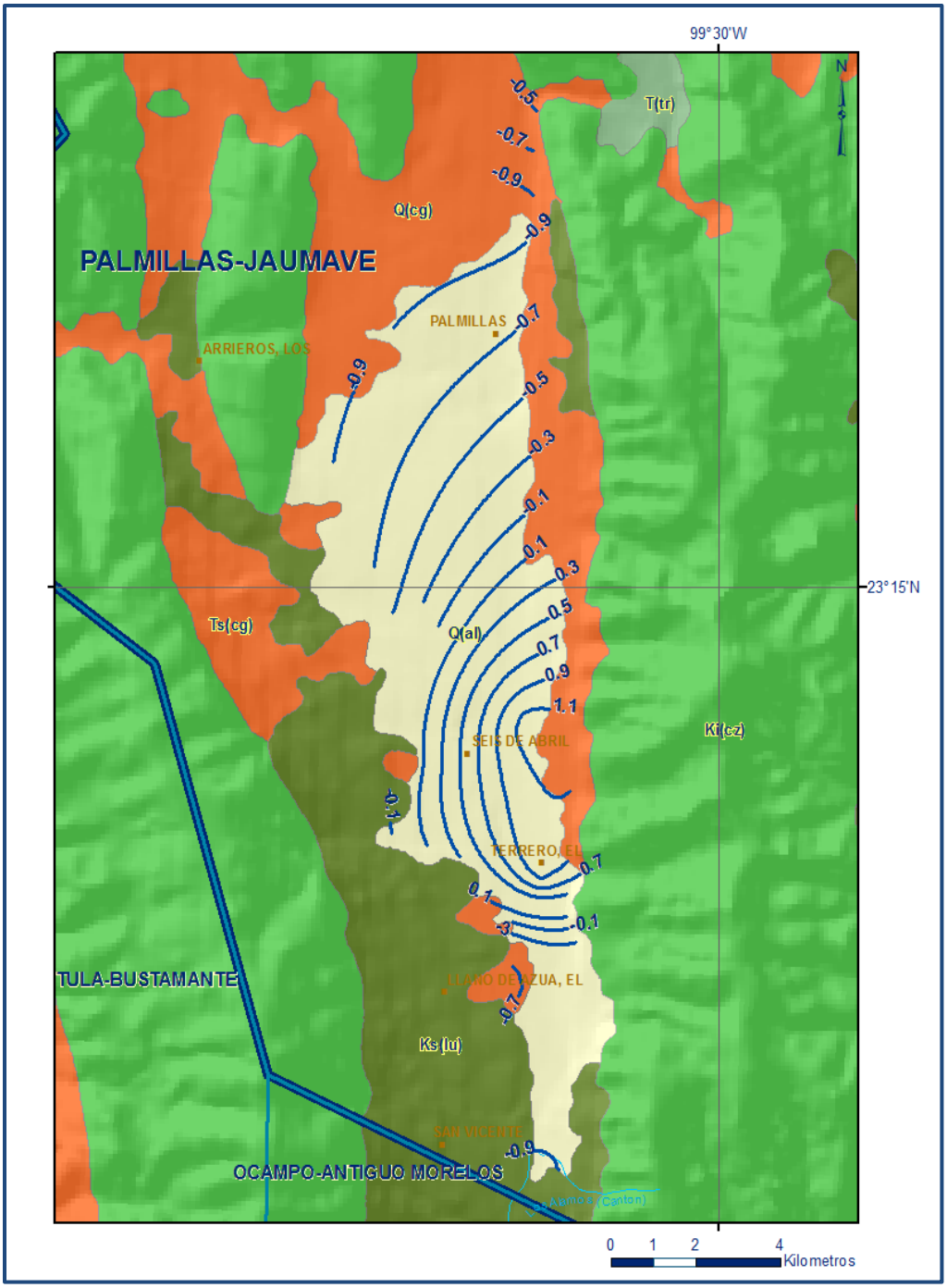


Figura 9. Evolución del nivel estático (m), zona Palmillas, 2008-2010

En la zona de Palmillas también se registran valores de evolución tanto positivos como negativos, los cuales varían de 1.2 a -0.9 m, predominando abatimientos en la mayor parte del área, con un abatimiento promedio anual de 0.4 m en la zona de explotación.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2010, se tomaron 58 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación (15 manantiales, 11 norias y 32 pozos), para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron: Temperatura (°C), pH, Conductividad Eléctrica (µs/cm) y STD (mg/l), para identificar los procesos geoquímicos y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana, para los diferentes usos.

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 98 a 821 ppm, los cuales no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido la NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022. de STD. De acuerdo con los iones dominantes, predomina la familia del agua bicarbonatada-cálcica que representa agua de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas calizas.

En el área de explotación Palmillas, la distribución de las concentraciones de los sólidos disueltos totales muestra un incremento de sur a norte y de norte, reflejando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo.

Para la zona Jaumave las concentraciones más bajas se registran al norte de la zona de explotación, las cuales se incrementan hacia el sur.

También son evidentes las direcciones de flujo suroeste-noreste y oeste-este; las tres direcciones flujo tienden a confluir en la porción oriental del acuífero.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamiento realizado como parte del estudio llevado a cabo en el 2010, se registró la existencia de 100 aprovechamientos, de los cuales 15 son manantiales, 17 norias y 68 pozos; de ellos 67 aprovechamientos están activos (14 manantiales, 9 norias y 44 pozos) y 33 están inactivos. El volumen de extracción se ha estimado en **1.3 hm^3** anuales (0.9 hm^3 en la zona de Jaumave y 0.4 en Palmillas), de los cuales 0.8 hm^3 (61.5 %) se destinan al uso Público Urbano, 0.4 hm^3 (30.8%) para uso Agrícola y los 0.1 hm^3 restantes (7.7 %) para satisfacer las necesidades del uso Doméstico.

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2008- 2010, en un área total de **343 km^2** del acuífero (287 km^2 de la zona Jaumave y 56 km^2 en Palmillas) que corresponde a las zonas donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localizan 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 de un acuífero:

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (Rt) ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos a lo largo de los 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 subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri).

Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, la baja permeabilidad del suelo y el riego agrícola es incipiente, se considera que para fines del balance de aguas subterráneas no existe recarga inducida.

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña.

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

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

Dónde:

Eh: Entrada por flujo subterráneo horizontal;
Rv: Recarga vertical;
B: Bombeo;
Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal;
ETR: Evapotranspiración;
ΔV(S): Cambio en el volumen almacenado;

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

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

La expresión anterior es aplicable únicamente a la zona de balance de Palmillas, mientras que para la zona de Jaumave se determinó como la suma de la infiltración que ocurre directamente en el área de balance más la infiltración que proviene de los escurrimientos de la cuenca hidrológica que la contiene.

Entonces tomando en cuenta un coeficiente de infiltración de 10%, se obtuvo que el volumen de recarga vertical anual en esta zona es de **15.3 hm³**

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias, que se precipita en las zonas altas del área, 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.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático para el año 2010, mostrada en las figuras 6 y 7. Con base en esta configuración 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:

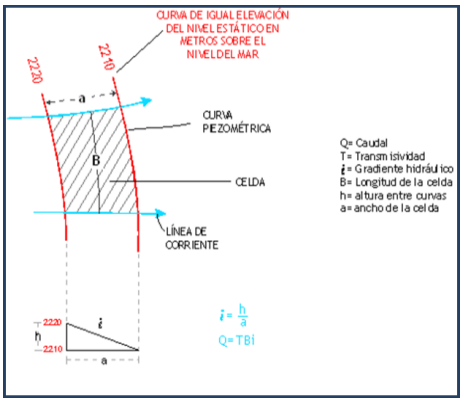
$$Q = B * i * T$$

Donde:

B= Largo del canal de flujo (m);

i= Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / a$);

T= Transmisividad (m^2/s);



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 en cada zona.

Tabla 3. Cálculo de entradas subterráneas por flujo horizontal, 2010

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	1415	1200	20	0.0167	0.0024	0.0576	1.8
E2	915	1065	20	0.0188	0.0025	0.0421	1.3
E3	1658	527	20	0.0380	0.0031	0.1966	6.2
E4	1518	528	20	0.0379	0.0003	0.0167	0.5
E5	4564	530	20	0.0377	0.0003	0.0501	1.6
E6	3523	510	20	0.0392	0.0003	0.0402	1.3
E7	1441	5100	20	0.0039	0.0067	0.0377	1.2
E8	1513	598	20	0.0334	0.0001	0.0035	0.1
						TOTAL	14.0

La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 3 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo asciende a **13.9 hm³/año** en el área de Jaumave y **0.1 hm³/año** en el área de Palmillas.

7.2 Salidas

Las descargas en el acuífero ocurren principalmente por evapotranspiración (ETR), bombeo (B), flujo subterráneo horizontal (Sh), descarga de manantiales (Dm) y descarga por flujo base (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 del elevación del NE del año 2010, mostrada en las figuras 6 y 7. El valor estimado para este año de análisis se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo de salidas por flujo subterráneo, 2010

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	830	520	20	0.0385	0.0002	0.0073	0.2
S2	3786	680	20	0.0294	0.0002	0.0254	0.8
S3	3758	1400	20	0.0143	0.0003	0.0150	0.5
S4	2229	1300	10	0.0077	0.0028	0.0476	1.5
						TOTAL	3.0

El valor de las salidas subterráneas para la zona de Jaumave es de **1.5 hm³/año** y para la zona de Palmillas también es de **1.5 hm³/año**.

7.2.2 Evapotranspiración (ETR)

Este componente es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación directa del agua freática somera y transpiración de las plantas, que en esta zona no es significativa por el tipo de vegetación. Para la obtención de este parámetro se puede utilizar la ecuación empírica de Turc, con la que se obtuvo, con un valor de precipitación de 292.8 mm y de temperatura de 20 °C, una ETR de 298.9 mm. La limitación teórica para la utilización de la fórmula de Turc es que la precipitación no debe ser menor a la relación 0.31L.

Entonces debido a que la precipitación resultó menor que la relación 0.31L = 372, el valor de la evapotranspiración real debe despreciarse, ya que su valor resulta mayor que el valor de la precipitación.

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \qquad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	20		
P(mm) =	292.8	P^2 =	85731.84
L =	1200	L^2 =	1440000
ETR (mm)	298.9		

El fenómeno presente en el área es la evaporación directa del agua freática somera, debido a la escasez de cobertura vegetal. Para la observación del comportamiento del fenómeno de evapotranspiración se considera el tanque evaporímetro expresado como un porcentaje de evapotranspiración, donde la evaporación es comparativamente más alta, en los niveles freáticos < 100 cm de la superficie del suelo, posteriormente disminuye hasta hacerse despreciable, para las zonas donde los niveles freáticos son > 300 cm, según White citado por Keith (1973) (figura 10).

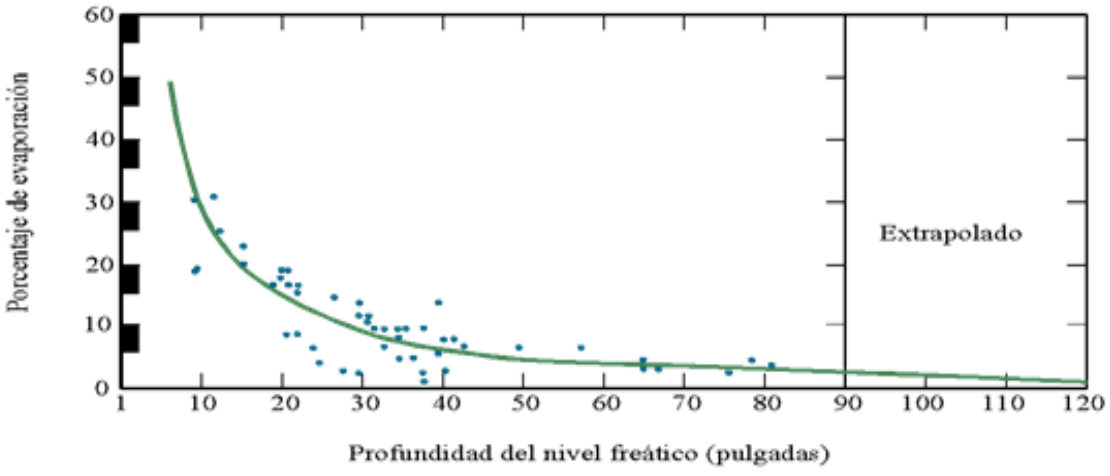


Figura 10. Evaporación del A.S. expresada en % como una función de la profundidad y del nivel freático según White

El porcentaje evaporado se estimó de la representación gráfica realizada por White, respecto a la evaporación de los suelos.

Para obtener el volumen total evapotranspirado, se multiplicó el porcentaje estimado de acuerdo a la profundidad media al nivel estático de 100, 200 y 300 cm por la lámina evaporada de 1332 mm/año, valor registrado en la estación climatológica Jaumave (28039), con este valor se obtuvo una lámina evaporada para cada año; finalmente multiplicando por el área sujeta a la evaporación a las distintas profundidades se obtuvo un volumen anual de evapotranspiración.

En la tabla 5, se muestran los porcentajes respecto al volumen evapotranspirado, para las profundidades de 100, 200 y 300 cm.

Tabla 5. Volumen evapotranspirado respecto al porcentaje estimado, 2010

PROFUNDIDAD MEDIA AL NIVEL ESTÁTICO (cm)	% DE EVAPORACIÓN (ESTIMADO GRÁFICA DE WHITE)	EVAPORACIÓN (mm/año)	ÁREA (km^2)	VOLUMEN EVAPOTRANSPIRADO (hm^3)
VOLUMEN EVAPOTRANSPIRADO ZONA JAUMAVE				
100	0.06	1332	18.8	1.5
200	0.05	1332	9.3	0.6
300	0.03	1332	8.4	0.3
				2.5

De acuerdo a lo anterior, se estima que el valor de la evapotranspiración promedio anual es de **2.5 hm^3** para la zona Jaumave, en tanto que para Palmillas su valor es nulo debido a que no presenta niveles freáticos someros.

7.2.3 Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción de agua subterránea asciende a **1.3 hm^3 anuales**, de los cuales 0.9 hm^3 corresponden al área de balance de Jaumave y 0.4 hm^3 a la zona de Palmillas**.**

7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb)

Parte del agua que se infiltra en el suelo continúa fluyendo horizontalmente como un flujo subterráneo, con dirección poniente a oriente de forma perpendicular a la dirección del Río Guayalejo.

Debido a la presencia de niveles someros de la zona saturada cercana al río y con algunos horizontes relativamente poco permeables situados muy cerca de la superficie del suelo, se provoca un escurrimiento base hacia dicho río.

Esta componente se seleccionó como incógnita de la ecuación de balance propuesta para la zona de explotación Jaumave, debido a que no se cuenta con información de estaciones hidrométricas.

$$\mathbf{Eh + Rv - B - Sh - ETR - Dm - Dfb = \pm \Delta V(S) \qquad (3)}$$

De esta manera, despejando la descarga por flujo base, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Dfb = \Delta V(S) + Eh + Rv - Sh - Dm - B - ETR \qquad (4)}$$

7.2.5 Descarga de manantiales (Dm)

De acuerdo con los resultados de hidrometría, se estimó un caudal de descarga conjunto 570 lps de los manantiales que existen en la zona de Jaumave, que representan un volumen de **18.0 hm³ anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento ΔV(S)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se utilizó la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2008-2010, que se muestra en las figuras 8 y 9, para las áreas de balance de Jaumave y Palmillas.

Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy de 0.02 y 0.01, respectivamente, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{\Delta VS = A * h * S}$$

Donde:

ΔVS: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km^2)

h: Valor de la variación piezométrica en el período (m)

Considerando los abatimientos promedios anuales de 0.14 m y de 0.10, en las respectivas áreas de balance y de rendimiento específico de 0.02 y 0.01 para las zonas de Jaumave y Palmillas, respectivamente, se obtiene lo siguiente:

Zona Jaumave: ΔV(S) = 287 km^2 (-0.14 m) (0.02) = **– 0.4 hm^3 anuales**
Zona Palmillas: ΔV(S) = 56 km^2 (-0.10 m) (0.01) = **– 0.06 hm^3 anuales**

Solución de 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 para el área de balance de Palmillas y el caudal base, mediante la expresión (3) en el área de Jaumave :

Área Palmillas

$$Rv = Sh + B + ETR - Eh \pm \Delta V(S) \qquad (2)$$
$$Rv = 1.5 + 0.4 + 0.00 - 0.10 - 0.06$$
$$Rv = 1.7\ hm^3/año$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de las entradas:

$$R = Rv + Eh$$
$$R = 1.7 + 0.1$$
$$R = 1.8\ hm^3\ anuales$$

Area Jaumave

$$Dfb = -\Delta V(S) + Eh + Rv - Sh - Dm - B - ETR \qquad (4)$$
$$Dfb = -0.4 + 13.9 + 13.6 - 1.5 - 18.0 - 0.9 - 2.5$$
$$Dfb = 4.2\ hm^3/año$$

Por lo tanto el valor de la recarga total (R) es igual a la suma de las entradas.

$$R = Rv + Eh$$
$$R = 13.6 + 13.9$$
$$R = 27.5\ hm^3\ anuales$$

La recarga total en el acuífero es de:

$$R = 1.8 + 27.5$$
$$R = 29.3\ hm^3\ anuales.$$

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.

Para este caso, su valor es de **29.3 hm³/año,** todos ellos son de recarga natural.

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 este caso, su valor es de **18.0 hm³ anuales,** que corresponde a las salidas subterráneas que presenta el acuífero.

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 **8,349,562 m³ anuales,** que reporta el Registro Público de Derechos de 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.

$$\mathbf{DMA = R - DNC - VEAS}$$
$$\mathbf{DMA = 29.3 - 18.0 - 8.349562}$$
$$\mathbf{DMA = 2.950438\ hm^3/año.}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **2,950,438 m³ anuales.**

9 BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2008. Actualización de Mediciones Piezométricas de los A denominados: Palmillas-Jaumave y Ocampo-Antiguo Morelos, en el estado de Tamaulipas". Realizado por la Empresa NR Maquinaria, S.A. de C.V.