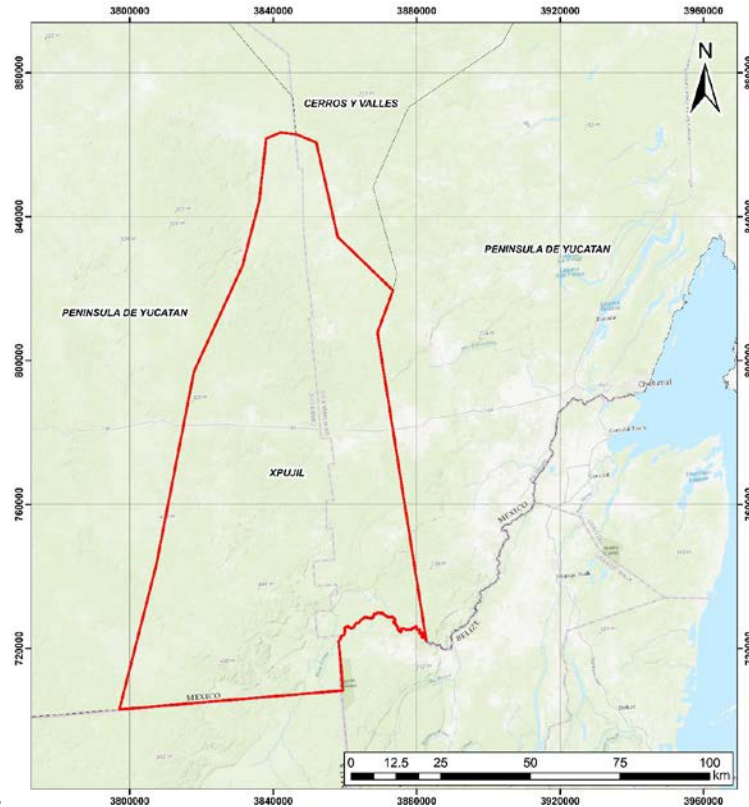




# ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO EN EL ACUÍFERO XPUJIL EN EL ESTADO DE CAMPECHE

## TH1914.1



## Informe final

**COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA**  
**SUBCOORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA**

**Participantes:**

Gerardo A. Ortiz Flores  
Luis González Hita  
Carlos Gutiérrez Ojeda

México, 2019

## CONTENIDO

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>		<b>1</b>
<b>1</b>	<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.1	Área de estudio .....	2
1.2	Metodología.....	3
<b>2</b>	<b>SÍNTESIS DEL CONOCIMIENTO ACTUAL DEL ACUÍFERO, RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ESTUDIOS PREVIOS .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO SOCIOECONÓMICO, FISIOGRAFICO Y ANÁLISIS <i>GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO, CLIMATOLÓGICO E HIDROLÓGICO</i>.....</b>	<b>22</b>
3.1	Localización.....	22
3.2	Disponibilidad de agua subterránea del acuífero .....	23
3.3	Vías de comunicación.....	24
3.4	Flora y Fauna .....	25
3.5	Aspectos socioeconómicos.....	26
3.6	Clima .....	30
3.7	Sequías .....	34
3.8	Cambio climático .....	34
3.9	Hidrología .....	35
3.10	Hidrografía y calidad del agua .....	36
3.11	Abastecimiento de agua .....	39
3.12	Captación de agua de lluvia.....	40
3.13	Orografía .....	49
3.14	Fisiografía.....	49
3.15	Geomorfología.....	50
3.16	Geología.....	59
	3.16.1 Geología regional .....	60
	3.16.2 Estratigrafía.....	62
	3.16.3 Geología local .....	67
<b>4</b>	<b>ACTUALIZACIÓN PIEZOMÉTRICA EN EL ACUÍFERO XPUJIL Y EN LAS ZONAS DE CALAKMUL, HOLPECHEN, CONSTITUCIÓN Y NUEVO VERACRUZ .....</b>	<b>68</b>
4.1	Verificación de los aprovechamientos existentes.....	68
4.2	Resultados de la verificación de aprovechamientos existentes en el acuífero Xpujil.....	72
4.3	Selección de la red de pozos de observación .....	72
<b>5</b>	<b>NIVELACIÓN DE BROCALES .....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>CONFIGURACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO, ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO Y DIRECCIÓN DE FLUJO .....</b>	<b>79</b>

6.1	Profundidad al nivel estático .....	79
6.2	Elevación del nivel estático .....	81
6.3	Determinación de la dirección del flujo subterráneo .....	82
<b>7</b>	<b>DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS MEDIANTE PRUEBAS DE BOMBEO.....</b>	<b>84</b>
7.1	Desarrollo de las pruebas de bombeo .....	84
7.2	Pozos seleccionados .....	84
7.3	Duración de las pruebas Inyección y bombeo e intervalos de medición.....	85
7.4	Pruebas de bombeo .....	86
7.5	Programa de bombeo .....	87
7.6	Determinación de los caudales .....	87
7.7	Requerimientos técnicos necesarios previos a la prueba de bombeo.....	90
7.8	Operación de aprovechamientos cercanos durante el desarrollo de las pruebas de bombeo.....	91
7.9	Revisión y calibración del equipo.....	91
7.10	Descripción de las pruebas de bombeo .....	91
7.11	Análisis de los datos de campo.....	92
7.12	Interpretación de las pruebas de bombeo por métodos tradicionales .....	99
7.13	Método de Theis.....	108
7.14	Método de recuperación de Jacob (Tomado de Pozos y acuíferos. Capitulo IV. Métodos de recuperación, régimen variable. M. Villanueva y A. Iglesias, WEB, 2019. ....	111
7.15	Resultados de la interpretación.....	115
<b>8</b>	<b>GEOFÍSICA .....</b>	<b>117</b>
8.1	Métodos electromagnéticos .....	117
8.1.1	Método TDEM o TEM .....	117
8.1.2	Ventajas del método TEM .....	118
8.2	Procesamiento de los datos.....	119
8.2.1	Modelo suavizado .....	119
8.2.2	Modelo unidimensional .....	119
8.2.3	Localización de los TEM'S.....	120
8.3	Resultados .....	122
8.3.1	Perfiles geoelectrónicos.....	124
8.3.2	Mapas de resistividad .....	127
8.4	Conclusiones y recomendaciones .....	131
<b>9</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO .....</b>	<b>132</b>
9.1	Metodologías de vulnerabilidad de acuíferos: alcances y definiciones.....	132
9.1.1	Definiciones.....	132
9.1.2	Metodología utilizada .....	134
9.1.3	Análisis de métodos.....	139
9.1.4	Ventajas y desventajas .....	154
9.2	Introducción .....	155
9.3	Vulnerabilidad.....	155
9.4	Aplicación del método DRASTIC .....	158
9.5	Metodología.....	159
9.6	Valoración de los parámetros para la obra lineal del Tren Maya.....	161

9.6.1	Parámetro D (profundidad al nivel estático) .....	161
9.6.2	Parámetro R (recarga) .....	161
9.6.3	Parámetro A (litología del acuífero) .....	163
9.6.4	Parámetro S (naturaleza del suelo).....	165
9.6.5	Parámetro T (topografía, % de pendiente máxima) .....	165
9.6.6	Parámetro I (zona no saturada) .....	166
9.6.7	Parámetro C (permeabilidad) .....	166
9.7	Resultados de la evaluación de la Vulnerabilidad .....	167
<b>10</b>	<b>ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS E ISOTÓPICOS Y ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS EXISTENTES Y PROTOTIPO .....</b>	<b>169</b>
10.1	Colecta de muestras de agua subterránea .....	169
10.2	Medición de parámetros de campo .....	171
10.3	Medición de parámetros en laboratorio .....	173
10.4	Interpretación hidrogeoquímica e isotópica .....	174
10.5	Discusión de resultados .....	179
	10.5.1 Isotopía estable .....	180
	10.5.2 Hidroquímica .....	184
	10.5.3 Tiempo de residencia del agua subterránea .....	191
	10.5.4 Calidad del agua de los aprovechamientos para riego .....	195
10.6	Análisis de tecnologías existentes y prototipo .....	197
	10.6.1 Revisión de las variables de la calidad y niveles del agua del acuífero .....	197
	10.6.2 Selección de los sitios y puntos de medición propuestos .....	235
	10.6.3 Análisis de tecnologías existentes y prototipos .....	237
<b>11</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>246</b>
<b>12</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>252</b>

## ANEXOS

- ANEXO 1. ÁLBUM FOTOGRÁFICO DE LA VERIFICACIÓN DE APROVECHAMIENTOS
- ANEXO 2. ÁLBUM FOTOGRÁFICO DE LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CAMPO Y DEL MUESTREO PUNTUAL PARA ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS
- ANEXO 3. RESULTADOS DE CAMPO Y LABORATORIO
- ANEXO 4. INFORMES DE LABORATORIOS CONTRATADOS



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**IMTA**  
INSTITUTO MEXICANO  
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

**Estudio hidrogeológico en el acuífero Xpujil en el  
Estado de Campeche**

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Localización de la zona de estudio .....	2
Figura 3.1	Localización del acuífero de Xpuji (0405).....	22
Figura 3.2	Red de carreteras.....	25
Figura 3.3	Escarabajo gigante denominado “megazoma”.....	26
Figura 3.4	Población del municipio de Calakmul (Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021, 2018). .....	27
Figura 3.5	Estructura demográfica de Calakmul (Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021, 2018). .....	27
Figura 3.6	Zonas con acceso a los acueductos (IDESMAC, 2014). .....	29
Figura 3.7	Climas del estado de Campeche (INEGI). .....	31
Figura 3.8	Temperaturas anuales en la estación Xpujil.....	32
Figura 3.9	Temperaturas medias mensuales en la estación Xpujil (en °C).....	32
Figura 3.10	Precipitaciones anuales en la estación Xpujil (en mm).....	33
Figura 3.11	Precipitaciones medias mensuales en la estación Xpujil (en mm).....	33
Figura 3.12	Aguada, Chultunes y pozos (Catherwood, 1843). .....	34
Figura 3.13	Regiones Hidrológicas del acuífero Xpujil. ....	36
Figura 3.14	Red hidrográfica (García et al., 2002). .....	37
Figura 3.15	Cuerpos de agua del municipio de Calakmul (García Gil et al., 1997)....	38
Figura 3.16	Acuíferos con intrusión marina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (Conagua, 2015). .....	39
Figura 3.17	Zonas de captación de agua de lluvia en el municipio de Calakmul (Pronatura, 2010).....	41
Figura 3.18	Zonas o microrregiones del Municipio de Calakmul (IDESMAC, 2014)...	42
Figura 3.19	Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en la zona de Xpujil (IDESMAC, 2014). .....	43
Figura 3.20	Tipos de abastecimiento de agua en la zona de Castillo Brito: (a) aljibe comunitario, (b) captador de agua y (c) habitante recogiendo agua del jagüey.....	44
Figura 3.21	Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en las zonas de Ley de Fomento y Ricardo Bravo. ....	45
Figura 3.22	Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en las zonas de Civalito y Josefa Ortiz.....	46
Figura 3.23	Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en la zona de Nueva Vida.....	46
Figura 3.24	Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en las zonas de Constitución y Puebla de Morelia. ....	47
Figura 3.25	Consumo de agua para usos doméstico y turístico por región. ....	48
Figura 3.26	Provincias fisiográficas del territorio mexicano. Resaltando con una línea rojo la ubicación del acuífero de Xpujil (INEGI).....	50
Figura 3.27	Provincias geomorfológicas de la Península de Yucatán.....	51
Figura 3.28	Principales unidades geomorfológicas en la Reserva de la Biosfera de Calakmul.....	52

Figura 3.29	Perfil topográfico A-A': se muestran las mayores elevaciones de la reserva (extremo derecha) y las mesetas de desarrollo kárstico (centro e izquierda).....	54
Figura 3.30	Perfil topográfico C-C': se muestran las superficies de laderas que limitan mesetas y depresiones tectónicas.....	55
Figura 3.31	Perfil topográfico D-D': se muestra la planicie estructural en las vertientes del Golfo de México y la del Caribe, con dirección este-oeste y altura inferior a 100m.....	56
Figura 3.32	Intensidad del desarrollo kárstico (García et al, 2002). .....	57
Figura 3.33	Distribución de aguadas o dolinas en la Reserva de la Biosfera de Calakmul.....	58
Figura 3.34	Mapa geológico y principales alineamientos tectónicos de la RBC. ....	60
Figura 3.35	Ubicación geológica del área de estudio. SMO, Sierra Madre Occidental; FVTM, Faja Volcánica Transmexicana; G, terreno Guerrero; Mi, terreno Mixteca; O, terreno Oaxaca; J, terreno Juárez; X, terreno Xolapa; M, terreno Maya. ZF, zona de fractura (modificada de Morán-Zenteno et al., 2005).....	61
Figura 3.36	Columna estratigráfica esquemática de los paquetes que forman el Bloque Maya (modificada de Sedlock et al., 1993).....	63
Figura 3.37	Mapa geológico de la Península de Yucatán, (cartografía tomada del SGM). Cenozoico. ....	64
Figura 3.38	Columna estratigráfica general de la Península de Yucatán (datos del SGM).....	66
Figura 4.1	Aprovechamientos censados en el acuífero Xpujil, estado de Campeche. ....	71
Figura 4.2	Red de pozos de observación para calidad del agua en el acuífero Xpujil .....	73
Figura 6.1	Configuración de la profundidad al nivel estático.....	80
Figura 6.2	Configuración de la elevación al nivel estático .....	82
Figura 6.3	Dirección del flujo en el acuífero Xpujil .....	83
Figura 7.1	Localización de los pozos con prueba de bombeo .....	85
Figura 7.2	Esquema del diseño del tubo y orificio (Driscoll, 1986). ....	88
Figura 7.3	Valor del coeficiente K para tubo y orificio (Driscoll, 1986). ....	90
Figura 7.4	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo Zoh-Laguna.....	94
Figura 7.5	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo 2 Silvituc. ....	95
Figura 7.6	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo Nuevo Veracruz.....	96
Figura 7.7	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo Santa Lucía.....	97
Figura 7.8	Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo Santa Lucía.....	98
Figura 7.9	Interpretación de prueba de bombeo (pozo Zoh-Laguna), por el método de Theis. ....	99
Figura 7.10	Interpretación de prueba de bombeo (pozo Zoh-Laguna), por el método de Jacob.....	100
Figura 7.11	Interpretación de prueba de bombeo (pozo No.2 Silvituc), por el método de Theis. ....	101

Figura 7.12	Interpretación de prueba de bombeo (pozo No.2 Silvituc), por el método de Jacob.....	102
Figura 7.13	Interpretación de prueba de bombeo (pozo Nuevo Veracruz), por el método de Theis.....	103
Figura 7.14	Interpretación de prueba de bombeo (pozo Nuevo Veracruz), por el método de Jacob.....	104
Figura 7.15	Interpretación de prueba de bombeo (pozo Santa Lucia), por el método de Theis.....	105
Figura 7.16	Interpretación de prueba de bombeo (pozo Santa Lucia), por el método de Jacob.....	106
Figura 7.17	Interpretación de prueba de recuperación (pozo Rancho Icaiche), por el método de Jacob.....	107
Figura 7.18	Curva de Theis.....	109
Figura 7.19	Esquema de flujo radial hacia un pozo para el análisis de la solución de Theis.....	110
Figura 7.20	Esquema de la deducción del valor del descenso residual $d_r$ , en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada.....	111
Figura 8.1	Arreglo de Loop coincidente.....	117
Figura 8.2	Localización de la zona de estudio.....	120
Figura 8.3	Localización del perfil con los TEMS en el acuífero Xpujil.....	121
Figura 8.4	Localización del perfil con los TEMS en la zona del poblado Ramón Corona.....	121
Figura 8.5	Localización del perfil con los TEMS en la zona del poblado Constitución.....	122
Figura 8.6	Perfil Geoeléctrico XP Xpujil.....	125
Figura 8.7	Perfil Geoeléctrico en la zona del poblado Ramón Corona.....	126
Figura 8.8	Perfil Geoeléctrico SL, sondeos en Santa Lucia (SL1), Xbonil (XB1) y Constitución (CO1).....	127
Figura 8.9	Mapas de Resistividad a 30, 75, 100 y 120m, en la zona del acuífero Xpujil.....	128
Figura 8.10	Mapas de Resistividad a 30, 50, 75 y 100m en la zona de Ramón Corona.....	129
Figura 8.11	Mapas de Resistividad a 10, 30, 75 y 100 m, en la zona Constitución...	130
Figura 9.1	Proceso de evaluación de la vulnerabilidad (fuente NRC, 1993).....	137
Figura 9.2	Pesos Relativos.....	149
Figura 9.3	Figura 3 - Vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación mediante el método GOD.....	151
Figura 9.4	Trazo del Tren Maya en el acuífero Xpujil.....	157
Figura 9.5	Profundidad al nivel estático de mayo-junio de 2019 del acuífero Xpujil, Campeche.....	162
Figura 9.6	Mapa geológico de la Península de Yucatán, (cartografía tomada del SGM).....	164
Figura 9.7	Modelo conceptual del acuífero Xpujil, Campeche.....	164
Figura 10.1	Localización de aprovechamientos muestreados con medición de parámetros de campo en el acuífero Xpujil, estado de Campeche.....	171



Figura 10.2	Distribución de la composición isotópica estable de las aguas meteóricas a nivel global. Los valores $\delta D$ y $\delta^{18}O$ se ajustan a una recta de pendiente ocho y ordenada al origen 10, denominada Línea Meteórica Global .....	177
Figura 10.3	Evolución isotópica de las aguas superficiales y subterráneas en el ciclo hidrológico. ....	178
Figura 10.4	Evolución isotópica del agua subterránea en cuencas sedimentarias: 1. Hidratación de silicatos, 2. Intercambio con $H_2S$ , $H_2$ e hidrocarburos, 3. Reducción de sulfatos, oxidación de compuestos orgánicos e hidrógeno molecular, 4. Evaporación de agua dulce. ....	179
Figura 10.5	Composición de isótopos estables de los aprovechamientos muestreados del acuífero Xpujil, y de las estaciones de lluvia de la RENIP ubicadas en provincias de precipitación pluvial y fisiográfica cercanas a la zona de estudio .....	182
Figura 10.6	El gradiente de altitud de la composición isotópica de la lluvia determinado con estaciones de la RENIP es de 0.5‰ en la $\delta^{18}O$ por cada 100 metros de elevación sobre el nivel del mar.....	183
Figura 10.7	La variación de la conductividad eléctrica de las muestras de agua subterránea varía de 834 a 2807 $\mu S/cm$ en apenas 1 ‰ en la $\delta^{18}O$ con excepción de los pozos Silvituc 2 y Silvituc 3.....	184
Figura 10.8	Diagrama de Piper con la clasificación de las familias o tipos de agua	185
Figura 10.9	Diagrama de Piper para la clasificación geoquímica de las familias de agua del acuífero Xpujil. ....	186
Figura 10.10	Evolución del agua en el medio subterráneo agua Bicarbonatada-Cálcica y Magnésica a Sulfatada-Cálcica y Magnésica, y Clorurada-Cálcica.....	187
Figura 10.11	Representaciones de iones predominantes en las muestras de pozos del acuífero Xpujil, mediante diagramas de Stiff .....	188
Figura 10.12	Representación mediante diagramas de Stabler de las concentraciones relativas de aniones y cationes mayoritarios del agua de los aprovechamientos, para determinar el tipo de agua geoquímico al que pertenecen.....	189
Figura 10.13	Incremento del $Ca^{++}$ correlaciona con el $SO_4^{=}$ , indicando que ambas especies se agregan mayoritariamente al agua subterránea.....	190
Figura 10.14	Incremento del $Mg^{++}$ correlaciona con el $SO_4^{=}$ , indicando que ambas especies se agregan al agua subterránea. La concentración del $Mg^{++}$ es menor que la del $Ca^{++}$ debido a la composición de la roca.....	191
Figura 10.15	Contenido de tritio ambiental Vs. $\delta^{18}O$ de los aprovechamientos muestreados, junto con los valores correspondientes de cuatro estaciones de la RENIP.....	193
Figura 10.16	Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero Xpujil, estado de Campeche.....	194
Figura 10.17	Subprovincias fisiográficas de la Península de Yucatán (datos geográficos de la dirección general de geografía, INEGI). Resaltando con línea roja el acuífero de Xpujil.....	195

Figura 10.18	Las aguas de los pozos presentan diferentes calidades para irrigación. Los pozos Rancho 3 Reyes, Miguel Alemán y el manantial El Chorro con calidad pobre; los pozos El Cedral, P2 Silvituc, M. Crescencio, N. Veracruz, Caobas Nuevo 2 y Zoh Laguna calidad buena y, únicamente el pozo P3 Silvituc calidad excelente. ....	196
Figura 10.19	Concentraciones de Calcio en mg/L (INEGI, 2016). ....	199
Figura 10.20	Concentraciones de Magnesio en mg/L (INEGI, 2016). ....	202
Figura 10.21	Concentraciones de Sodio en mg/L (INEGI, 2016). ....	205
Figura 10.22	Concentraciones de Potasio en mg/L (INEGI, 2016). ....	207
Figura 10.23	Concentraciones de Dureza en mg/L (INEGI, 2016). ....	210
Figura 10.24	Diagrama Eh-pH del azufre. ....	211
Figura 10.25	Concentraciones de Sulfato en mg/L (INEGI, 2016). ....	215
Figura 10.26	Diagrama de distribución de especies de CO <sub>2</sub> . ....	217
Figura 10.27	Concentraciones de Bicarbonato en mg/L (INEGI, 2016). ....	220
Figura 10.28	Concentraciones de Cloruro en mg/L (INEGI, 2016). ....	224
Figura 10.29	Concentraciones de Nitrato en mg/L (INEGI, 2016). ....	229
Figura 10.30	Concentraciones de Fosfato en mg/L (INEGI, 2016). ....	231
Figura 10.31	Valores de STD en mg/L (INEGI, 2016). ....	232
Figura 10.32	Elevación del nivel freático- Península de Yucatán (Bauer-Gottwein et al., 2011). ....	233
Figura 10.33	Dirección de flujo del agua subterránea en la Península de Yucatán (CONAGUA, 2008). ....	234
Figura 10.34	Dirección del flujo en el acuífero Xpujil. ....	235
Figura 10.35	Ubicación de los sitios de medición propuestos en el acuífero Xpujil. ....	236
Figura 10.36	Dataloggers comerciales de a) Cambell Scientific, b) OTT HydroMet y c) National Instruments ....	237
Figura 10.37	Fotografía de la sonda PLS-C de OTT ....	239
Figura 10.38	Imagen de la Hoja de calibración de la sonda PLS-C, conocida como FAT, de las siglas en ingles "Factory Acceptance Test" ....	240
Figura 10.39	Diagrama lógico del prototipo para medición de nivel, temperatura y conductividad de aguas subterráneas. ....	243
Figura 10.40	Fotografía donde se muestra el gabinete y del panel fotovoltaico que integran propuesta de la estación de medición. ....	243
Figura 10.41	Esquema donde se muestra la posición en la que debe estar o debe ser instalado el equipo de medición dentro del pozo. ....	244

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Límites oficiales del acuífero Xpujil (0405).....	23
Tabla 3.2	Variación de la Disponibilidad en el tiempo .....	24
Tabla 3.3	Características de los aprovechamientos y agua subterránea en zonas del municipio de Calakmul (IDESMAC, 2014).....	30
Tabla 3.4	Estimación de la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de la población del municipio de Calakmul en el año 2030.....	48
Tabla 3.5	Resultados de análisis de calidad del agua en algunos cenotes de Calakmul.....	49
Tabla 4.1	Aprovechamientos censados en el acuífero Xpujil .....	69
Tabla 5.1	Nivelación de brocales en pozos de observación.....	78
Tabla 6.1	Profundidad al nivel estático en el acuífero Xpujil, Campeche. ....	79
Tabla 6.2	Elevación del nivel estático en el acuífero Xpujil.....	81
Tabla 7.1	Datos de los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo y/o recuperación .....	84
Tabla 7.2	Tiempos en la etapa de bombeo y recuperación de las pruebas.....	86
Tabla 7.3	Tiempos de medición del nivel durante la etapa de bombeo .....	86
Tabla 7.4	Tiempos de medición del nivel durante la etapa de recuperación .....	87
Tabla 7.5	Fechas de realización de las pruebas de bombeo .....	87
Tabla 7.6	Valores de transmisividad y Conductividad hidráulica.....	116
Tabla 8.1	Zonificación Geoeléctrica resultado de la exploración geofísica. ....	123
Tabla 9.1	Las muchas formas de definir la vulnerabilidad del agua subterránea. ....	132
Tabla 9.2	Principales características geológicas e hidrológicas que influyen en la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación (Fuente: NRC, 1993).....	135
Tabla 9.3	Métodos de superposición e índice utilizados para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación. ....	142
Tabla 9.4	Modelos basados en procesos que se pueden usar para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación. ....	143
Tabla 9.5	Métodos combinados y estadísticos utilizados para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación. ....	145
Tabla 9.6	Ejemplo de valores para la estimación del Índice DRASTIC. ....	147
Tabla 9.7	Ajustes de pesos de DRASTIC. ....	148
Tabla 9.8	Criterio de vulnerabilidad determinado mediante el método DRASTIC.....	148
Tabla 9.9	Criterio de vulnerabilidad determinado mediante el método DRASTIC. 150	
Tabla 9.10	Parámetros del método SI y su peso correspondiente. ....	151
Tabla 9.11	Principales clases de ocupación del suelo y sus correspondientes valores de uso del suelo (LU).....	152
Tabla 9.12	Criterios para la evaluación de la vulnerabilidad en el método SI.....	152
Tabla 9.13	Rango de valores del índice DRASTIC e intervalos de Vulnerabilidad.158	
Tabla 9.14	Índices de ponderación .....	160
Tabla 9.15	Factores de ponderación del método DRASTIC. ....	161

Tabla 9.16	Valor de los parámetros, índice de ponderación y valor del índice de vulnerabilidad obtenido mediante el método DRASTIC. ....	167
Tabla 10.1	Resultados de campo de aprovechamientos de agua subterránea del acuífero Xpujil, estado de Campeche. ....	172

## **1 GENERALIDADES**

### **1.1 Antecedentes**

El proyecto de tren para potenciar la oferta turística del mundo maya tiene como antecedente más reciente el anuncio del Gobierno Federal en 2012, de construir una vía férrea de Mérida a Cancún, que finalmente fue cancelada en 2015. México desarrolló en las últimas tres décadas proyectos turísticos en la región maya, como iniciativa Ruta del Mundo Maya lanzada en 1988 con Guatemala, Belice, Honduras y El Salvador, con el respaldo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). La alianza pretendía aprovechar los recursos arqueológicos, naturales y culturales de la antigua cultura maya, en ciudades como Uxmal, Chichén Itzá, Bonampak, Palenque y Tikal. Uno de los temas centrales de esta iniciativa fue emitir un visado turístico único para facilitar a los visitantes el acceso a los centros arqueológicos. A finales del siglo XX, diversas aerolíneas regionales apostaron por los aviones para llevar visitantes a la región maya de México. En 2012, México y Centroamérica llevaron a la Feria de Turismo de España la ruta del mundo maya como una idea conjunta para promover y difundir un recorrido por 100 centros arqueológicos de esa cultura común. La zona por donde se planea que pase el tren maya tiene un alto nivel de marginación y su construcción podría ser "detonante económico porque hay muchos pueblos que saldrían beneficiados", dijo Reynaldo Dzib, gerente de la operadora turística Cancun Travel Group, que opera desde 1997. Turísticamente el proyecto tiene potencial "porque llegará a zonas donde jamás hubiera llegado de manera rápida y económica", aseguró Dzib, quien resaltó la oportunidad de empleo para los habitantes de la región. Recordó que actualmente la conexión Cancún-Chiapas se puede hacer en autobús o en avión, "pero si se conectas en tren, como se hace en las rutas cortas de Europa, sería fenomenal; es un detonante económico muy interesante". De acuerdo con cifras de la Secretaría de Turismo de Quintana Roo, durante 2017 se registraron en el estado 16.9 millones de visitantes que dejaron una derrama económica de unos 8 mil 810 millones de dólares. En este sexenio, el Gobierno Federal propuso invertir entre 120 y 150 mil millones de pesos en un tren que integre los principales puntos de la región maya. Por lo anterior el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ha propuesto llevar a cabo el Estudio hidrogeológico del acuífero Xpujil, Campeche., que contribuirá con la información necesaria para ubicar sitios para la perforación de pozos de abastecimiento de agua potable para las estaciones del tren Maya; estudiar la factibilidad de llevar a cabo la disposición del agua residual tratada, así como recomendar acciones tendientes al cuidado de la reserva de la biosfera de Calakmul (Área Natural Protegida).

### **1.2 Objetivos**

Determinar y/o actualizar el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas del acuífero Xpujil para tener la información necesaria para ubicar sitios para la perforación de pozos de abastecimiento de agua potable para la estación del Tren Maya; estudiar la factibilidad de llevar a cabo la disposición del agua residual tratada, así como definir el impacto del Tren Maya-Polos de desarrollo en la calidad del acuífero y recomendar acciones tendientes al cuidado del Área natural protegida.

## 1.1 Área de estudio

El acuífero Xpujil (0405), se localiza al sureste del estado de Campeche (Figura 1.1), a una distancia aproximada de 300 km de la capital del estado y en la parte sur-central de la Península de Yucatán, geográficamente limita al norte con el paralelo  $19^{\circ} 00' 00''$ , al sur con la República de Guatemala y al oeste con el meridiano  $89^{\circ} 38' 00''$  (CONAGUA, 2015).

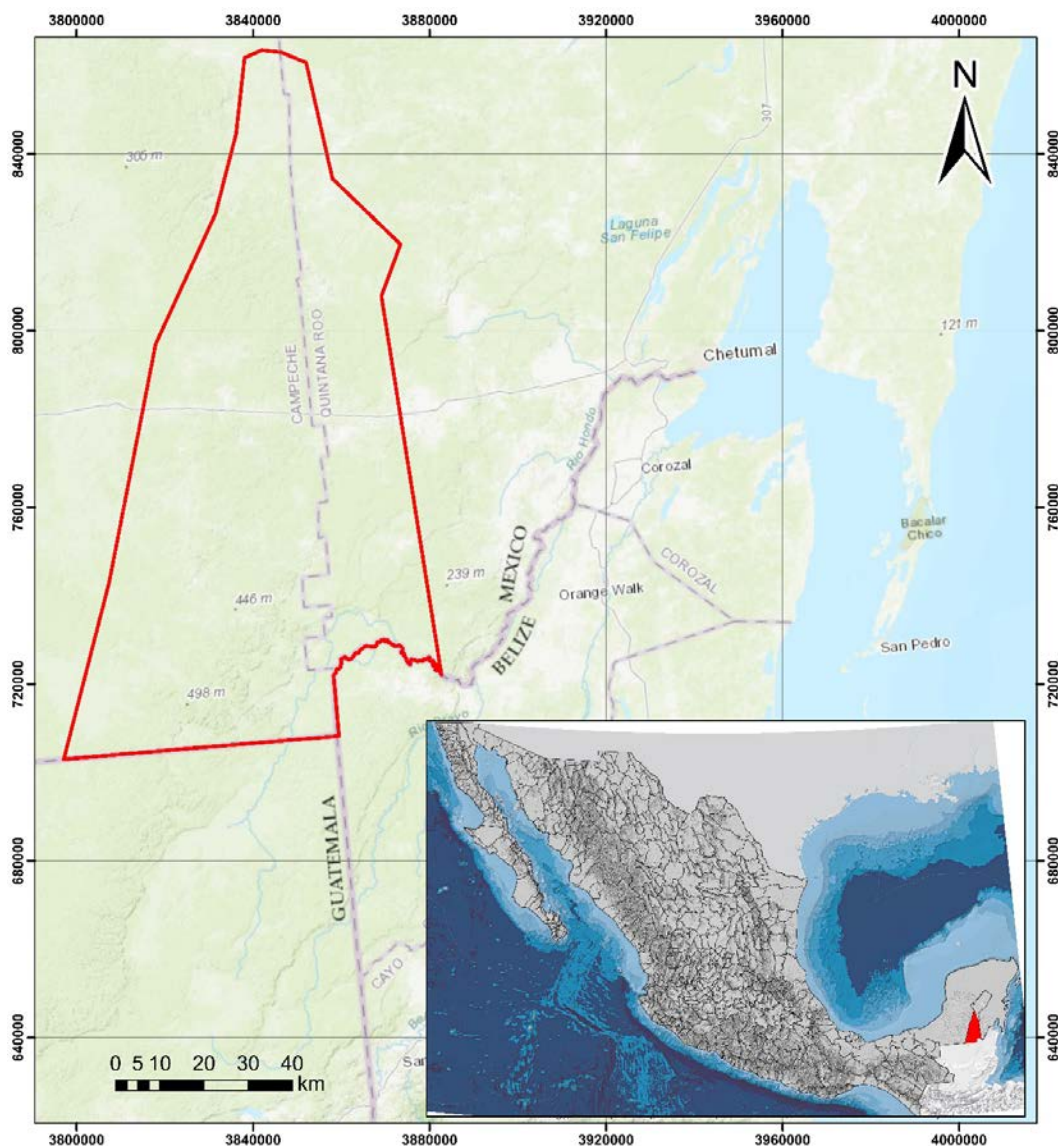


Figura 1.1 Localización de la zona de estudio

## **1.2 Metodología**

La metodología aplicada para la consecución del objetivo del estudio consiste en las siguientes actividades:

### **Síntesis del conocimiento actual del acuífero, recopilación y análisis de estudios previos**

Se consultó y recopiló la información hidrogeohidrológica relacionada con el objetivo del presente estudio, con el fin de obtener un conocimiento de la información generada en estudios realizados con anterioridad en la zona.

### **La descripción del entorno socioeconómico, fisiográfico, geológico, geomorfológico, climatológico e hidrológico**

Se describirán las principales actividades socioeconómicas que se realizan en las localidades y municipios comprendidos dentro de los límites del acuífero, así como el número de habitantes en localidades rurales y urbanas, la población total de acuerdo a la información del conteo de población más reciente efectuado por el INEGI, incluido el análisis de crecimiento poblacional.

Se describirá la fisiografía que corresponde al área de estudio y explicará la génesis y evolución de sus formas terrestres. También se establecerán los elementos involucrados en el análisis geológico, geomorfológico, climatológico e hidrológico con su significado y aplicabilidad en la zona de estudio. Se describirán los tipos de clima predominantes en la zona de estudio. En cuanto a las variables climatológicas de interés, se analizará la información histórica de la precipitación, temperatura y evaporación potencial para calcular las medias anuales e identificar periodos de sequías, lluvias extraordinarias, evaporaciones o altas temperaturas que permitan calcular adecuadamente estas componentes en cada uno de los periodos seleccionados. Se presentaran aspectos de la hidrología superficial y la interacción que guarda con el agua subterránea.

Se presentara el modelo geomorfológico que defina y sustente el contexto hidrogeológico que conforma la zona de estudio mediante la determinación de los factores geomorfológicos que controlan la dinámica del agua subterránea.

También se presentará el modelo geológico que defina y sustente el contexto hidrogeológico que conforma la zona de estudio. Será necesario describir el marco geológico superficial detallado, así como la descripción estratigráfica de las unidades geológicas presentes en el acuífero, además de la descripción de la geología estructural y la geología del subsuelo con base en el mapa geológico del área de estudio. Este modelo geológico también deberá contener las unidades lito estratigráficas y ambientes de depósito del área en cuestión, así como las estructuras geológicas relevantes en la zona de estudio. Se incluirá el mapa geológico, columna estratigráfica y secciones geológicas pertinentes que mostraran la geología estructural

y la disposición y distribución de las unidades geológicas en el subsuelo. Se entregaran los archivos digitales del mapa geológico en *Arcgis*.

### **Actualización piezométrica en el acuífero Xpujil y en las zonas de Calakmul, Hopelchen Y Constitución.**

Se realizarán recorridos de campo en la zona de estudio, con el objeto de identificar los aprovechamientos existentes, así como la medición de la profundidad al nivel estático y/o dinámico. Para ello será habilitada una brigada con Pick up, GPS, sondas eléctricas, cámara fotográfica y un formato de registro donde anotaran todos los parámetros útiles y necesarios. Se estima que el levantamiento piezométrico se realizará en aproximadamente 50 pozos.

De acuerdo con los resultados del censo de aprovechamientos, se seleccionara una red de pozos de observación piezométrica y de calidad del agua.

### **La nivelación de brocales (30)**

De acuerdo con la actualización piezométrica y la selección de la red de pozos de observación, la cual se estima se componga de aproximadamente 30 aprovechamientos a los cuales se les determinara la elevación del brocal, con el objeto de referir las mediciones del nivel estático al nivel medio del mar y con ello determinar la elevación del nivel estático y dirección del flujo.

### **La configuración y análisis de la profundidad al nivel estático, elevación del nivel estático, evolución del nivel estático y dirección de flujo**

Con la información resultante del levantamiento piezométrico y la nivelación de los brocales se construirán la o las configuraciones de la elevación del nivel estático y con ello serán trazadas las líneas de flujo determinando la dirección preferencial del flujo subterráneo en la zona de estudio. De contar con información piezométrica previa se calcularan las evoluciones en el acuífero.

### **La determinación de parámetros hidráulicos (pruebas de bombeo y/o inyección)**

Con objeto de determinar los parámetros hidrogeológicos del acuífero Xpujil. Se realizaran cinco pruebas de bombeo y/o pruebas de inyección.

### **La geofísica**

La prospección geofísica, consistente en la realización de 9 sondeos nos permitirá definir en base a la conductividad eléctrica que presentan los materiales geológicos sus características litológicas y con ello definir su potencial geohidrológico, investigando hasta una profundidad de aproximadamente 150 m., con lo que junto con las demás actividades hidrogeológicas realizadas nos permitirá decidir sobre los sitios para la perforación de pozos de abastecimiento de agua potable para la Estación del Tren Maya.



## **La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Xpujil**

Se aplicará el método paramétrico DRASTIC para la valoración de la posible afectación a las aguas subterráneas en Xpujil por las obras lineales de la vía férrea del Tren Maya.

### **Análisis físico-químico e isotópico**

Durante la visita de campo para la recolección de las muestras de agua para los análisis, se medirán los parámetros de campo en los aprovechamientos seleccionados como la temperatura del agua, del ambiente, la conductividad eléctrica, el pH y potencial redox.

Se llevará a cabo la recolección de muestras de agua subterránea en 10 sitios para análisis físico-químicos e isotópicos. Los elementos que serán analizados en laboratorio incluirán: calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sílice, nitratos, sólidos totales disueltos, dureza, alcalinidad total, arsénico, plomo, etc. La selección de estos sitios será en base a criterios hidrogeológicos, a la disponibilidad y ubicación espacial de los aprovechamientos existentes.

Las muestras de agua recolectadas se filtrarán y se preservarán convenientemente con temperatura y con ácido de ultra pureza. Las muestras se analizarán en laboratorios certificados ante la Entidad Mexicana de Acreditamiento o equivalentes.

Con objeto de determinar la altura de recarga del agua de los diferentes sitios muestreados se analizarán los contenidos de deuterio (H-2) y oxígeno-18 (O-18). Asimismo, para determinar la edad relativa del agua se determinará la concentración de tritio Ambiental.

### **Análisis de tecnologías existentes y prototipo**

Se llevará a cabo la revisión de los datos de calidad del agua y niveles estáticos y/o dinámicos de la red de pozos de monitoreo del acuífero. Para ello, se elaboraran estadísticos y mapas de los principales parámetros de calidad entre los que se encuentran conductividad eléctrica, pH, temperatura, sólidos totales disueltos, arsénico, etc.

A partir del análisis realizado en el punto anterior, se definirán los sitios que deben conformar la propuesta de red de monitoreo del acuífero Xpujil, considerando las principales variables de calidad del acuífero, así como las variaciones en los niveles estáticos y/o dinámicos del agua subterránea del acuífero.

Se llevará a cabo la revisión de las tecnologías existentes en el mercado para el monitoreo de las principales variables de la calidad del agua del acuífero. Para ello se tomara en cuenta los costos de adquisición y mantenimiento, los rangos de medición de cada variable, la precisión, así como profundidad de monitoreo. A partir de lo anterior, se definirán los parámetros que deberán estar considerados en el prototipo y se incluirán los costos de su desarrollo y mantenimiento respectivo.

**La edición e impresión del informe final.** Una vez concluidos los trabajos anteriores, se elaborará un informe que contendrá la descripción de las actividades realizadas en el proyecto, los resultados alcanzados, así como las conclusiones y recomendaciones que se deriven. Este documento irá acompañado con mapas, figuras, tablas y con todo aquel material accesorio necesario. Se realizará la presentación del informe, resultados, conclusiones y recomendaciones.

## 2 SÍNTESIS DEL CONOCIMIENTO ACTUAL DEL ACUÍFERO, RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ESTUDIOS PREVIOS

Se recopiló toda la información disponible que permitió definir la situación actual de conocimiento hidrogeológico del área de estudio.

A continuación en cada una de las tablas se hace una descripción del nombre del estudio recopilado, fecha de realización, compañía consultora, el tipo de estudio, objetivos y resultados alcanzados:

<b>DOCUMENTO</b>	<b>Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Xpujil (0405), estado de Campeche</b>																																																		
<b>FECHA</b>	2015																																																		
<b>AUTORES</b>	Comisión nacional del Agua																																																		
<b>TIPO</b>	Estudios																																																		
<b>OBJETIVOS</b>	La justificación de la disponibilidad de aguas subterráneas de la Unidad Hidrogeológica denominada Xpujil para el otorgamiento de concesiones y/o asignaciones.																																																		
<b>RESULTADOS</b>	<p>Como un resultado de los estudios técnicos recientes, se concluye que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual del agua. La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014:</p> <table border="1" data-bbox="539 1373 1401 1503"> <thead> <tr> <th colspan="9">DCXXXVI REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "PENÍNSULA DE YUCATÁN"</th> </tr> <tr> <th rowspan="2">CLAVE</th> <th rowspan="2">ACUÍFERO</th> <th>R</th> <th>DNCOM</th> <th>VCAS</th> <th>VEXTET</th> <th>DAS</th> <th colspan="2">DÉFICIT</th> </tr> <tr> <th colspan="7">CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th colspan="9">ESTADO DE CAMPECHE</th> </tr> <tr> <td>0405</td> <td>XPUJIL</td> <td>2,099.4</td> <td>1,784.1</td> <td>2.585524</td> <td>0.5</td> <td>312.714476</td> <td colspan="2">0.000000</td> </tr> </tbody> </table> <p>R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.</p> <p>Disponibilidad de aguas subterráneas. La disponibilidad de aguas subterráneas conforme a la metodología especificada en la NOM-011, se obtiene al restar el volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA, que de acuerdo con la expresión anterior, resulto ser de 215,300,000 m<sup>3</sup>/año.</p>								DCXXXVI REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "PENÍNSULA DE YUCATÁN"									CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES							ESTADO DE CAMPECHE									0405	XPUJIL	2,099.4	1,784.1	2.585524	0.5	312.714476	0.000000	
DCXXXVI REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA "PENÍNSULA DE YUCATÁN"																																																			
CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT																																												
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES																																																	
ESTADO DE CAMPECHE																																																			
0405	XPUJIL	2,099.4	1,784.1	2.585524	0.5	312.714476	0.000000																																												

	<p>La unidad hidrogeológica Xpujil comprende una superficie de 11,061 km<sup>2</sup>, los municipios que la integran son Holpechen (50%) y Calakmul (30%).</p> <p>Se observa que la roca superficial de la zona ha sido fuertemente atacada por el intemperismo y la disolución, originando que el agua de lluvia que escurre superficialmente se infiltre incorporándose al acuífero, cuyas profundidades varían desde 30 hasta 150 m, a través de los pozos naturales de recarga (Xuch en lengua maya), por lo que se infiere que se trata de una buena zona almacenadora, sin embargo se ha constatado que su composición química la restringe para consumo humano, ya que al disolverse la matriz rocosa, provoca altas concentraciones de sulfatos, por lo que se ha generalizado la captación de agua de lluvia por medio de aljibes y el aprovechamiento de aguadas y lagunas a pesar de que estas presentan ciertos problemas de contaminación orgánica generada principalmente por el fecalismo al aire libre.</p> <p>A últimas fechas se han intensificado las perforaciones en la zona sur, específicamente en la zona del Clavito, Nuevo Veracruz, Santa Rosa y Dos naciones; en las cuales la calidad del agua es buena, ya que al parecer se ubican fuera de la zona de yesos; sin embargo, se requiere efectuar una serie de trabajos de campo que permitan conocer mejor las posibilidades y potencial de esta zona. El volumen de extracción según el Registro Público de Derechos de Agua concesionado al 30 de abril de 2002 en esta zona suma un total de 0.5 Mm<sup>3</sup>/año.</p>
--	---

<b>DOCUMENTO</b>	<b><i>Evaluación de la calidad del agua subterránea en varias localidades de los Municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José Ma. Morelos del estado de Quintana Roo.</i></b>
<b>FECHA</b>	2012
<b>AUTORES</b>	Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA). <i>Consultoría Betsco S.A. de C.V.</i>
<b>TIPO</b>	Estudio
<b>OBJETIVOS</b>	<p><b>Generales:</b> Realizar un estudio de monitoreo de la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento en 40 localidades de los Municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José María Morelos con el fin de evitar la sobreexplotación de fuentes de abastecimiento de agua y eficientar su uso, manejo y aprovechamiento, además de establecer un sistema de monitoreo y evaluación (indicadores) en toda la zona de estudio.</p> <p><b>Específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contar con un diagnóstico sobre la calidad del agua así como con un modelo conceptual para configurar las direcciones preferenciales del flujo de las aguas subterráneas en el área de estudio que reconozca la heterogeneidad espacial hidrogeológica y que permita orientar el desarrollo urbano de la región.</li> <li>• Caracterizar el acuífero, mediante la determinación de valores piezométricos, parámetros físicos, químicos y bacteriológicos del agua.</li> <li>• Diseño de una red de monitoreo que proporcione información piezométrica y de calidad del agua para el monitoreo adecuado del acuífero y flujos subterráneos de la zona de estudio.</li> <li>• Identificar zonas de mayor potencial para la definición de futuras zonas de reservas.</li> </ul>
<b>RESULTADOS</b>	<p>El estudio abarca tres municipios: Othon P. Blanci, Jose Maria Morelos y Bacalar, Quintana Roo (todos ellos colindan con el acuífero Xpujil en su porción Poniente).</p> <p>Con respecto a la piezometria, se midio la profundidad al nivel estático (PNE) en 51 pozos de los 60 inspeccionados. <b>La importancia de esta actividad radica en que los municipios de Othon P. Blanco, Bacalar y Jose Maria Morelos en su porción occidental colindan con el acuífero en estudio Xpujil.</b></p> <p>A continuación se muestran las configuraciones de la profundidad al nivel estático, elevacion y dirección del flujo subterráneo en la zona oriente del acuífero Xpujil:</p>

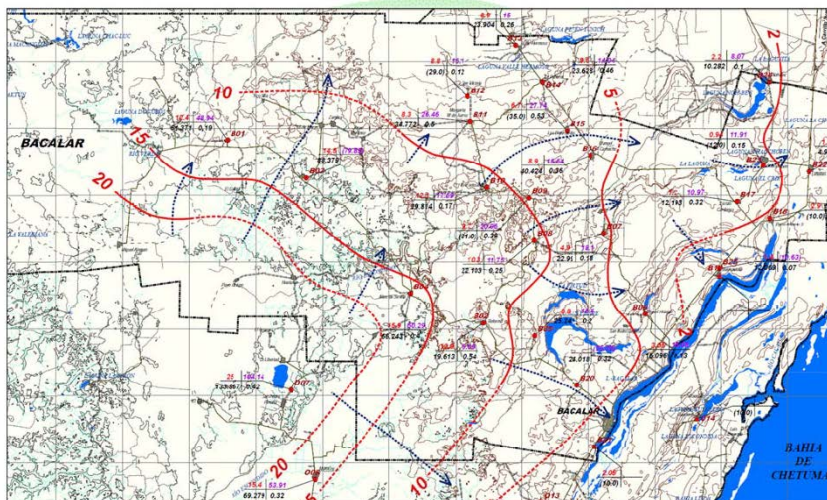


Figura 7.9 Configuración del nivel estático en la zona de Bacalar (datos de octubre 2012)

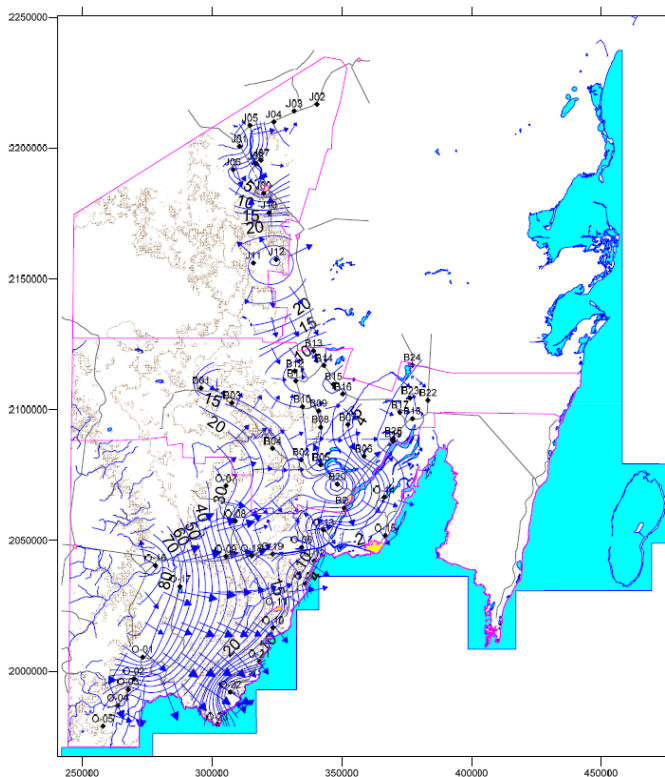


Figura 7.7 Configuración de la elevación del nivel estático mediante el programa Surfer V.11 con valores por omisión

La configuración permite establecer, para los municipios de Othón P. Blanco y Bacalar, que el agua aparentemente fluye desde las zonas internas altas con elevaciones cercanas a los 80 y 30 msnm, respectivamente, y se conduce hacia las porciones bajas: río Hondo y zona de Lagunas. Para la zona de José Ma. Morelos, dado la limitación de datos utilizados se aprecia varias direcciones de flujo en direcciones radiales desde la región de Pimienta (sitio con mayor

elevación) hacia las zonas bajas de las lagunas correspondientes.

**Hidrogeoquímica.-** Con objeto de actualizar el conocimiento de la geoquímica y calidad del agua subterránea de la zona sur del estado de Quintana Roo se tomaron sesenta (60) muestras de agua en diversos aprovechamientos espacialmente distribuidos en los municipios de José Ma. Morelos, Bacalar y Othón P. Blanco; la selección de los sitios de muestreo se realizó para tratar de representar las diferentes condiciones hidrogeológicas, de común acuerdo con la supervisión de CCPY y del personal de CAPA; asimismo se consideraron los resultados y distribución de análisis realizados por estudios anteriores. Se tomaron 12 muestras en José Ma. Morelos, 25 en Bacalar y 23 en el municipio de Othón P. Blanco. En la **Figura 7.10** se presenta la distribución de las muestras tomadas en los municipios.

Los análisis físico-químicos realizados en laboratorio incluyeron la determinación de iones mayores: Bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), Sulfatos ( $\text{SO}_4^{=}$ ), Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ), Sodio ( $\text{Na}^+$ ) y Potasio ( $\text{K}^+$ ); así como ensayos para determinar la calidad del agua subterránea, como son el Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), Hierro ( $\text{Fe}^{++}$ ), Grasas y Aceites (GA), Nitrógeno Amoniacal ( $\text{N-NH}_4$ ), Turbiedad (T), Fosforo (P), Dureza Total (DT) y los Sólidos Totales Disueltos (STD). Durante los recorridos de campo se tomaron también las mediciones de pH, Temperatura, Conductividad eléctrica (CE), Índice Redox (Eh) y el Oxígeno Disuelto (O.D). En el Anexo de Resultados de Laboratorio, se incluyen los formatos del laboratorio con las determinaciones obtenidas. A continuación se mencionan los resultados obtenidos del procesamiento hidrogeoquímico y en el subcapítulo VII.4 se incluyen los resultados relacionados con la calidad del agua.

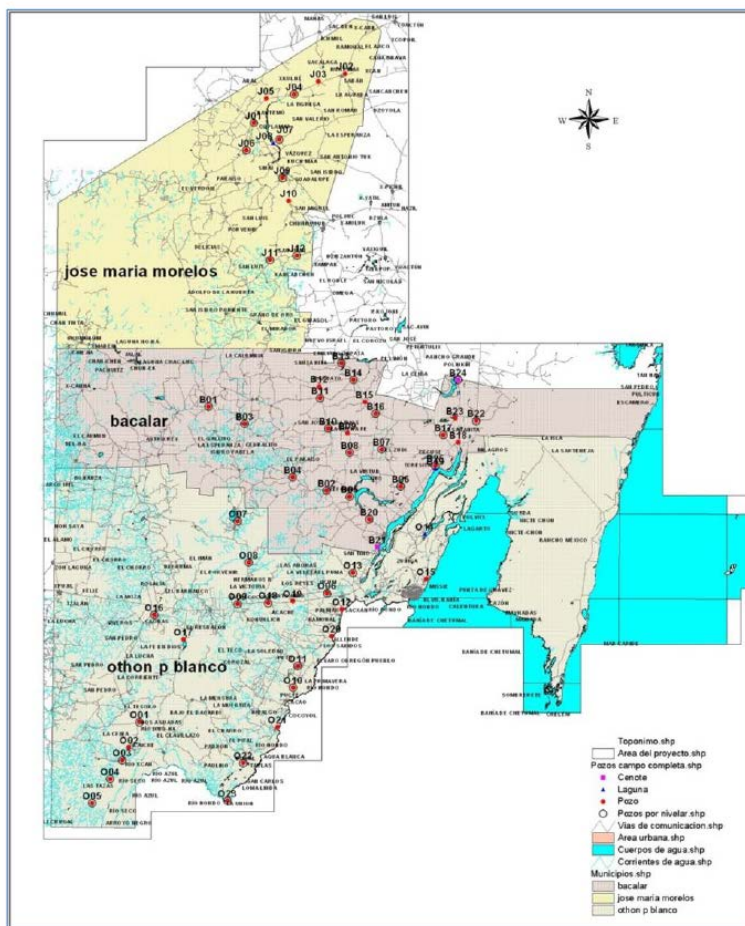


Figura 7.10 Ubicación de los sitios de muestreo

**Caracterización Hidrogeoquímica.-** Con objeto de establecer los posibles orígenes del agua subterránea y la identificación de los principales procesos geoquímicos, se parte de la caracterización hidrogeoquímica mediante la aplicación del Diagrama de Stiff y de la distribución de la Salinidad a través del análisis de la Conductividad Eléctrica del agua.

Diagramas de Stiff.- La clasificación de los tipos de aguas se realizó mediante los Diagramas de Stiff; en este tipo de diagramas es posible representar la composición de las muestras de agua subterránea de acuerdo con las concentraciones de los elementos mayores (en miliequivalentes por litro); en la porción derecha de diagrama se representan los aniones y en la izquierda los cationes. Se toma el diagrama de Stiff modificado,

**Figura 7.11.**  
**Figura 7.11 Diagrama de Stiff utilizado**



<b>DOCUMENTO</b>	<b>Estudio hidrológico, hidráulico y de calidad del agua en la zona de influencia del Tren Maya (Conducción de agua potable para comunidades de nueva creación en el municipio de Calakmul)</b>
<b>FECHA</b>	2018
<b>AUTORES</b>	Instituto Mexicano de tecnología del Agua
<b>TIPO</b>	Estudio
<b>OBJETIVOS</b>	Establecer una metodología para el suministro de agua potable en las zonas donde se tendrán las Estaciones del Tren Maya, así como población local y flotante.
<b>RESULTADOS</b>	<p><b>Conclusion del analisis del estudio hidrológico.</b> La calidad del agua subterránea en el acuífero Xpujil, el cual esta constituido por yesos, proporciona que el agua no sea potable debido a la presencia de sulfatos en concentraciones mayores a los 800 mg/l. Por este motivo el estudio propone extraer agua del acuífero aledaño a Xpujil, en las zonas denominadas como “Constitución” en Escarcega y en la localidad denominada como “Ramon Corona” al norte de Xpujil y conducirla hasta la zona de interes. Cabe señalar que los sulfatos en la zona de Constitución fluctuan entre 603-744 mg/l. Se presentan un analisis de costos.</p> <p>Resultados del Estudio: En el acuífero Xpujil, se localizan dos probables estaciones del Tren Maya en la zona de Calakmul y Xpujil. Con respecto a la calidad del agua en estas localidades, se identificaron las estaciones de Calidad del agua de los sitios de monitoreo para agua subterránea, dentro del buffer de 1 km a ambos lados de la ruta del Tren Maya, resultando en 16 estaciones con datos que van de 2015-2017. Todos los sitios corresponden al Acuífero de La Península de Yucatán (Figura 6.6 y Tabla 6.2).</p>



Figura 6.6. Sitios de la RNMCA de aguas subterráneas en un buffer de 1 km.

Tabla 6.2 Sitios de la RNMCA y sus años de registro.


Sitio	Nombre	Años de Registro
DLCAM217M1	Pozo del Sistema de Agua Potable De Candelaria-Campeche	2016-2017
DLCAM226	Pozo 1 Oriente de La Galería Filtrante De China	2015-2017
DLCAM227	Pozo del Sistema de Agua Potable De Uayamon	2015-2017
DLCAM249	Pozo 1 del Sistema de Agua Potable De Hecelchakan	2015-2017
DLCAM250	Pozo del Sistema de Agua Potable De Pomuch	2015-2017
DLCAM252	Pozo del Sistema de Agua Potable De Dzitbalche	2015-2017
DLCAM256	Pozo del Sistema de Agua Potable De Centenario	2015-2017
DLCAM266	Pozo 1 del Sistema de Agua Potable De Escárcega	2015-2017
DLQUI2163	Pozo 7 Nuevos Horizontes	2015-2017
DLQUI2180	Pozo 8 de La Zona De Captación Isla Mujeres	2015 y 2017
DLQUI2182	Pozo 2 de La Zona De Captación Aeropuerto (Antigua)	2015-2017
DLQUI2215	Pozo 3 Del Sistema De Agua Potable De Felipe Carrillo Puerto	2015-2016
DLQUI2258	Pozo 1 Del Sistema De Agua Potable Del Ejido Cafetal-Limonos	2015-2016
OCPYU4953W1	Anillo de Cenotes De Yucatán5	2016-2017
OCPYU4960	Itzincab	2015-2017
OCPYU4962	Pozo 10 Centro Deportivo del Sur	2015-2017

Los resultados que se obtuvieron muestran una calidad que va de dulce a ligeramente salobre, teniendo los valores más altos en el estado de Campeche y Quintana Roo (Figura 6.7).



Figura 6.7. SDT promedio anual de 2015-2017

En el capítulo **8 Conducción de agua potable para comunidades de nueva creación en el municipio de Calakmul**. Se presenta el subcapítulo 8.1. **Caracterización del agua en el Municipio de Calakmul**. Donde se menciona que de la información disponible se presenta la sección geohidrológica desde la costa hasta los límites del municipio de Calakmul (Figura 8.1), del cual se tienen caracterizados 13 pozos, y cuya información se muestran en la Tabla 8.1. Considerando estos datos, se estima que, con pruebas piloto realizadas con agua de similar calidad, se debería utilizar como tratamiento la nanofiltración de baja presión, que es el proceso más económico de membranas, donde el agua producto (permeado) queda estable, es decir, no habría necesidad de remineralizarla, con un costo aproximado de \$4.5/m<sup>3</sup>.

<b>DOCUMENTO</b>	<i>Estudio geohidrológico y geofísico en el municipio de Calakmul, en el estado de Campeche</i>
<b>FECHA</b>	2014
<b>AUTORES</b>	Comisión nacional del Agua. Dirección Local Campeche
<b>TIPO</b>	Estudio
<b>OBJETIVOS</b>	<p>Conocer el potencial hidráulico del acuífero Xpujil (0405) para contar con los elementos técnicos suficientes para proveer de agua a las 340 comunidades que se asientan en él; con la problemática de estar muy dispersas y además, de existir más de 240 con menos de 10 habitantes. Por lo anterior, se ha dado a la tarea de evaluar el potencial hidráulico para proponer una estrategia que les dé sustentabilidad.</p> <p>Esta estrategia se sustenta en:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Conocer el potencial hidráulico del acuífero a través de observar, entender, predecir y proveer</li> <li>2. Contar con los elementos técnicos para determinar la disponibilidad del agua,</li> <li>3. Evaluar la calidad del agua,</li> <li>4. Distribuir el recurso,</li> <li>5. Controlar el acuífero, apoyada con políticas e información actualizada que permitan tomar la oportuna toma de decisiones.</li> </ol>
<b>RESULTADOS</b>	<p>El estudio se realizó en una superficie de 10,000 km<sup>2</sup>, cuya poligonal cubre una parte del territorio del estado de Quintana Roo, dentro de una porción de los límites del acuífero Xpujil.</p> 

**Con los siguientes resultados:**

1. La información recopilada, adquirida, procesada, analizada e interpretada sobre las condiciones que se presentan en el acuífero Xpujil permiten definir que la zona de estudio presenta condiciones poco favorables para extraer agua subterránea y aprovecharla con fines de abastecimiento para satisfacer las necesidades de las comunidades que se asientan en ella.
2. Por su ubicación y por las condiciones topográficas del “acuífero” esta consultora considera que la zona es un área de recarga para la parte suroriente del acuífero Península de Yucatán.
3. La presencia de flujo subterráneo en el “acuífero”, sólo corresponde al tránsito del agua que se acumula en la parte alta y empieza a manifestar el flujo subterráneo a partir de la cota con elevación de 250 msnm, para abastecer al acuífero Península de Yucatán en su parte suroriente
4. La parte topográfica alta, en donde se asientan las poblaciones de Zho Laguna Xpujil y La Guadalupe se considera como zona de acumulación de agua; la unidad de arcilla carbonatada actúa como un “acuitardo”, los niveles freáticos se ubican debajo de los 3 m de profundidad en promedio.
5. Las fuentes de abastecimiento sustentable para las poblaciones y comunidades que se asientan en el acuífero Xpujil, se ubican en la porción nororiente y suroriente, las cuales deben monitorearse continuamente y sobre todo, para la parte sur identificar cuál es la fuente de recarga de esta zona.
6. El estudio aporta información necesaria para tomar la decisión de realizar un estudio para caracterizar con más detalle las condiciones del subsuelo y poder definir sitios donde realizar perforaciones exploratorias.
7. El volumen de extracción obtenido en el área evaluada es del orden de los 2 Hm<sup>3</sup>/año valor muy cercano al cuantificado en el Documento de Actualización de la Disponibilidad Media Anual de agua subterránea, Acuífero Xpujil (0405). Estado de Campeche, publicado en 2013 de 2.209 Hm<sup>3</sup>/año, valor muy cercano a la cifra oficial.
8. No se cuenta en estos momentos con la información suficiente para decidir en qué sitios realizar perforaciones exploratorias y menos aún dar un valor real de la disponibilidad del acuífero.
9. Se recomienda caracterizar estructuralmente con mayor detalle la zona oriente para definir las estructuras y contactos geológicos laterales que se presentan entre los yesos con intercalación de calizas y las calizas arcillo arenosas del Eoceno no diferenciado.
10. Para evaluar la disponibilidad se sugiere reducir los límites del acuífero en su parte occidental iniciando a partir de la cota con elevación topográfica de 250 msnm.

**Los resultados obtenidos se sustentan por:**

- Análisis de la información geológica regional y del subsuelo apoyado con 40 sondeos geofísicos aplicando la técnica de sondeo electromagnético en el dominio del tiempo con una profundizado de investigación de hasta 200 m.
- Actualización del censo de aprovechamientos de 45 pozos en la parte del municipio de Calakmul.
- Medición de los niveles estático y dinámico.
- Cálculo de la hidrometría obteniendo datos de caudal, tiempo de operación de los pozos, situación de obra y análisis de información de uso de suelo y de demografía.
- Ejecución de una prueba de bombeo.

**Acciones complementarias:**

1. Complementar el estudio cubriendo toda el área correspondiente al acuífero y actualizar la información del censo de aprovechamientos para conocer los volúmenes de extracción.
2. Correlacionar la información obtenida en campo con la información que proporciona el REPDA.
3. Realizar un estudio de costo beneficio para conocer qué tan costoso resulta el tratamiento del agua de los pozos que aportan agua con alto contenido de sulfato de sodio contra traerlo de 80 km de distancia, en caso de que la exploración geofísica en la zona de Zho Laguna proporcione sitios con potencial hidráulico.
4. Conocer la disponibilidad real del acuífero. Es necesario realizar actividades de pruebas de bombeo, muestreo para conocer la calidad del agua por concentración de sulfato de calcio, balance hidrometeorológico (para cuantificar los volúmenes de escurrimiento, evaporación e infiltración).

**Resumen técnico**

Las actividades socioeconómicas en el área que comprende el acuífero Xpujil se ven limitadas por el abastecimiento de agua sustentable; a pesar de esto, la zona presenta un alto crecimiento demográfico y las necesidades de agua se incrementan. De 1980 a la fecha el incremento en el número de comunidades ha crecido más de seis veces (de 60 comunidades a 340). Si bien se cuenta con un valor de disponibilidad oficial, en el cual indica que existe una disponibilidad de más de 300 Hm<sup>3</sup>/año, éste no se refleja. Primero, porque gran parte del área es selva y de ella una parte importante se considera Reserva de la Biósfera. Segundo, no se refleja en el estatus socioeconómico de la zona, donde la principal fuente de abastecimiento se realiza a través de tres acueductos o bien por el suministro por medio de pipas. La infraestructura hidráulica de pozos se ve limitada por los altos costos de operación y mantenimiento y,

sobre todo por la mala calidad de agua que se extrae de algunos de los pozos. A la fecha no existe un balance de aguas que determine los volúmenes de entrada y salida y menos aún, un análisis hidrológico que proporcione información sobre los volúmenes de infiltración. Dentro de la estrategia de evaluación se planteó primero, la definición del potencial hidráulico subterráneo del área para identificar los sitios más favorables para realizar perforaciones exploratorias y definir él o los tipos de infraestructura necesarios (perforación de pozos, diseño de pozos y líneas de conducción). Por lo anterior se contrataron los servicios de esta consultora para realizar el **"Estudio geohidrológico y geofísico en el municipio de Calakmul, en el estado de Campeche"**, bajo amparo del contrato **SGT-OCPY-CAM-14-28-RF-13**.

Para este estudio se realizaron actividades de recopilación y análisis de información para conformar el marco físico de referencia y orientar las investigaciones del subsuelo, a través de métodos indirectos, localización de captaciones, piezometría, hidrometría y prueba de bombeo. Para la ejecución del estudio se planteó la estrategia de definir el marco físico de referencia, definir los modelos estático e hidrodinámico del área para proponer el modelo conceptual de funcionamiento y con base en ello dictaminar el potencial hidráulico subterráneo. Hidrográficamente, no existen ríos ni arroyos de caudal permanente. El clima predominante es el cálido subhúmedo, con lluvias en verano. La precipitación promedio anual es de 1,700 a 1,800 mm.

Para el modelo estático se realizó un análisis de las unidades geológicas y dada la falta de información de cortes litológicos, se propuso realizar varios pozos, exploración geofísica para definir los espesores de las unidades electrostratigráficas y correlacionarlas, con los niveles del agua, productividad de los pozos, para después asociarlas a los eventos geológicos presentes en el área. Con base en la respuesta eléctrica de la zona, se identificaron seis unidades geoelectricas las cuales se asociaron a cuatro eventos geológicos. Los contrastes de resistividad y posición indican la presencia de una roca compuesta de yesos y caliza, la cual se considera el basamento hidráulico por los valores tan altos que se obtiene se infiere que está muy compacta y en algunos sitios fracturada. El problema que presenta esta unidad es que el agua presenta altas concentraciones de sulfato de calcio que restringen su uso. Las unidades geoelectricas se nombraron como E y F. Sobreyaciendo a esta unidad o bien en contacto lateral, principalmente por facies, se identifica una unidad de resistividad media asociadas a una caliza areno arcillosa que se correlaciona con la unidad geológica de Calizas areno arcillosas del Eoceno no diferenciado; ésta unidad presenta agua de mejor calidad, aunque su productividad no supera los 10 Ips. Se correlaciona con las unidades geoelectricas D. Se presenta también una caliza de alta

resistividad que se asocia al Miembro Pisté de la Formación Chichen Itzá; se presenta en pequeños espesores y con poca extensión lateral; no se pudo evaluar su productividad, se correlaciona con las unidades geoelectricas B y C. Por último, coronando las secuencias sedimentarias anteriores se presenta una capa de arcilla carbonatada producto del intemperismo y erosión de las rocas antes mencionadas la cual actúa se correlaciona con la unidad geoelectrica A. Una particularidad que se observa en el comportamiento del subsuelo es la variación de resistividad en forma lateral que se presenta debajo de los 50 m de profundidad. Para el modelo hidrodinámico se realizó el censo de aprovechamientos, en el cual se identificaron 45 captaciones, de las cuales el 27% están inactivas; por su mala calidad o bien, por los costos tan elevados en las tarifas de consumo de corriente eléctrica. Se definió la posición al nivel del agua manifestándose que ésta presenta un comportamiento similar a la topografía de la zona; de igual forma las cargas hidráulicas manifiestan que el área es una zona de recarga al acuífero Península de Yucatán en su porción sureste. En cuanto al censo de aprovechamientos, dentro del límite del área de este estudio, existen 45 pozos con una profundidad total de 10 a 250 m, los cuales en su mayoría extraen caudales instantáneos menores de 10 lps, con diámetro de tubería de ademe de 8 a 12". Con base en el cálculo de los caudales y tiempos de operación se extrae un volumen aproximado de 1,983,176.7 m<sup>3</sup> al año.

La profundidad al nivel estático, es variable entre los 3 y 125 m, con elevaciones del nivel estático de 250 y 0 msnm. El límite occidental del acuífero corresponde al parteaguas continental; el área evaluada drena hacia el mar Caribe. No existe información que permita conocer la evolución del comportamiento de los niveles del agua. La dinámica del agua subterránea en la zona de estudio, ocurre en un medio geológico contrastante, por las variaciones litológicas superficiales y laterales que presentan los materiales los cuales controlan la capacidad de almacenamiento, el transporte y la calidad del recurso. Estas variaciones se definieron con base en los resultados de la exploración geofísica que manifiesta contrastes de resistividad entre valores muy altos (yesos y calizas) y bajos (calizas arcillo arenosas) Con base en el análisis de la geología, el agua se desplaza a través de dos medios:

1. Granular, correspondiente a las unidades geológicas Arcilla carbonatada y Calizas arcillo-arenosas del Eoceno no diferenciado y,
2. Fracturado, formado por las unidades geológicas de Calizas asivas del Miembro Pisté de la Formación Chichen Itzá y Yesos con intercalaciones de caliza de la Formación Icaiché; esta última se considera el basamento hidráulico; además de presentar altas concentraciones de sulfato de calcio. Estas unidades se presentan



en la parte centro sur de la Península de Yucatán y se encuentran en la parte topográfica más alta. Referente a los volúmenes de aguas meteóricas como elementos de recarga al subsuelo, no existen cálculos que definan su magnitud, pero cualitativamente se puede aseverar que sus principales zonas de aportación se presentan en las partes topográficamente altas y de transición hacia la planicie que se presenta hacia el estado de Quintana Roo. En la parte topográfica más alta las arcillas carbonatadas retienen grandes cantidades de agua, lo cual se refleja en el paisaje con una vegetación de selva muy cerrada y presencia de zonas de inundación. Esta condición hace que la unidad descrita actúe como un acuitardo. Hacia la parte oriente del acuífero, debajo de las arcillas carbonatadas se presenta un sistema acuífero libre a semiconfinado por las variaciones laterales que presenta. Por la ubicación del acuífero Xpujil, se ubica en la zona de recarga del acuífero Península de Yucatán en su porción sureste. Por la interpretación de la prueba de bombeo, realizada en la unidad litológica Calizas arcillo-arenosas del Eoceno no diferenciado el valor de la conductividad hidráulica es del orden de 0.5 m/día.

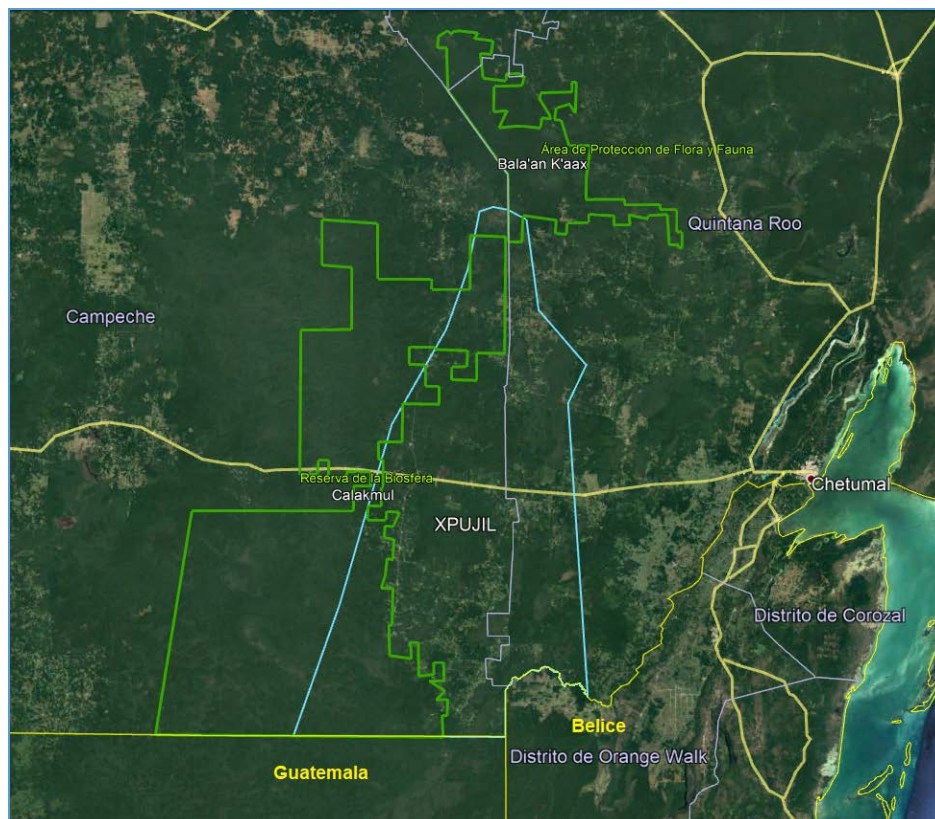
Con base en los resultados se tiene que el área evaluada presenta poco potencial hidráulico para considerarlo como fuente de abastecimiento sustentable para las 340 comunidades que se asientan en el municipio de Calakmul, Campeche.

### 3 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO SOCIOECONÓMICO, FISIAGRÁFICO Y ANÁLISIS GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO, CLIMATOLÓGICO E HIDROLÓGICO

#### 3.1 Localización

El acuífero de Xpujil (0405) se localiza en los municipios de Calakmul (70%), estado de Campeche, y de Othón Blanco (30%), estado de Quintana Roo (Figura 1), cubriendo un área de 7,926.13 km<sup>2</sup>. Incluye el 29% del territorio de la Reserva de la Biosfera de Calakmul (RBC), el 2.7% de Área de Protección de Flora y Fauna Bala'an K'aax, así como los Parques Estatales de Balam-Ku y Balam-Kin, situación que le confiere mantener un equilibrio ecológico (Rosas, 2009). La RBC es la reserva natural de bosque tropical más grande México y forma parte de un ambicioso proyecto ecológico llamado "Corredor Biológico Mesoamericano", el cual tiene por meta la unión de los ecosistemas de Norteamérica con los de Sudamérica, con el objetivo de proteger el hábitat del jaguar y otras especies amenazadas (ECOSUR, 2001).

Es, además, un acuífero internacional ya que es compartido por México, Belice y Guatemala (Unesco, 2015). Sin embargo, no existe un acuerdo de cooperación internacional para la gestión compartida del acuífero (Abdul, 2018).



**Figura 3.1 Localización del acuífero de Xpuji (0405).**

El municipio de Calakmul se encuentra entre las coordenadas 17° 54' 00" a 18° 51' 00" de latitud norte y 89° 09' 04" a 90° 07' 05" de longitud oeste. Colinda al norte con los

municipios de Champotón y Hopelchén, al sur con Guatemala, al este con Quintana Roo y Belice, y al oeste con los municipios de Escárcega y Candelaria. Abarca un área de 13,839 km<sup>2</sup> y representa el 24.34% del territorio estatal (Figura 1). La mayor parte del territorio está considerado como Reserva Natural de la Biósfera denominada “Calakmul” y abarca una superficie de 723,185.13 ha. El 93.7% de la superficie del municipio se destinada a la explotación forestal, 4.6% a la explotación ganadera, 1.2% para uso agrícola y el resto a otros usos (Enciclopedia de los municipios y Delegaciones de México).

Othón P. Blanco es uno de los 11 municipios en que se divide el estado de Quintana Roo. Su cabecera es la ciudad de Chetumal, tiene una extensión territorial de 18,760 km<sup>2</sup>, es el más extenso del estado de Quintana Roo y representa el 36.9% del territorio estatal (más de la tercera parte). Limita al norte con el municipio de Bacalar Quintana Roo, al oeste con el Municipio de Calakmul Campeche, al sur con Belice y al extremo suroeste con Guatemala.

Los límites oficiales del acuífero de Xpujil (0405) se muestran en la Tabla 3.1:

**Tabla 3.1 Límites oficiales del acuífero Xpujil (0405).**

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	89	44	34.6	17	48	58.0	
2	89	36	49.9	18	10	7.8	
3	89	28	11.4	18	38	48.1	
4	89	19	1.7	18	54	4.5	
5	89	15	27.1	19	3	38.7	
6	89	13	28.8	19	12	53.1	
7	89	11	10.1	19	13	36.9	
8	89	8	38.7	19	13	7.7	
9	89	5	35.0	19	11	35.9	
10	89	3	32.2	18	57	7.0	
11	88	55	33.1	18	48	18.7	
12	88	58	36.3	18	42	11.7	
13	88	55	20.0	17	55	11.6	DEL 13 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	89	44	34.6	17	48	58.0	

### 3.2 Disponibilidad de agua subterránea del acuífero

Para el cálculo de la disponibilidad de las aguas subterráneas, se aplicó el procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media

anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas establece que se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{Disponibilidad} \\ \text{media de Agua} \\ \text{Subterránea en} \\ \text{una} \\ \text{unidad} \\ \text{hidrogeológica} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Recarga Total} \\ \text{Media Anual} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Descarga} \\ \text{Natural} \\ \text{Comprometida} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Volumen} \\ \text{concesionado de} \\ \text{Aguas Subterráneas} \\ \text{e inscrito en el} \\ \text{REPDA} \end{array}$$

Para el caso del acuífero de Xpujil, la disponibilidad ha variado históricamente, de acuerdo a los siguientes datos mostrados en la Tabla 3.2:

**Tabla 3.2 Variación de la Disponibilidad en el tiempo**

FECHA	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
4 ene 2018	2,099.4	1784.1	3.614056	0.000803 <sup>a</sup>	311.685141	0.000000
20 abr 2015	2,099.4	1,784.1	2.585524	0.5	312.714476	0.000000
20 dic 2013	2,099.4	1,784.1	2.209794	0.5	313.090206	0.000000
28 ago 2009	2,099.4	1,784.1	0.252720	0.5	315.047280	0.000000
31 ene 2003	2,099.40	1,784.1	0.000000	0.5	315.300000	0.000000

<sup>a</sup> incluye VEALA (volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente), VAPTYR (volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA) y VAPRH (volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica), de acuerdo a las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" (fracciones 3.10, 3.12, 3.18 y 3.25), y "4" (fracción 4.3), de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. Las demás definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" y "4" de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000: R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea.

Hay que resaltar que el cálculo de la disponibilidad se basa en información regional de estudios realizados en toda la península de Yucatán y no se particulariza la información a la zona de estudio (Goevaluaciones y Perforaciones, 2015).

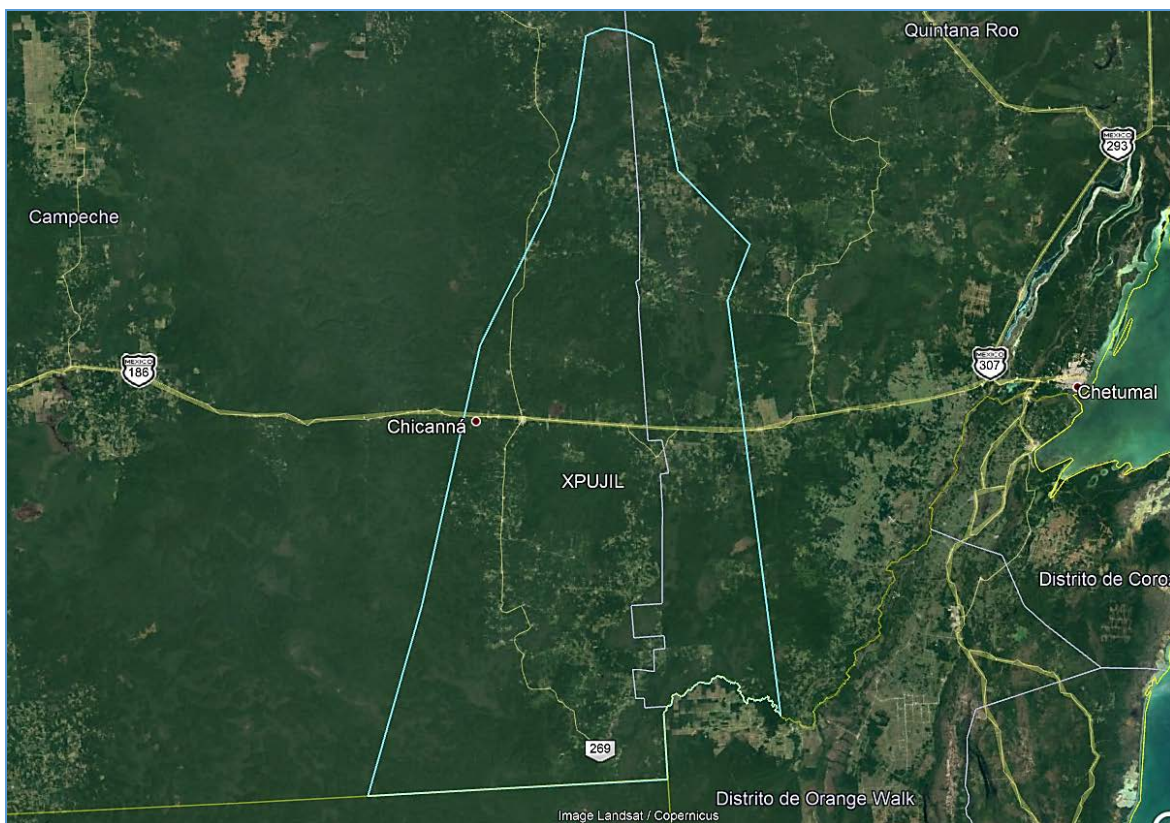
Existen cuatro decretos de veda y el 5 de abril 2013 se publicó la suspensión de libre alumbramiento.

### 3.3 Vías de comunicación

La zona de estudio presenta una red de carreteras, caminos y terracerías que comunican prácticamente a todos los poblados y comunidades (Figura 3.2):

- carretera de Escárcega a Chetumal (No. 186)
- carretera Campeche a Xpujil vía Hopelchen y Dzibalchén
- camino de Xpujil a Justo Sierra (sur)
- camino de Justo Sierra a Caobas (edo de QRoo)
- camino de Caobas a Río Verde.

La Carretera Federal 186 es el principal medio de comunicación del municipio; ingresa al territorio del acuífero procedente de la población de Escárcega, Campeche, y se dirige a Xpujil. Es una carretera sencilla con un solo carril de circulación en cada sentido y prácticamente recta de Este a Oeste.



**Figura 3.2 Red de carreteras.**

### **3.4 Flora y Fauna**

Como consecuencia de los climas tropicales la vegetación predominante del estado de Campeche son las selvas húmedas. La selva baja subperennifolia está asociada con vegetación secundaria y agricultura normal, destacando especies como el guajinal, habilla, cojoma y tepeguaje. La selva mediana subperennifolia se caracteriza con vegetación secundaria y agricultura nómada; las especies predominantes son: el ramón, chicozapote, caoba y pucte. La selva alta subperennifolia por su parte se

encuentra en lugares de menor precipitación y en sitios protegidos como barrancas y hondonadas, predominando el cedro, palo mulato y granadillo.

La fauna de la región es abundante y variada, ya que el bosque tropical alberga reptiles (iguana, culebra, víbora y tortuga), mamíferos (mapache, conejo, ocelote, ardilla, tlacuache, tepezcuintle, nutria, puerco de monte, tapir, venado cola blanca, armadillo, mono, temazate, tigrillo, oso hormiguero, mico de noche y jaguar), aves (faisán, codorniz, cojolite, chachalaca, tucán, gavilán, lechuza, loro y pavo ocelado), y una gran diversidad de insectos, entre los que destaca el escarabajo gigante llamado megazoma (Figura 3.3), que se distingue por su tamaño, peso y fuerza.



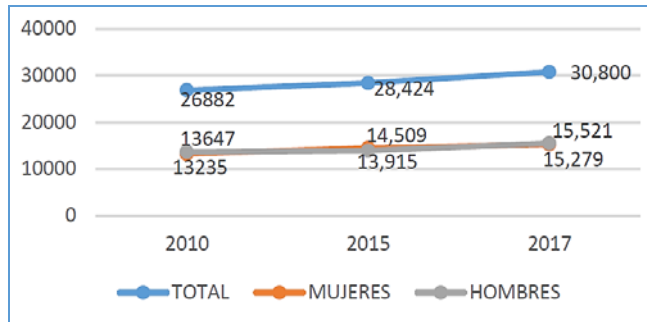
**Figura 3.3 Escarabajo gigante denominado “megazoma”.**

Lamentablemente algunas de estas especies están en peligro de extinción, debido, entre otras causas, a la cacería furtiva y la destrucción de su hábitat por la explotación forestal y expansión de la frontera agropecuaria. De los animales en peligro de extinción en el estado tenemos a el mono aullador, saraguato, mono araña, ocelote, jaguar, oso hormiguero, tigrillo, armadillo y puma.

De lo anterior, una gran parte del estado de Campeche es considerado como área natural protegida a través de las reservas de la biosfera de Calakmul, Los Petenes y Ría Celestún.

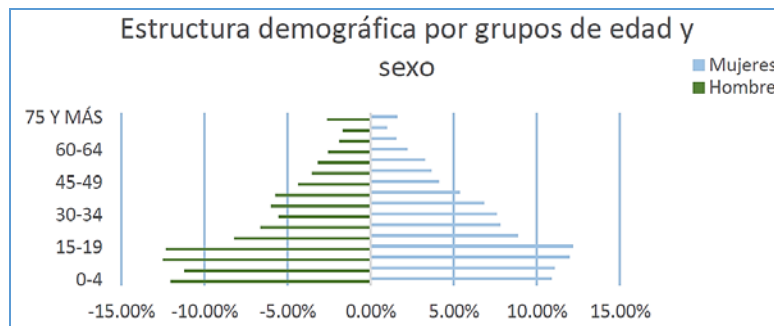
### **3.5 Aspectos socioeconómicos**

Según datos del año 2017 del Consejo Nacional de Población (CONAPO), la población total del municipio de Calakmul es de 30,800 personas, de este total, 15,521 son hombres y 15,279 son mujeres (Figura 3.4). La tasa media de crecimiento anual 2015-2017 es de 1.7, por arriba de la estatal que es de 1.5 (Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021, 2018).



**Figura 3.4 Población del municipio de Calakmul (Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021, 2018).**

Los resultados de las estadísticas intercensales 2015 indican que la mayor parte de la población de Calakmul se encuentra en edades tempranas, ya que una tercera parte de la población (34.8%) pertenece al grupo que va de 0 a 14 años, otra tercera parte (34.5%) tiene entre 15 y 34 años y 30.6% de la población cuenta con más de 35 años de edad (Figura 3.5).



**Figura 3.5 Estructura demográfica de Calakmul (Plan Municipal de Desarrollo 2018-2021, 2018).**

De acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI, el territorio del municipio de Calakmul registra un total de 158 localidades, de las cuales 76, son asentamientos menores a 13 habitantes. Destacan por el tamaño de población sus principales localidades: Xpujil (3,984 habitantes), Constitución (1,142 habitantes) y Zoh Laguna (1,074 habitantes), concentrándose en estas tres localidades el 23.06% del total de la población municipal.

En la medición de pobreza 2015 del CONEVAL el municipio presentó porcentajes muy altos en sus indicadores de carencia social, por encima del promedio estatal y nacional. Su población en rezago educativo es del 26.7%, el 32% carece de agua entubada, y el 26% carece de drenaje en las viviendas; un 11% de la población carece de pisos en sus viviendas, el 8% de la población carece de servicios de salud, persisten aun rezagos en acceso a la alimentación en suficiencia y calidad. Calakmul es el municipio con mayor índice de marginación, pobreza y pobreza extrema del estado de Campeche.

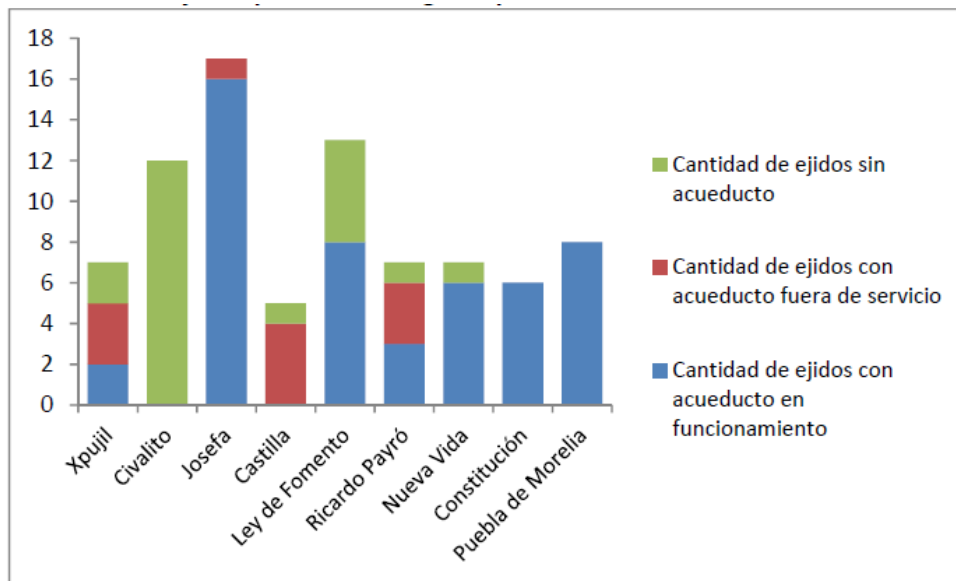
Datos del INEGI 2015 indican que el 4.6% de las viviendas en el municipio carece de energía eléctrica, el 32.4% no cuenta con servicio de agua potable entubada y 47.5% de los hogares recolecta agua de lluvia. El 25.2% de las viviendas cuentan con un solo cuarto y el 11.4% cuenta con piso de tierra; y el 25.6% de las viviendas no tiene sistemas de drenaje y 6.3% carece de servicio sanitario. Además, el municipio de Calakmul no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales, lo que representa un grave problema ya que el acuífero es altamente vulnerable a la contaminación debido a sus características geológicas (IDESMAC, 2014).

En Infraestructura del sistema de agua potable, el municipio tiene una red de distribución de 239,906 ml; 68 sistemas, 31 pozos, 8 fuentes adicionales (galería, noria, río, laguna, manantial, etc.); 83 tanques de PAD de 5 m<sup>3</sup>; y 6,998 tomas domiciliarias, con una extracción y suministro de 33.58 lt/s, de acuerdo a datos de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado (CAPAE) y del Sistema de Agua Potable del H. Ayuntamiento.

Tres acueductos conectados a pozos (120 a 160 m de profundidad) abastecen a 49 de los 60 ejidos del municipio (Figura 3.6), por lo que en 11 ejidos existen problemas de abastecimiento (IDESMAC, 2014):

- “Santa Rosa-Xpujil”: construido en 1997 y consta de un pozo profundo y línea de conducción de 90 km. Abastece a 6,500 habitantes de la zona sur: Castilla Brito, Ricardo Payró, Ley de Fomento, Josefa Ortiz de Domínguez, Civalito y Puebla de Morelia. Presenta fugas en las válvulas de operación y en la tubería de conducción, además de fallas en el suministro de energía eléctrica.
- “Dos Aguadas-Felipe Ángeles”: consta de un pozo y tanque de almacenamiento que abastece a los ejidos de la porción E-SE: Josefa Ortíz de Domínguez y Ley de Fomento.
- “Zona Norte” inaugurado en 2011. Consiste de un pozo ubicado en Bel-ha y línea de conducción de 60 km.





**Figura 3.6 Zonas con acceso a los acueductos (IDESMAC, 2014).**

El acuífero de Xpujil abarca parcial o totalmente los ejidos Nueva Vida, Xpujil, Ricardo Payró, Ley de Fomento Agropecuario, Josefa Ortiz de Domínguez y Cibalito.

El rápido crecimiento demográfico figura como una de las principales amenazas de contaminación para el acuífero por la falta de sistemas de drenaje y tratamiento de aguas residuales, mala disposición de fosas sépticas, fugas de los sistemas de alcantarillado, etc. A esto se suman los desechos de la cría de cerdos y corrales de pollos que se infiltran al acuífero, así como el uso de pesticidas para el control de plagas en los cultivos (Sampedro, 2015).

Existen abundantes pozos excavados (norias) en los ejidos de donde se extraen caudales pequeños (1 a 5 l/s), principalmente para usos agrícola, doméstico y abrevadero. Los pocos pozos profundos (40-100 m) se utilizan principalmente para el abastecimiento a los núcleos de población, ya que suministran gastos de 50 l/s en promedio.

A últimas fechas se han intensificado las perforaciones en la zona sur, (Civalito, Nuevo Veracruz, Santa Rosa y Dos Naciones) donde la calidad del agua es buena, ya que se ubica fuera de la zona de yesos; sin embargo, se requieren efectuar trabajos de campo para establecer la potencial de la zona.

En algunos cenotes se extrae agua mediante bombas instaladas para diversos usos con caudales promedio entre 10 y 30 l/s.

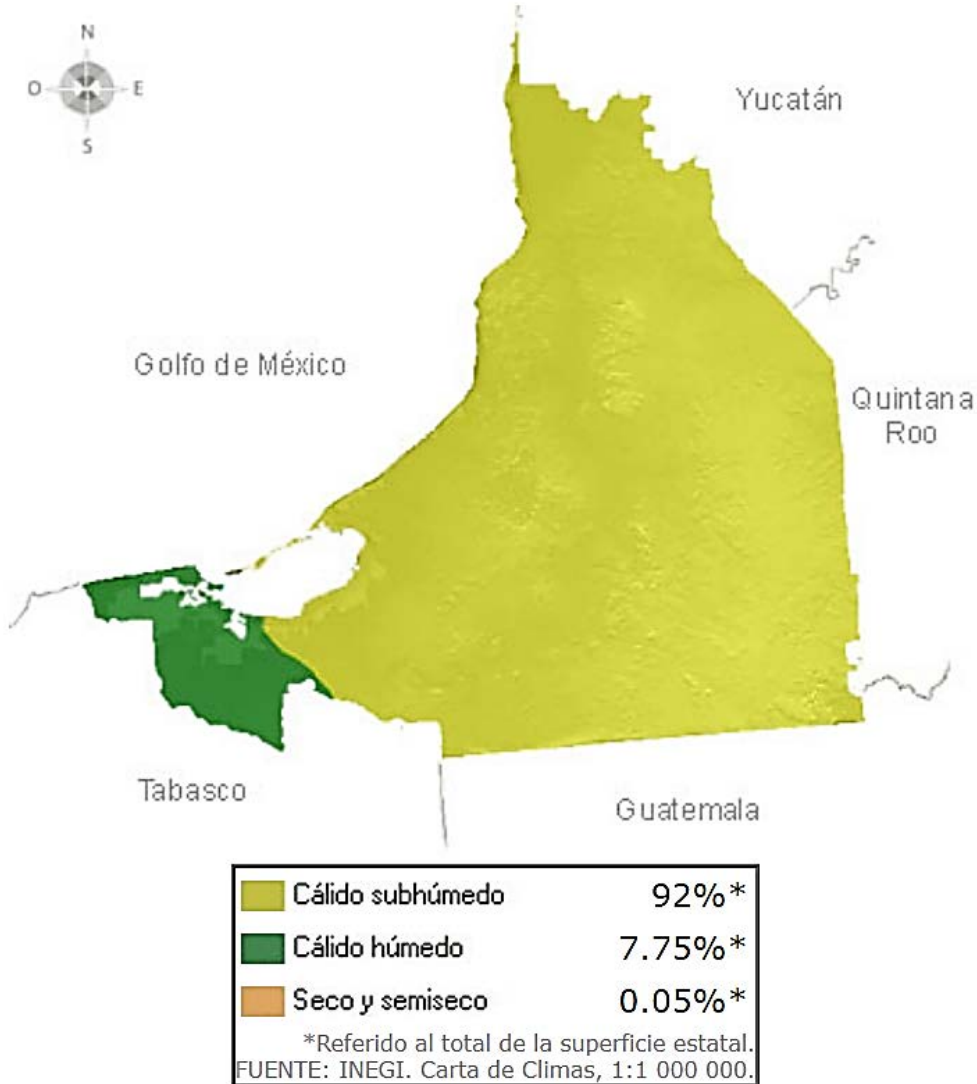
En la siguiente Tabla 3.3 se resumen algunas características de los aprovechamientos y agua subterránea en zonas del municipio (IDESMAC, 2014):

**Tabla 3.3 Características de los aprovechamientos y agua subterránea en zonas del municipio de Calakmul (IDESMAC, 2014).**

Zona	Descripción
Xpujil	La CONAGUA tiene identificado el pozo profundo de Xpujil con un volumen de 40,000 litros y tres operativos de recarga de agua en sitios estratégicos en la Reserva de la Biosfera de Calakmul con un promedio de 100 mil litros cada uno. El ejido de Zoh Laguna también cuenta con un pozo profundo. El ejido 20 de Noviembre cuenta con pozos excavados.
Ricardo Payró	Existe mucho potencial por la presencia de abundantes cenotes (50) y manantiales.
Ley de Fomento	Las aguas subterráneas son poco significativas, por lo que hay escasos pozos caseros excavados.
Josefa Ortiz de Domínguez	Existen pozos profundos en Santa Rosa - Cerro de las Flores con profundidades de 120 a 160 m, con agua de buena calidad por encontrarse en una zona sin yesos ni calizas. Agua principalmente utilizada para la agricultura. Consumo humano abastecido principalmente por acueducto.
Civalito	Cuenta con pozos profundos (100 m en promedio), esto debido a la abundancia de agua subterránea y su proximidad con el Río Hondo. El agua subterránea de esta zona es de buena calidad (agua dulce) ya que en la zona no hay yesos ni calizas. No cuenta con cobertura del sistema de acueductos.
Nueva Vida	Cuenta con el pozo profundo Bel-Ha y una zona de inundación en San José provocada por mantos freáticos someros.

### 3.6 Clima

El clima predominante en el 72% del municipio de Calakmul es el cálido subhúmedo a(wi) con lluvias en verano y media humedad en la zona de la biosfera y la porción colindante con el municipio de Escárcega, le sigue el a(wo) cálido subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad localizado en 16% del norte del municipio, y el resto es a(w2) caracterizado por ser cálido subhúmedo (Figura 3.7).

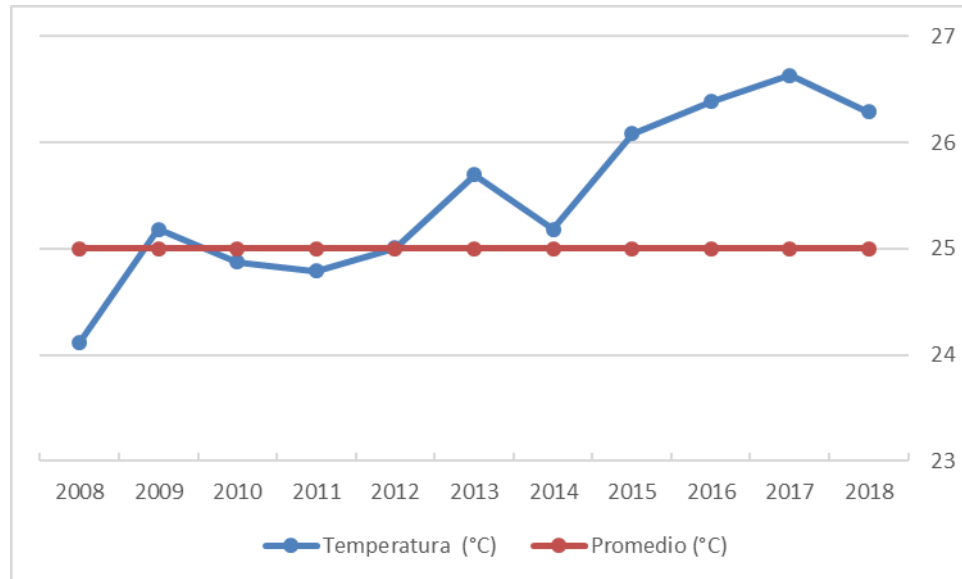


**Figura 3.7 Climas del estado de Campeche (INEGI).**

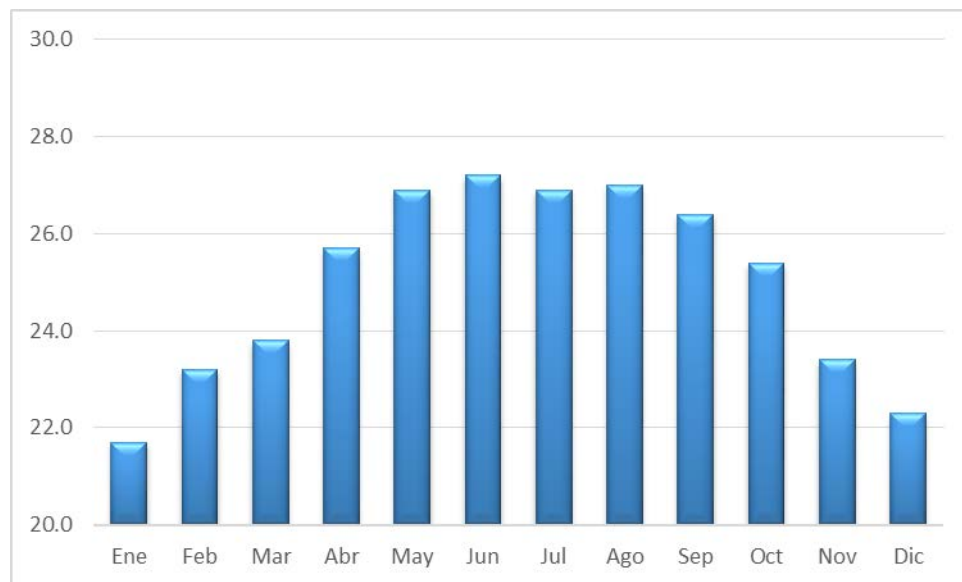
La temperatura media anual en las selvas de Calakmul es de 22 a 26° C; la precipitación media anual oscila entre 1,200 y 1,500 mm en el centro y aumenta gradualmente la humedad al sur en donde oscila entre 1,500 y 2,000 mm (INEGI, 1982). Por tanto, en el área en estudio prevalecen condiciones cálidas y subhúmedas, clasificándose así como clima que corresponde al subtipo Ax'(w0) (i')gw" (Orellana, 1999). El período lluvioso es de junio a noviembre, se interrumpe aproximadamente durante treinta días (entre julio y agosto) por la presencia del fenómeno meteorológico conocido como vaguadas polares que impiden el paso de los vientos alisios, provocando la sequía intraestival (canícula).

Con base en información de la estación Xpujil, Municipio de Calakmul, la temperatura media anual es de 25°C con máximas en el periodo mayo-agosto y mínimas en

diciembre-enero (Figuras 3.8 y 3.9). Se observa un incremento de la temperatura a lo largo del tiempo.



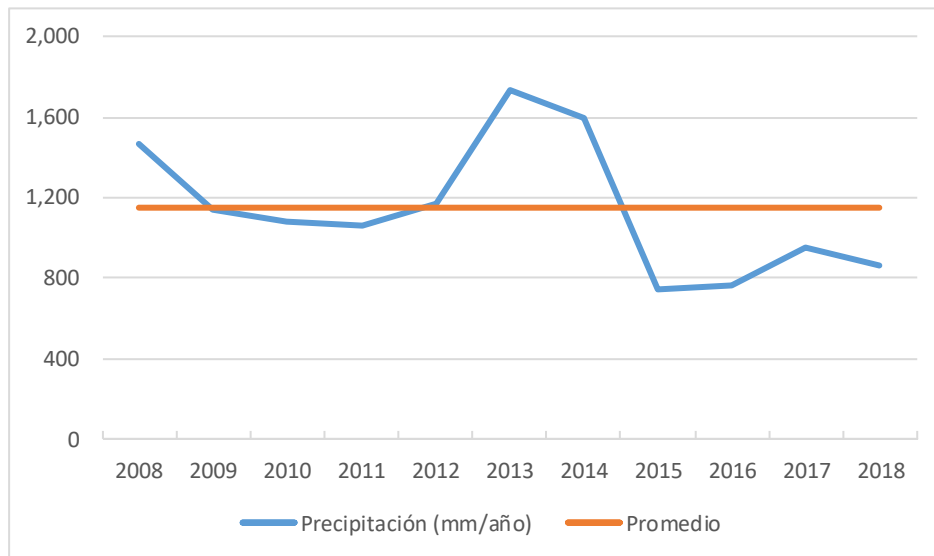
**Figura 3.8** Temperaturas anuales en la estación Xpujil.



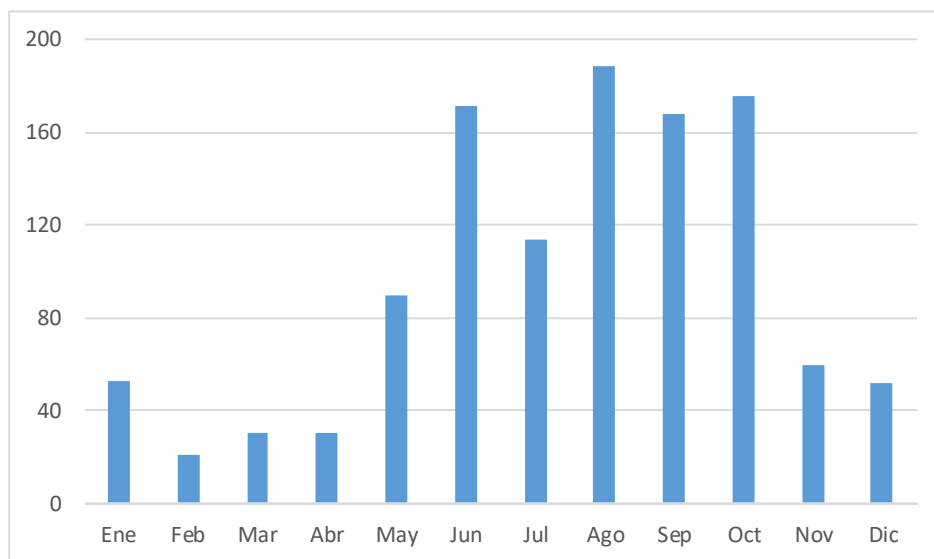
**Figura 3.9** Temperaturas medias mensuales en la estación Xpujil (en °C).

La precipitación media anual en la estación Xpujil alcanza los 1151 mm, siendo los meses más lluviosos de junio a octubre (Figuras 3.10 y 3.11). Se observa una reducción de la lluvia con el tiempo, lo cual puede ocasionar problemas a las comunidades que se dependen para su consumo de la captación del agua de lluvia. El 83% de la

precipitación ocurre entre mayo y noviembre, la época con mayor precipitación es de junio a octubre. El 17% restante se precipita durante el período de sequía de diciembre a abril.



**Figura 3.10 Precipitaciones anuales en la estación Xpujil (en mm).**



**Figura 3.11 Precipitaciones medias mensuales en la estación Xpujil (en mm).**

### 3.7 Sequías

La restricción en la disponibilidad de agua para la sobrevivencia ocasionó declives poblacionales, migraciones e incluso, en casos extremos, la extinción de grupos mayas en la península de Yucatán, antes y después de la conquista española. Las sequías causaron hambrunas (SDAR, 2016).

La geología kárstica tuvo consecuencias muy importantes sobre la civilización maya clásica. Se sabe que los mayas excavaron pozos de hasta 20-30 m de profundidad, sin embargo, en gran parte de las tierras bajas donde no encontraban el nivel de agua freática, preferían la recolección sobre la desviación, y la fuente sobre la distribución, por lo que dependían en gran medida de estanques superficiales de agua, conocidos hoy como aguadas, de cisternas superficiales, conocidas como chultunes, de cenotes y de lagos y lagunas de agua dulce (Figura 3.12).

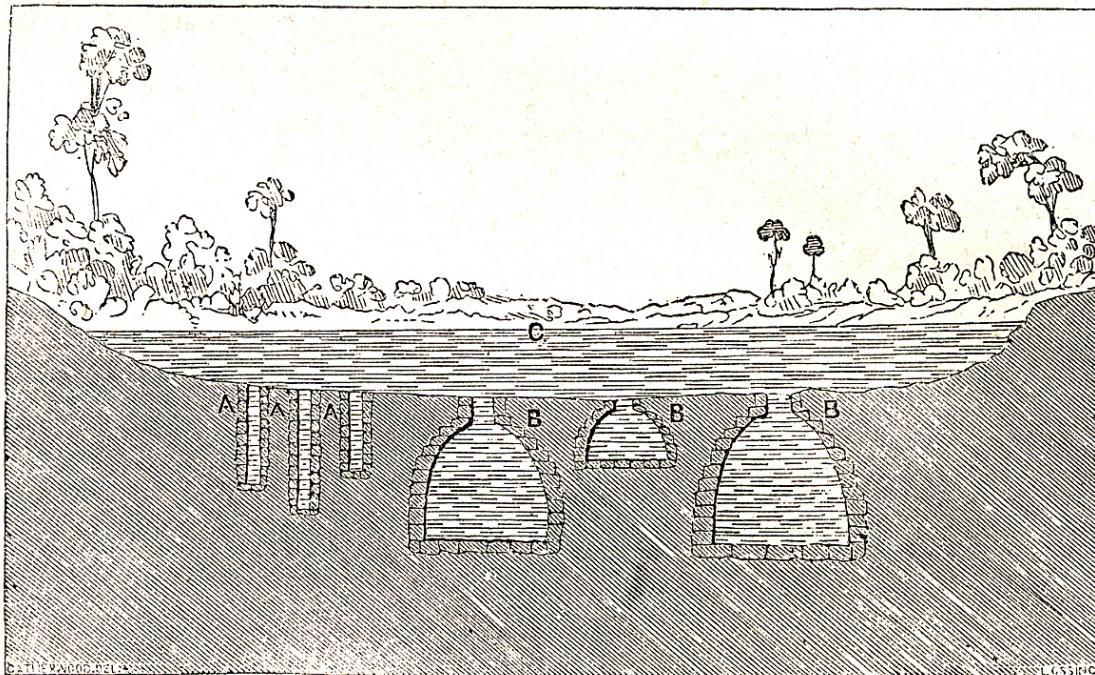


Figura 3.12 Aguada, Chultunes y pozos (Catherwood, 1843).

### 3.8 Cambio climático

Algunas manifestaciones meteorológicas actuales del clima, ya se consideran como una tendencia climática, a la luz de los informes del COP e indican similitudes con la época en que se gestara el colapso maya hacia fines del primer milenio de nuestra era (SDAR, 2016).

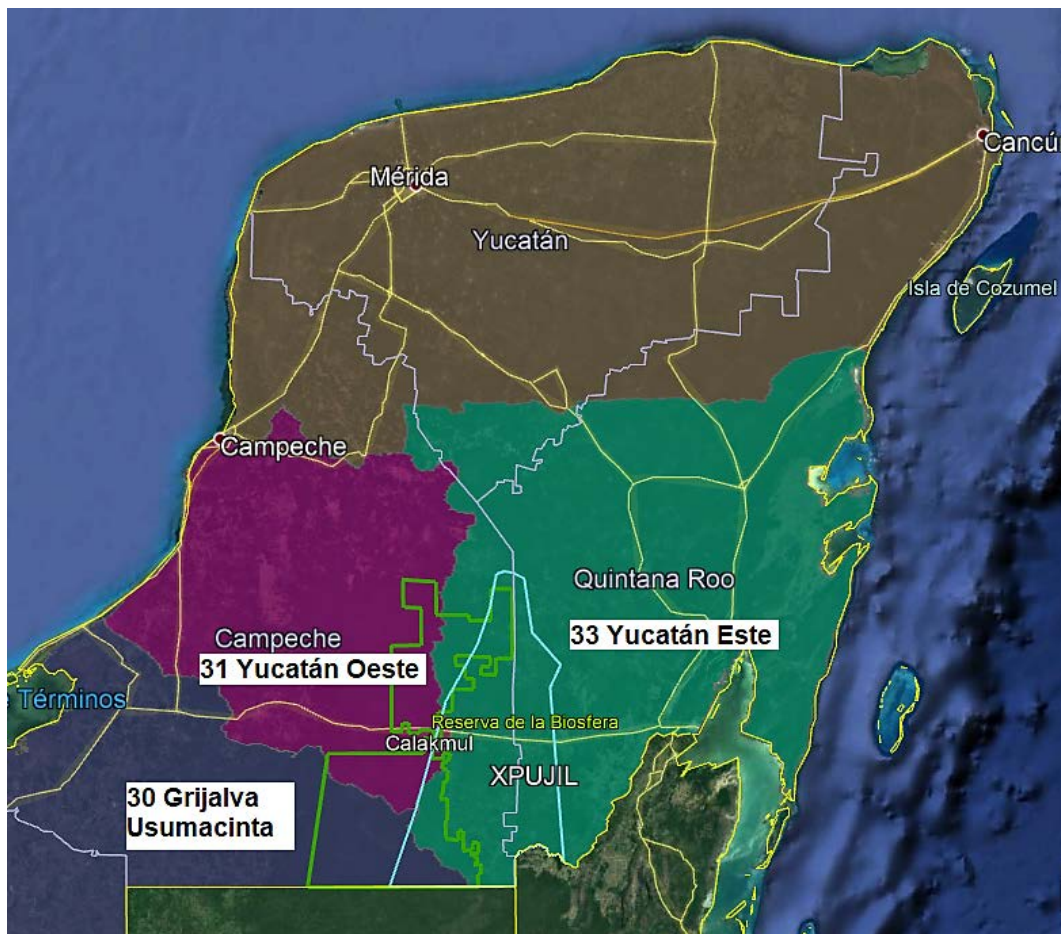
La región, ha sido altamente afectada por las sequías provocadas por los fenómenos de El Niño. De acuerdo a la revista *Nature* la frecuencia de los episodios extremos de El Niño se van a duplicar “en el futuro bajo los efectos del calentamiento climático” y a pasar de un caso cada veinte años a cada diez años.

Entre los impactos identificados por las amenazas del cambio climático destaca la mayor frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos (inundaciones, sequías, huracanes, olas de calor o frío, escasez de agua o abundancia de lluvias torrenciales), así como una distribución desigual del agua: regiones secas cada vez más áridas y regiones húmedas cada vez más húmedas, es decir escasez y exceso de lluvias.

En panorama de las anomalías para el estado de Quintana Roo expresan el mismo tenor que el expuesto a escala global: sequías y precipitaciones copiosas. La “captura” de agua en los aljibes ha estado expuesta a estas oscilaciones, donde la constante ha sido periodos prolongados de sequía que inciden en una baja captación y aún más, en la corroboración o ratificación de la funcionalidad y éxito de los captadores o aljibes, a pesar de copiosas precipitaciones de más de 1,100 mm/año.

### **3.9 Hidrología**

El acuífero de Xpujil se ubica principalmente en las Región Hidrológica 33 Yucatán Este y en menor proporción en la 31 Yucatán Oeste y 30 Grijalva-Usumacinta, todas ellas dentro de la Región Hidrológica Administrativa XII, del Organismo de Cuenca Península de Yucatán (Figura 3.13).



**Figura 3.13 Regiones Hidrológicas del acuífero Xpujil.**

### 3.10 Hidrografía y calidad del agua

El acuífero de Xpujil se encuentra situado en tres cuencas conocidas como Laguna de Términos, Cerrada y la Bahía de Chetumal, pertenecientes a las regiones hidrológicas denominadas región Grijalva-Usumacinta, Yucatán Este y Yucatán Oeste.

Por la alta permeabilidad de los suelos no existen corrientes de agua superficiales de importancia, solamente formaciones intermitentes en época de lluvias (Figura 3.14). Los cuerpos de agua existentes son: La Laguna de Noh, El Teniente y la de Alvarado. Las corrientes superficiales son los ríos El Escondido, El Desempeño, Las Pozas, Río Azul y Las Palmas, todos ellos de escaso caudal, así como el Arroyo Negro (Figura 3.15).



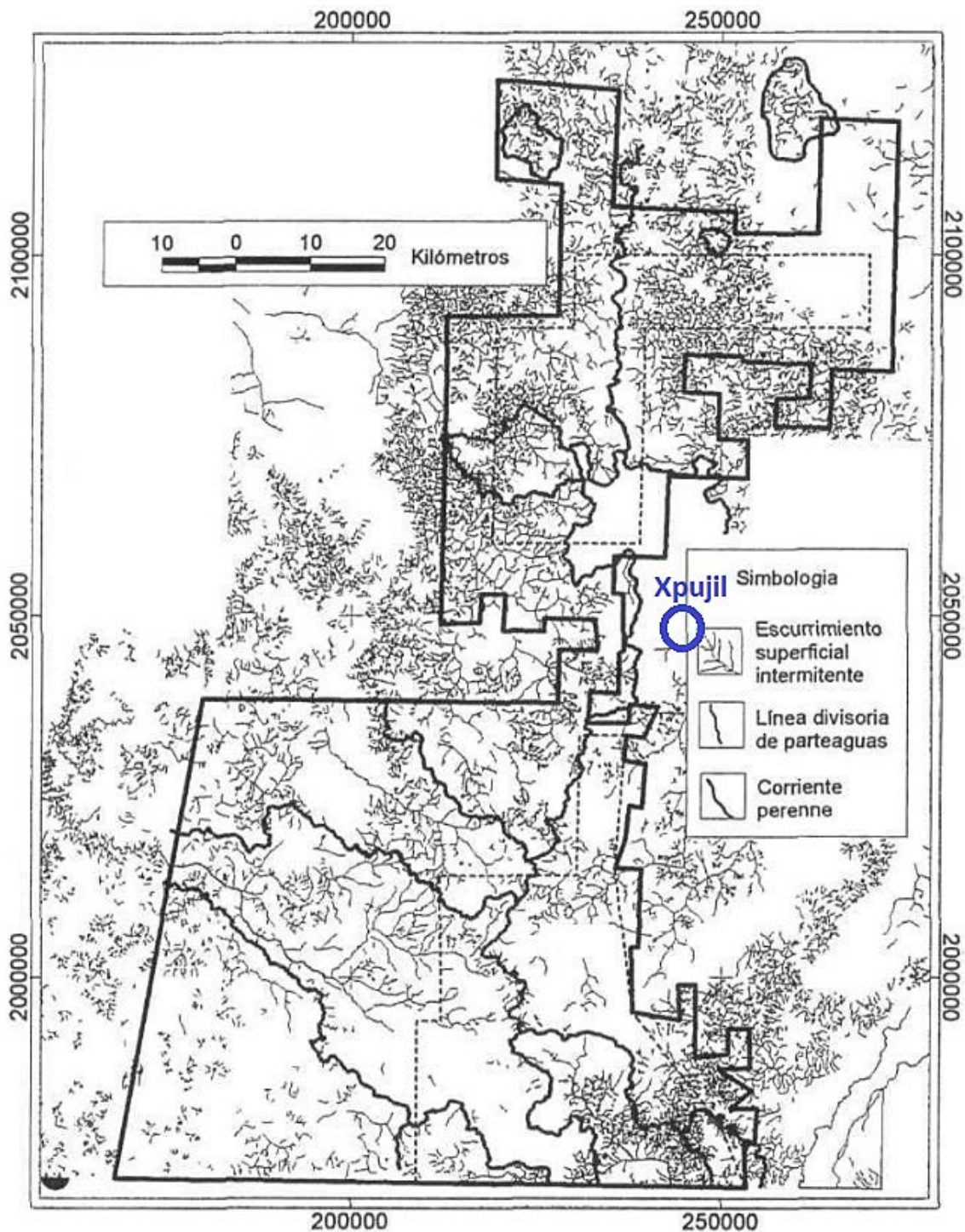
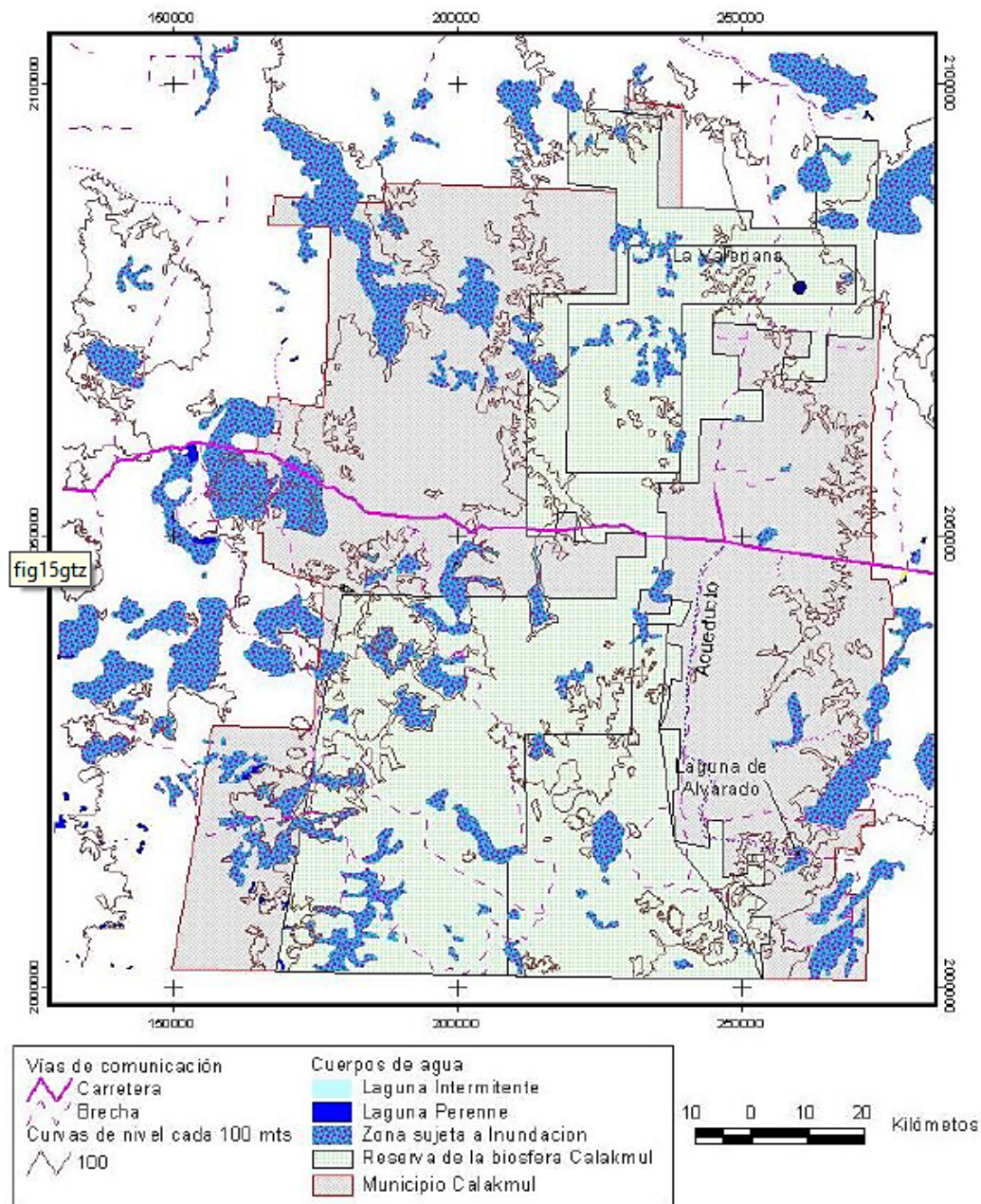


Figura 3.14 Red hidrográfica (García et al., 2002).



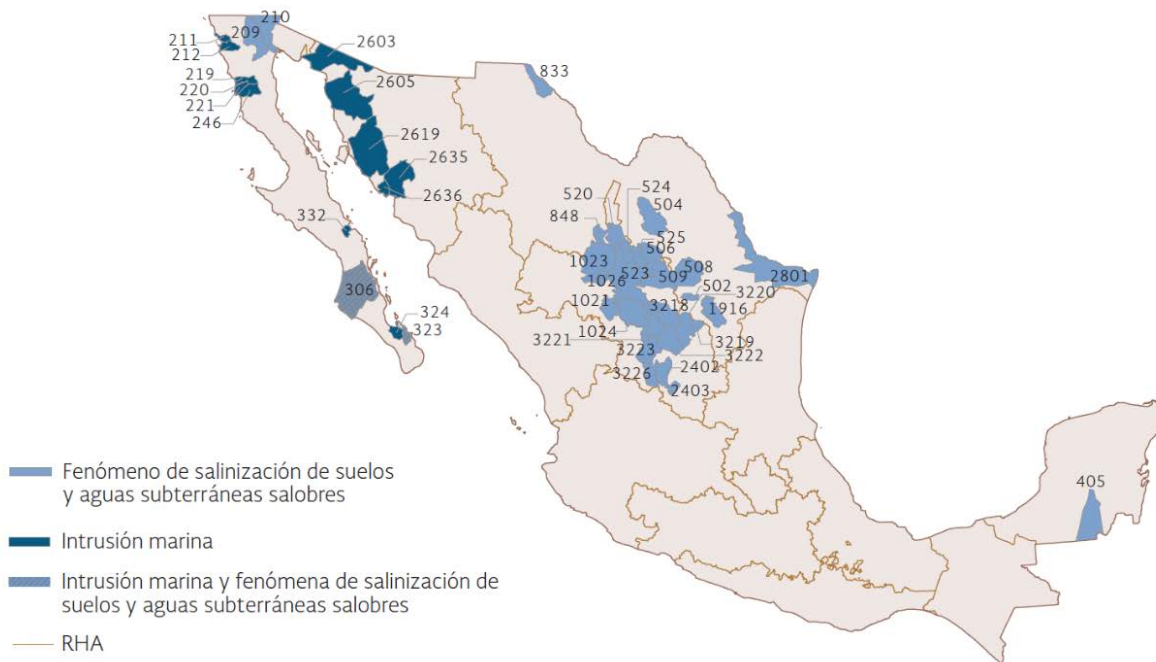
**Figura 3.15** Cuerpos de agua del municipio de Calakmul (García Gil et al., 1997).

La infiltración del agua de lluvia y la consecuente disolución de la roca caliza se ven favorecidas por la inexistencia de un sistema de escurrimiento superficial perenne, así como por la presencia de depresiones asociadas con fallas y fracturas.

La calidad del agua en la región es considerada mala debido al alto contenido de sulfato de calcio, que la hace no apta para consumo humano, riego o poco aptas para animales, de tal forma que la mayor parte del abastecimiento de agua se lleva a cabo

a través de la captación del agua de lluvia la cual se almacenan en cisternas. El nivel freático se encuentra a una profundidad que varía de 60 a 165 metros.

En el acuífero de Xpujil (0405) se presenta el fenómeno de salinización de suelos (Figura 3.16) debido a la disolución de minerales evaporíticos y a la presencia de aguas salobres congénitas de alta salinidad (Conagua, 2015).



**Figura 3.16 Acuíferos con intrusión marina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (Conagua, 2015).**

### 3.11 Abastecimiento de agua

Algunas comunidades al sur de Xpujil han sobrevivido el estiaje mediante el suministro de agua por camión cisterna, construcción de jagüeyes a cielo abierto, captación de agua de lluvia con cisternas y techos de lámina, hasta la instalación de una tubería que se alimenta de la Laguna de Alvarado, con el fin de llevar agua a más de 70 kilómetros de distancia. La disponibilidad de agua superficial acumulada en aguadas es factor determinante en el proceso colonizador de la selva y en la movilidad de la fauna silvestre (García Gil, 1997).

En la zona sur se registra mayor humedad y las aguadas son menos abundantes con respecto al norte, no obstante, tienen mayor superficie y por lo común son perennes pues conservan la humedad durante el estiaje.

Las evidencias arqueológicas indican que la zona sur del municipio ha sido más explotada, colonizada y transformada debido precisamente a la disponibilidad de

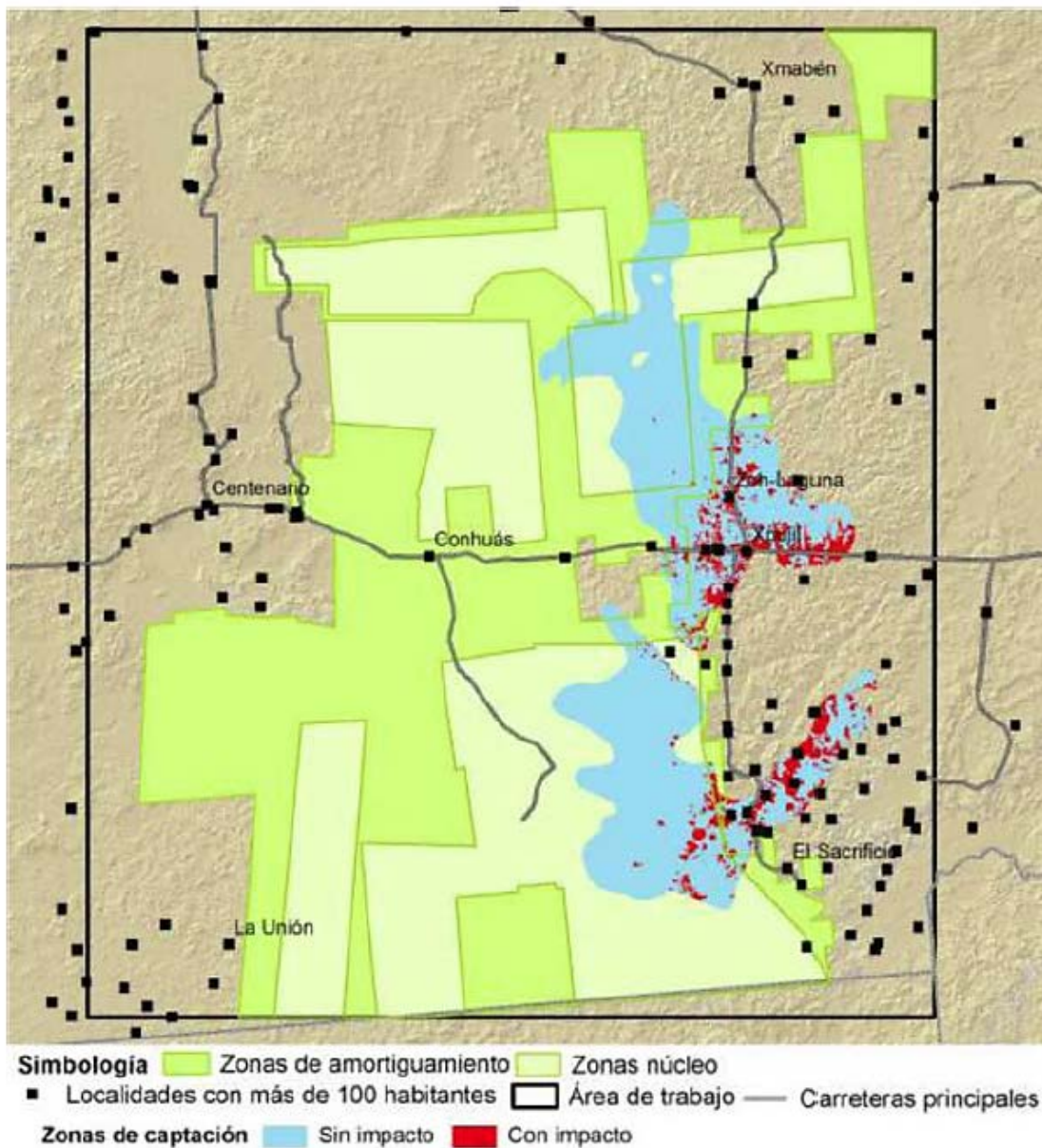
agua; este argumento explica la ubicación y ocupación de las grandes ciudades construidas por la civilización maya durante el periodo Clásico (600 A.C. 1,519 D.C.).

La carencia de agua ha sido resuelta de varias maneras por lo que dicha situación restrictiva tiende a cambiar paulatinamente. Hace apenas unos años las familias se desplazaban durante la época seca del año hacia X Pujil o Escárcega y regresaban con las lluvias a fin de preparar la milpa. Las comunidades se han organizado en torno a la disponibilidad del agua y han aprendido a vivir manejando la escasez y la dureza del agua.

Para resolver el problema del abastecimiento de agua en cantidad y calidad adecuados para los usos público-urbano y turismo, se requieren realizar estudios hidrogeológicos de detalle para conocer la disposición de mantos freáticos y zonas de recarga, estudios de calidad del agua y disponibilidad de agua, así como elaborar un plan estratégico de manejo del agua para la región, pues el agua es gran limitante y detonador de la colonización humana (Arreola et al., 2004)

### **3.12 Captación de agua de lluvia**

En la Figura 3.17 se muestran las zonas de captación de agua de lluvia en el municipio de Calakmul, las cuales se ubican en las zonas más altas de la región (Pronatura, 2010).



**Figura 3.17 Zonas de captación de agua de lluvia en el municipio de Calakmul (Pronatura, 2010).**

La captación de agua de lluvia en el municipio de Calakmul se realiza a nivel de vivienda y comunitario. La captación en contenedores comunitarios (aljibes) es complementaria a los captadores que agrupan de 3 a 4 familias con capacidad de entre 10 mil y 12 mil litros, así como tinacos de 1,100 litros con los que algunos hogares cuentan (Figura 3.18). Resalta el financiamiento de Kellogg y Emiratos para la construcción de los contenedores (IDESMAC, 2014).

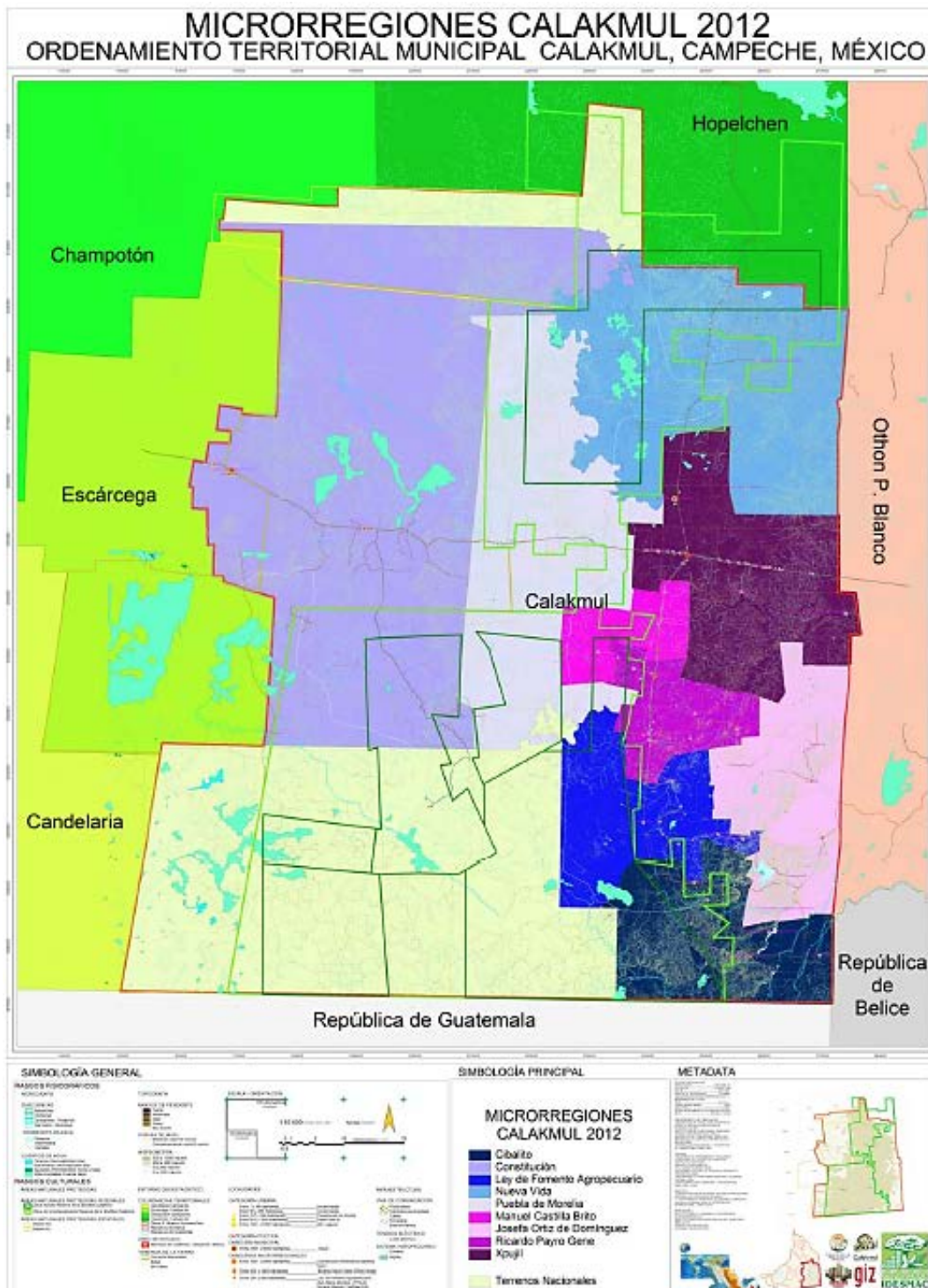
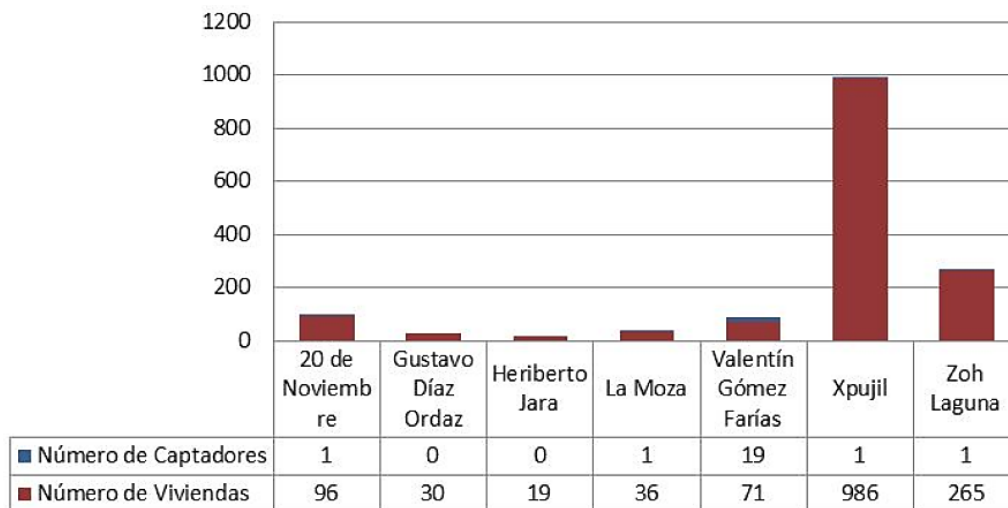


Figura 3.18 Zonas o microrregiones del Municipio de Calakmul (IDESMAC, 2014).

### Zona Xpujil

La principal fuente de abastecimiento (70%) es el agua de lluvia la cual es almacenada en jagüeyes, aljibes o captadores; los jagüeyes se usan principalmente para actividades agropecuarias o uso doméstico, que no para consumo humano ya que se considera que esta agua es de muy mala calidad. El 10% de los habitantes de la zona de Xpujil captan el agua de lluvia que cae en sus techos; sin embargo, el 24% de la población emplea agua de lluvia almacenada en jagüeyes (Figura 3.19). El agua de pozo es utilizada por un 5% de la población.



**Figura 3.19 Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en la zona de Xpujil (IDESMAC, 2014).**

### Zona Castilla Brito

El 24% de la población recolecta el agua de lluvia del techo de sus viviendas en tinacos y en la zona hay dos aljibes (Figura 3.20). En Centauro del Norte, por su lejanía con el resto de los ejidos de la zona, han recibido apoyo de SEDESOL, CONANP y Fundación Kellogg mediante programas de captadores vecinales.



**Figura 3.20 Tipos de abastecimiento de agua en la zona de Castillo Brito: (a) aljibe comunitario, (b) captador de agua y (c) habitante recogiendo agua del jagüey.**

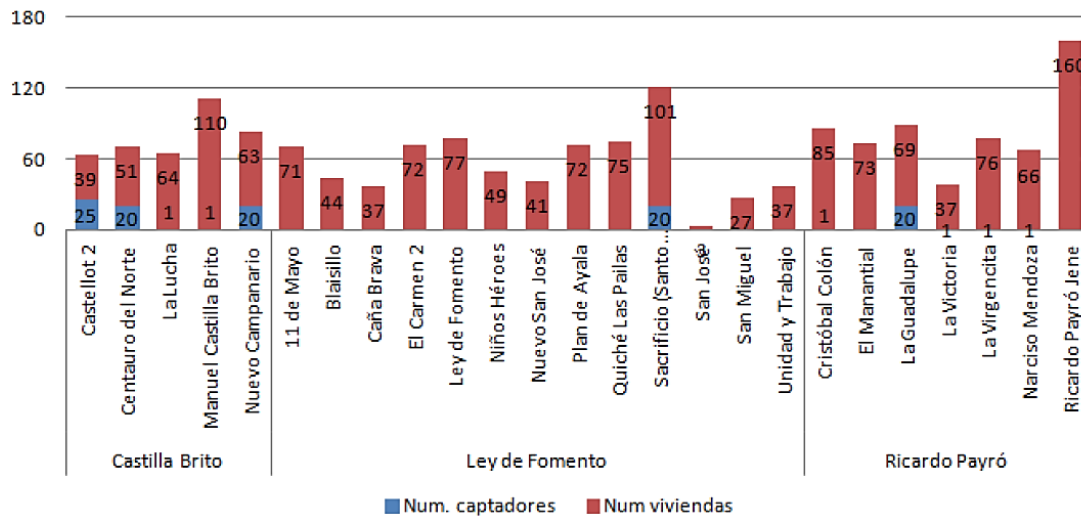
### ***Zona Ley de Fomento***

Únicamente el ejido Sacrificio cuenta con 20 captadores a nivel de vivienda (Figura 3.21). Por otro lado, todos los ejidos de esta zona cuentan con aljibes comunitarios de captación de agua de lluvia, con un volumen de 125 mil litros cada uno y en tiempo de secas el Ayuntamiento proporciona el agua mediante pipas.

### ***Zona Ricardo Payró***

El 29 % de las viviendas almacena agua de lluvia en tanques Rotoplas. Solo en los ejidos El Manantial y Ricardo Payró no cuentan aún con captadores de agua.





**Figura 3.21 Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en las zonas de Ley de Fomento y Ricardo Bravo.**

### Zona Josefa Ortiz de Domínguez

Algunas viviendas de la cabecera emplean aguas de lluvia almacenadas en jagüeyes, lo que representa el 8%. Mientras que en los otros ejidos el 24% de los habitantes almacenan este recurso en tinacos, el 13% en aljibes y el mismo porcentaje, 13%, recolecta el agua de jagüeyes (Figura 3.22). Dado que la frecuencia de bombeo de agua es de cada 3 días y que hay veces que este servicio se ve afectado por deficiencias en la energía eléctrica y/o por daños en la tubería el municipio provee a estas comunidades de agua mediante pipas.

### Zona Civalito

En esta zona todos los ejidos cuentan con aljibes comunitarios, los cuales se recargan gracias a la captación del agua de lluvia. Algunas comunidades por su lejanía y condición de marginalidad, están siendo apoyadas por el Ayuntamiento y el Programa PESA en la construcción de captadores vecinales de agua pluvial.

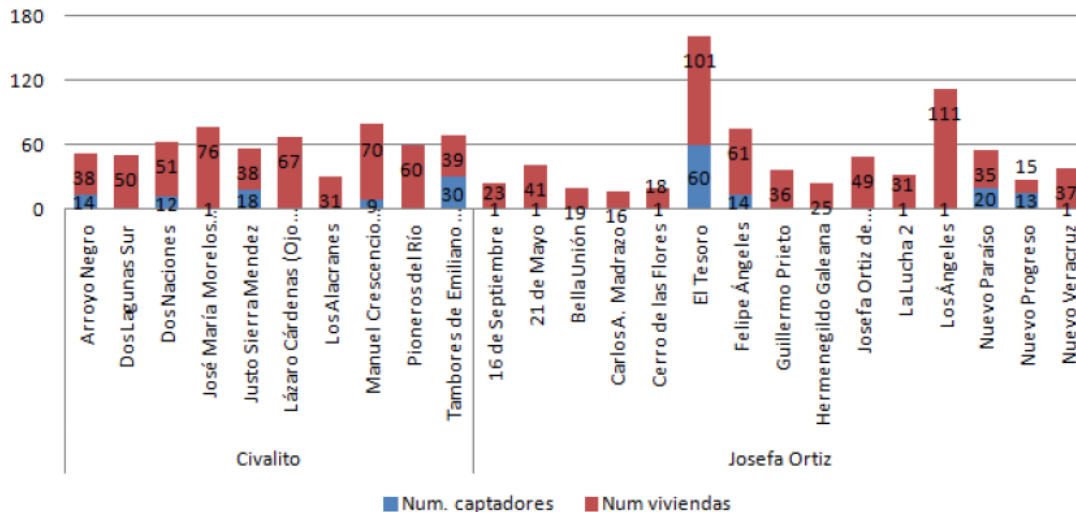


Figura 3.22 Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en las zonas de Civalito y Josefa Ortiz.

### Zona Nueva Vida

El agua de lluvia se almacena en tinacos, de aljibes y jagüeyes. El 42.8% de los ejidos pertenecientes a esta región no cuentan con captadores de agua de lluvia (Figura 3.23).

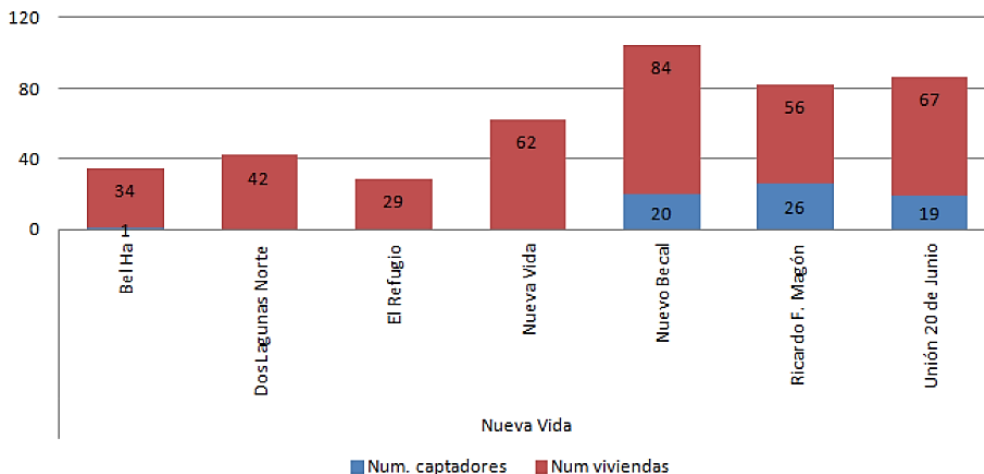


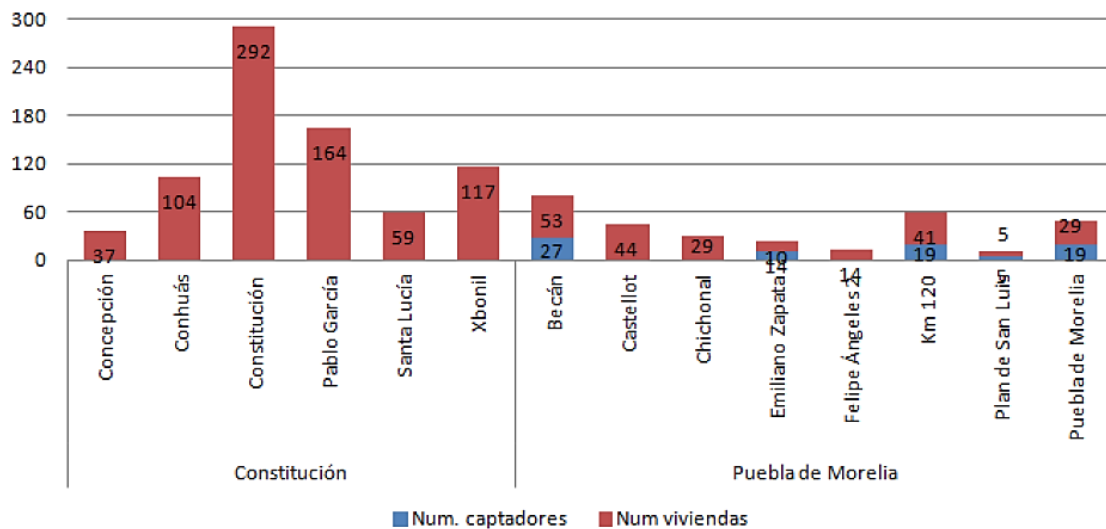
Figura 3.23 Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en la zona de Nueva Vida.

### Zona Constitución

La zona carece de captadores de agua (Figura 3.24) y no cuentan con aljibes. En temporada de seca solicitan el servicio de pipas al ayuntamiento, pero no consumen agua de ningún jagüey.

### Zona Puebla de Morelia

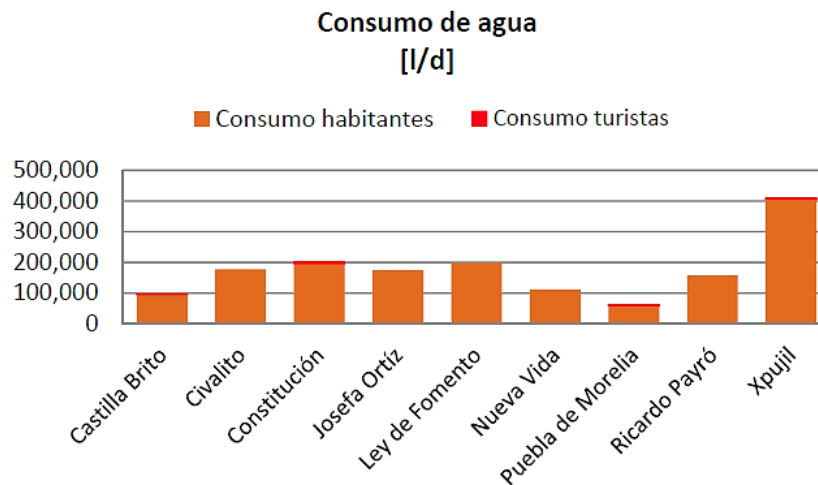
El 50% de los ejidos de la región carece de captadores de agua de lluvia y tampoco cuentan con aljibes.



**Figura 3.24 Captadores de agua de lluvia en los ejidos ubicados en las zonas de Constitución y Puebla de Morelia.**

### Demanda de agua por zonas

En las siguientes Figura 3.25 y Tabla 3.4 se muestran las demandas de agua por región, considerando el número de habitantes y turistas, así como un suministro de 60 litros por persona para el año 2030.



**Figura 3.25 Consumo de agua para usos doméstico y turístico por región.**

**Tabla 3.4 Estimación de la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de la población del municipio de Calakmul en el año 2030.**

Región	Población 2010 [hab.]	Proyección 2030 [hab.]	Consumo agua 2030 [l/d]
Xpujil	6,772	6,880	412,821
Ley de Fomento	3,297	3,350	200,985
Constitución	3,268	3,320	199,217
Civalito	2,961	3,008	180,503
Josefa Ortiz	2,903	2,949	176,967
Ricardo Payró	2,628	2,670	160,203
Nueva Vida	1,856	1,886	113,142
Castilla Brito	1,589	1,614	96,865
Puebla de Morelia	993	1,009	60,533
<b>Total</b>	<b>26,267</b>	<b>26,687</b>	<b>1,601,236</b>

El 2 % del área del municipio de Calakmul se dedica a la agricultura la cual es principalmente de tipo temporal debido a la severa limitante que representa la carencia de agua superficial y la dependencia a la temporada de lluvias sin un adecuado sistema de captación de agua.

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados de los análisis de agua a los cenotes ubicados en los ejidos de Calakmul realizados por la Conagua en el año 2011:

**Tabla 3.5 Resultados de análisis de calidad del agua en algunos cenotes de Calakmul.**

<b>Cenote en ejido</b>	<b>pH</b>	<b>Dureza Total (mg/l)</b>	<b>SO<sub>4</sub> (mg/l)</b>
Castilla Brito	7.33	1,919	885
Caña Brava	6.94	2,090	906
El Manantial	7.28	1,859	1,171
La Victoria	7.35	1,899	1,053
Narciso Mendoza	7.30	1,909	996
Ricardo Payró Gene	7.40	1,849	927
NOM-127-SSA1-1994	6.5 – 8.5	500	400

De acuerdo a IDESMAC (2014) últimamente se han intensificado las perforaciones en la zona sureste, específicamente en la zona del Civalito, Nuevo Veracruz, Santa Rosa y Dos Naciones; en las cuales la calidad del agua es buena, pues está ubicada fuera de la zona de yesos y calizas. En la zona norte la calidad del agua se considera mala por su alto contenido en yesos y calizas, además de su dureza.

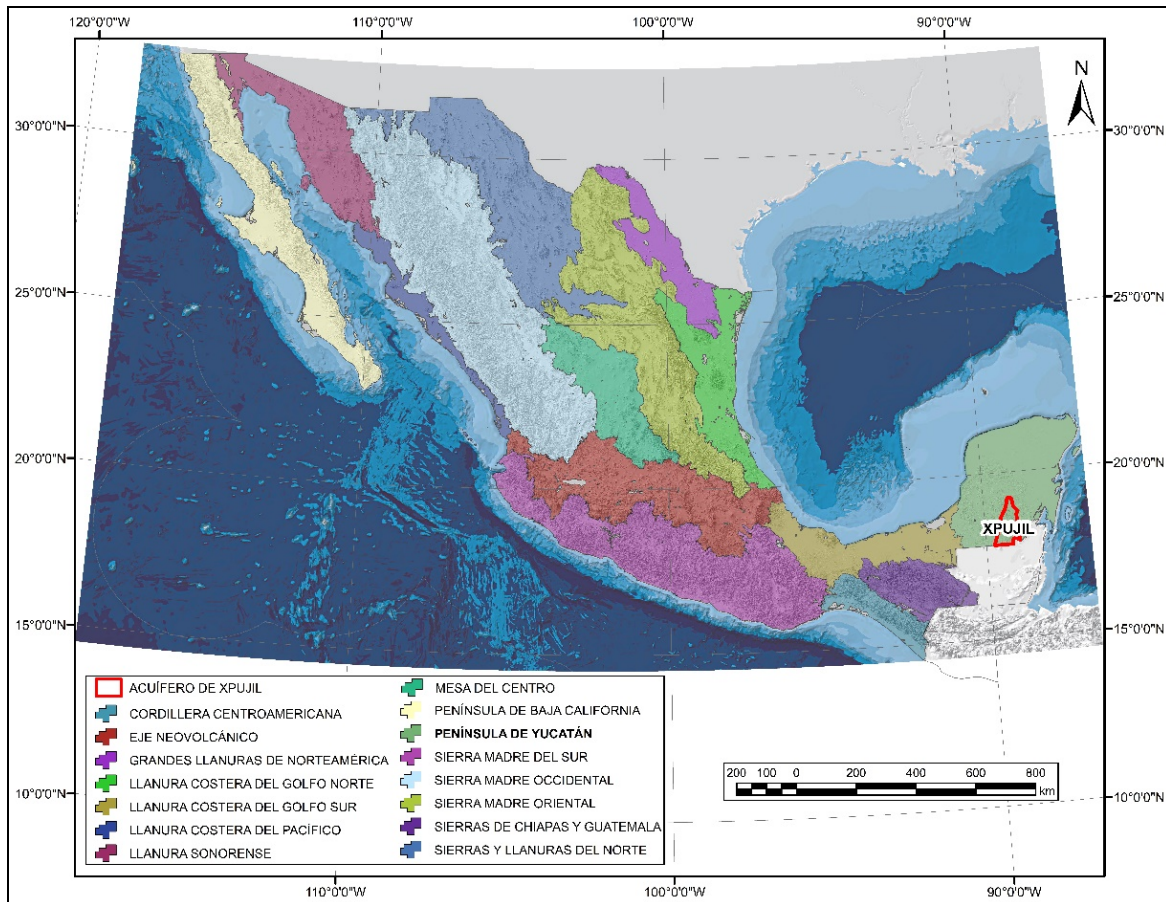
### 3.13 Orografía

No existen elevaciones de importancia; la altura máxima sobre el nivel medio del mar se encuentra en el cerro Chan Perico con 390 msnm y la mínima varía de 100 a 150 metros. La región es atravesada por una cadena de pequeñas elevaciones que reciben el nombre de meseta baja de Zoh-Laguna y que es donde se presentan las mayores altitudes de la Península.

La morfología del terreno presenta poca deformación y en algunas partes de naturaleza kárstica propicia que durante la temporada de lluvias extensas superficies permanezcan inundadas.

### 3.14 Fisiografía

Fisiográficamente, el acuífero de Xpujil queda comprendido en la Península de Yucatán. Es la provincia más joven de la República Mexicana, limitada al sur por la provincia fisiográfica Sierras de Chiapas y Guatemala, al suroeste por la provincia Llanura costera del Golfo Sur, al norte limita con el Golfo de México y al este con el Mar Caribe (Figura 3.26). La península de Yucatán presenta una topografía, que en general tiene una altitud promedio de 50 msnm y en la zona centro-sur de hasta 350 msnm.

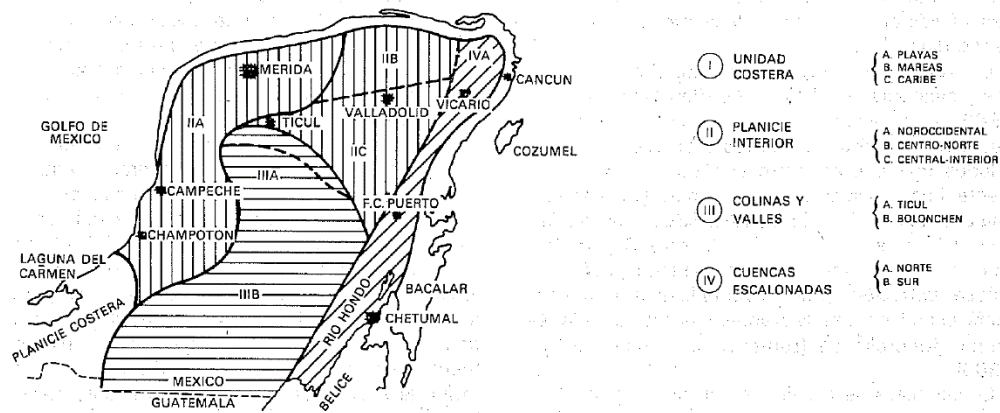


**Figura 3.26** Provincias fisiográficas del territorio mexicano. Resaltando con una línea rojo la ubicación del acuífero de Xpujil (INEGI).

### 3.15 Geomorfología

En la Península de Yucatán se identifican cuatro provincias geomórficas (Figura 3.27):

- I costera
- II planicie interior
- III colinas y valles:
  - IIIa Sierrita de Ticul
  - IIIb Colinas de Bolonchén
- IV cuencas escalonadas



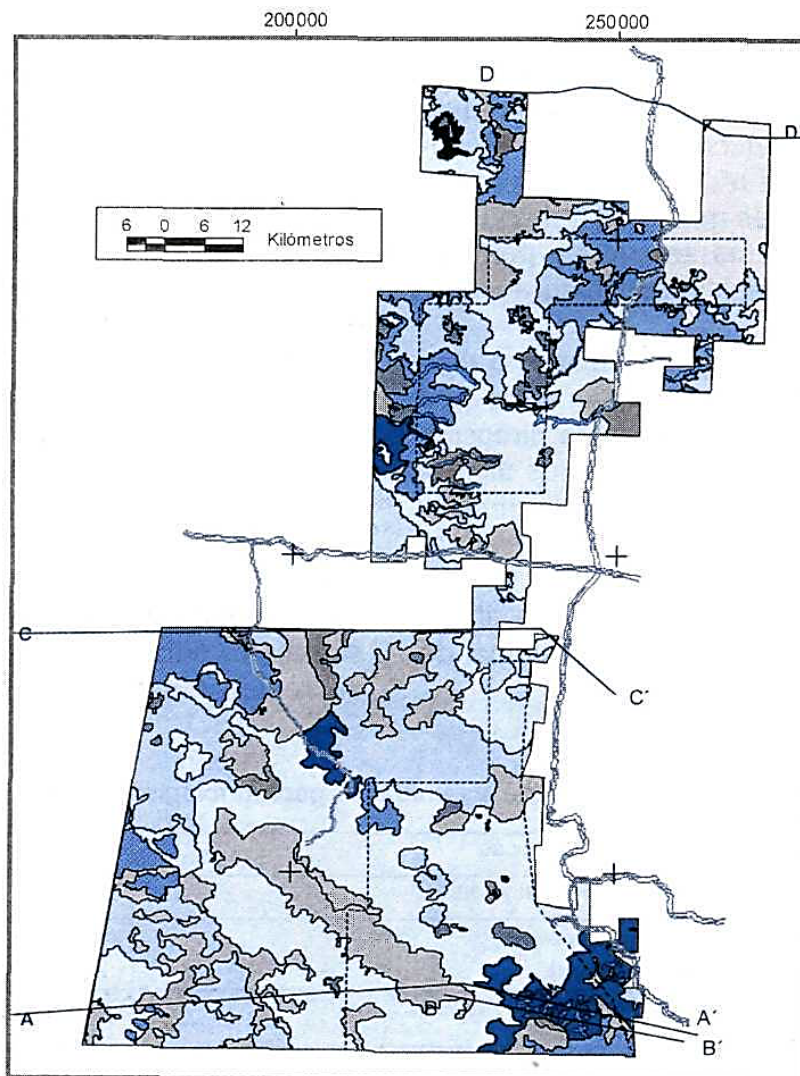
**Figura 3.27 Provincias geomorfológicas de la Península de Yucatán.**

El desarrollo geomorfológico inició durante el Terciario superior con la formación de una planicie calcárea que ha sido modelada por una intensa disolución, de este modo la región presenta gran cantidad de depresiones cársticas, las cuales acumulan gran cantidad de arcillas de descalcificación generando un relieve uniforme. Durante el Cuaternario, pantanos y lagunas comenzaron a formarse, así como la abundante acumulación de depósitos litorales.

La zona de estudio pertenece a la provincia IIIb, caracterizada por un relieve mayor, largas y grandes estructuras kársticas subterráneas y un macrokarst superficial de torres y domos asociado a un buen desarrollo de suelos de textura limo arcillosa ubicados en estructuras kársticas bajas similares a poljes. Además, se distingue por la ausencia de cenotes y dolinas, es decir, esta región se caracteriza por un mayor desarrollo de su karst. El inicio de los procesos kársticos de la provincia III se establece en el Oligoceno (hace más o menos 40 millones de años), época en que la porción sur ya había emergido y estaba expuesta a los procesos geológicos modeladores de intemperismo y erosión, entre otros (Goevaluaciones y Perforaciones S.A. de C.V.).

De acuerdo a Garcia et al. (2002), en la Reserva de la Biosfera Calakmul se identifican las siguientes unidades geomorfológicas (Figura 3.28):

- a) mesetas estructurales de desarrollo kárstico
- b) laderas según el grado de inclinación
- c) planicie estructural de nivel de base
- d) valles kársticos (depresiones tectónicas) y fluviales en formación
- e) relieve erosivo.



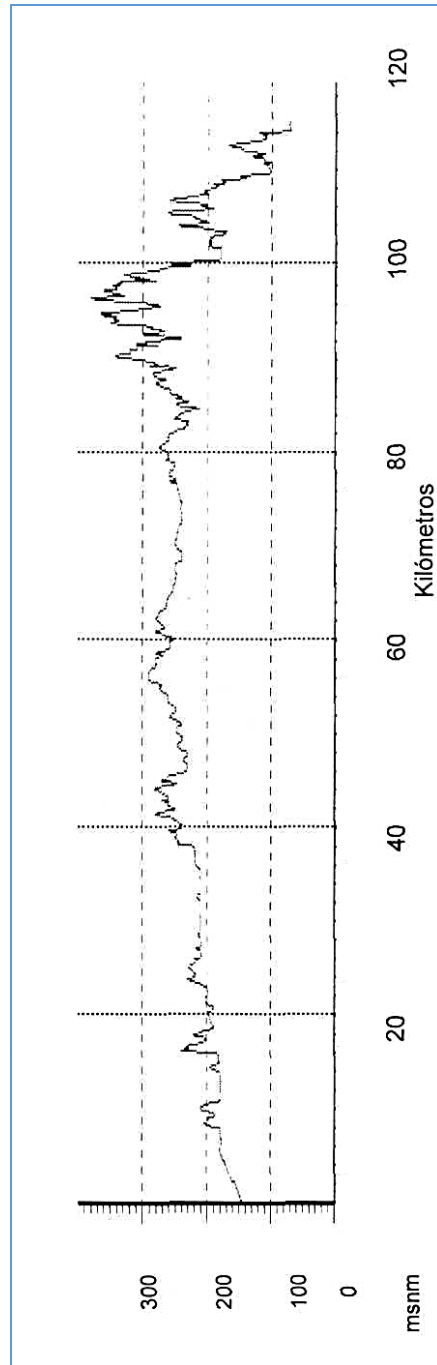
- |  |   |
|--|---|
| <p>Polígono de la Reserva</p> <p>∩ Zona de amortiguamiento</p> <p>∩ Zona nudo norte</p> <p>∩ Zona nudo sur</p> <p>Unidades geomorfológicas</p> <p>LADERAS DE DESARROLLO FLUVIO-CARSTICO</p> <p>■ Pendiente fuerte. (&gt; de 15°)</p> <p>■ Procesos erosivos y gravitacionales</p> <p>■ Pendiente moderada (entre 6 y 15°)</p> <p>■ Procesos de desarrollo fluvial y cárstico</p> <p>■ Pendiente Suave (&lt; de 6°)</p> <p>■ Procesos cárstico fluviales</p> <p>MESETAS DE DESARROLLO CARSTICO</p> <p>■ con colinas &gt; 50 m.</p> <p>■ Procesos fluviales y cársticos</p> <p>■ con colinas entre 20 y 50 m.</p> <p>■ Procesos cársticos y fluviales</p> <p>■ con colinas de &lt; de 20 m.</p> <p>■ Domina la evolución cárstica</p> <p>■ Mesetas niveladas</p> <p>■ Infiltración y desarrollo de carst</p> | <p>PLANICIE</p> <p>■ Planicie estructural.</p> <p>■ Infiltración y circulación subterránea</p> <p>DEPRESION TECTONICA Y VALLE CARSTICO</p> <p>■ Despresion kárstica</p> <p>■ Profundización del cárst</p> <p>DESARROLLO FLUVIAL</p> <p>■ Valle Fluvial</p> <p>■ Valles en formación</p> <p>SUPERFICIE DE ACUMULACION</p> <p>■ acumulación temporal</p> <p>RASGOS MENORES</p> <p>■ Elevaciones menores</p> <p>■ Testigos de erosión diferencial</p> <p>■ Relieve erosivo</p> <p>■ Formación de barrancos</p> |
|--|---|

**Figura 3.28 Principales unidades geomorfológicas en la Reserva de la Biosfera de Calakmul.**

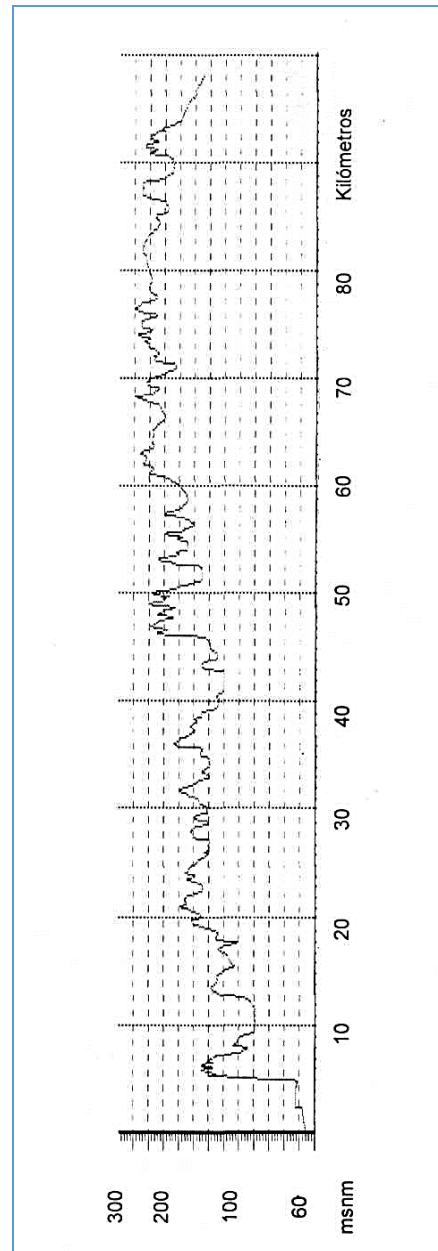


Las mesetas estructurales de desarrollo kárstico es la unidad geomorfológica dominante ya que cubren el 65% de la superficie total y evolucionan a partir de un abombamiento de la plataforma caliza que alcanza los 380 msnm (Figura 3.29). Las vertientes ocupan el 6.5% de la reserva, se encuentran en torno a las mesetas limitando valles y depresiones kársticas (Figura 3.30). Las laderas forman la vertiente oriental y occidental de la reserva, y están cubiertas por selvas medianas y altas. La planicie estructural de nivel de base es una superficie de altitud inferior a 100 msnm (Figura 30) que se caracteriza por ser plana y sin evidencias superficiales de escurrimiento, sólo áreas de inundación temporal y permanente. Los valles de desarrollo kárstico están controlados estructuralmente, tienen un fondo plano atravesado por escurrimientos superficiales de régimen intermitente y se encuentran sujetos a inundaciones periódicas durante la estación lluviosa, por lo que desplazan grandes volúmenes de agua superficial y subterránea. Los valles fluviales son incipientes, se localizan entre las mesetas y se distinguen por tener un dren superficial principal con tributarios estacionales. El nivel de evolución del desarrollo kárstico en la región de Calakmul es diferenciado de acuerdo a su intensidad:

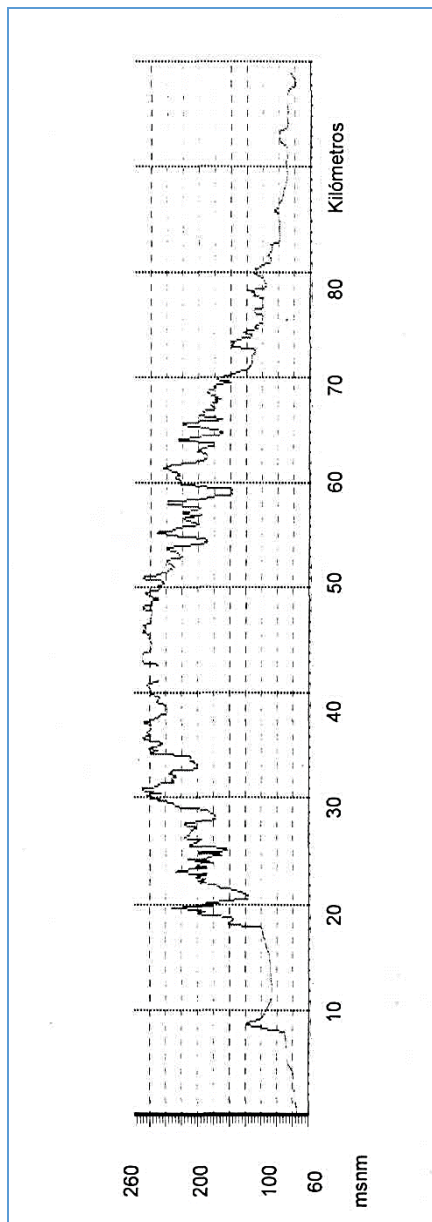
- a) Alto: en superficies de menor altitud (valles y planicies) con escurrimiento superficial reducido o régimen intermitente, donde domina la infiltración profunda y el flujo subterráneo
- b) Medio: en zonas con alternancia de condiciones hídricas superficiales y de infiltración, de relieve complejo (mesetas y laderas)
- c) Bajo: en las mayores altitudes de la zona donde dominan condiciones de escurrimiento superficial (mesetas con mucho relieve y laderas de cierta pendiente).



**Figura 3.29 Perfil topográfico A-A': se muestran las mayores elevaciones de la reserva (extremo derecha) y las mesetas de desarrollo kárstico (centro e izquierda).**



**Figura 3.30 Perfil topográfico C-C': se muestran las superficies de laderas que limitan mesetas y depresiones tectónicas.**



**Figura 3.31 Perfil topográfico D-D': se muestra la planicie estructural en las vertientes del Golfo de México y la del Caribe, con dirección este-oeste y altura inferior a 100m.**

Con base en el análisis de suelo, topografía, geología y vegetación García et al. (2002) identificaron las zonas donde se puede presentar karts (Figura 3.32), así como las 1,353 aguadas o dolinas (pequeñas depresiones de disolución kárstica) detectadas en la reserva (Figura 3.33).

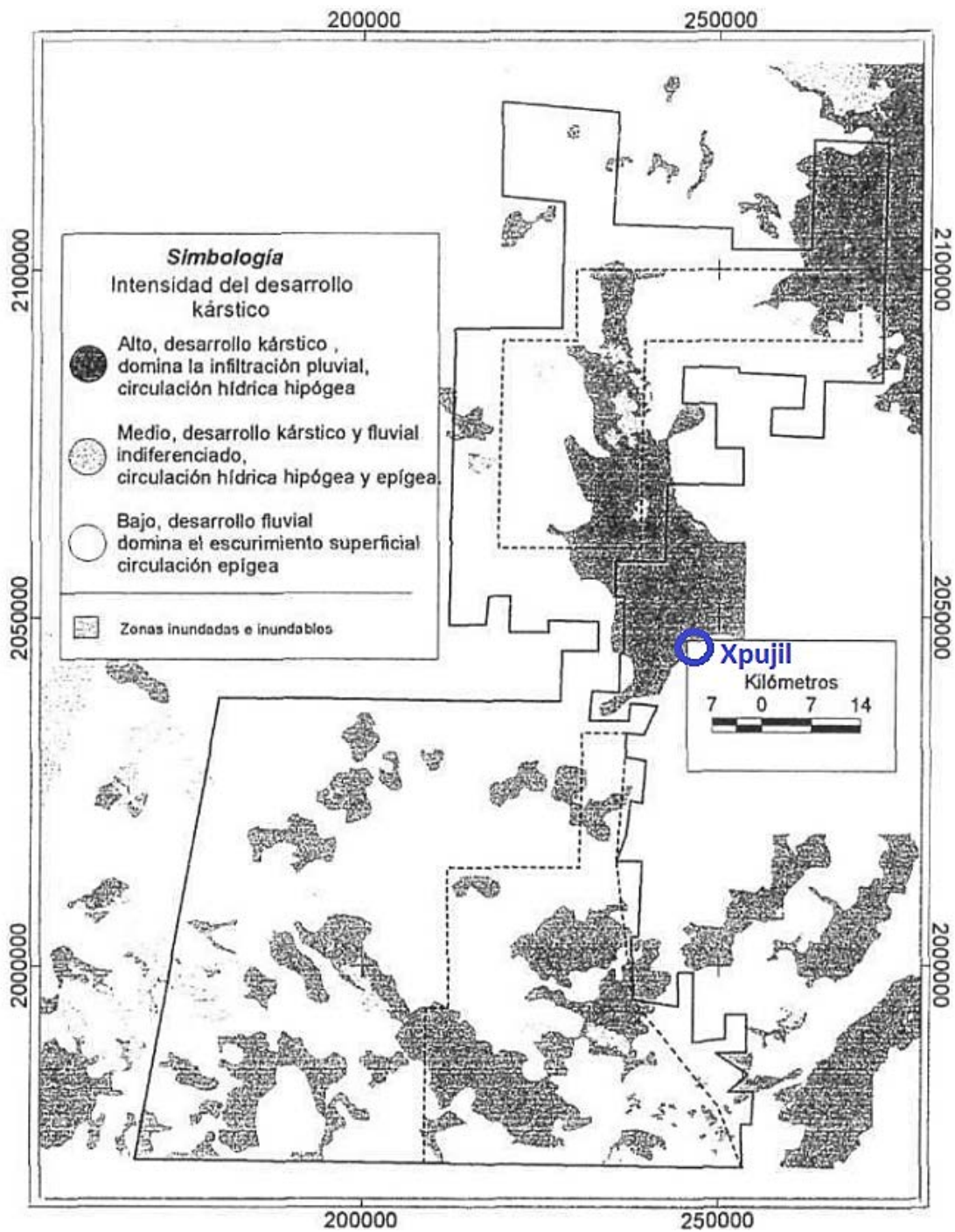


Figura 3.32 Intensidad del desarrollo kárstico (García et al, 2002).

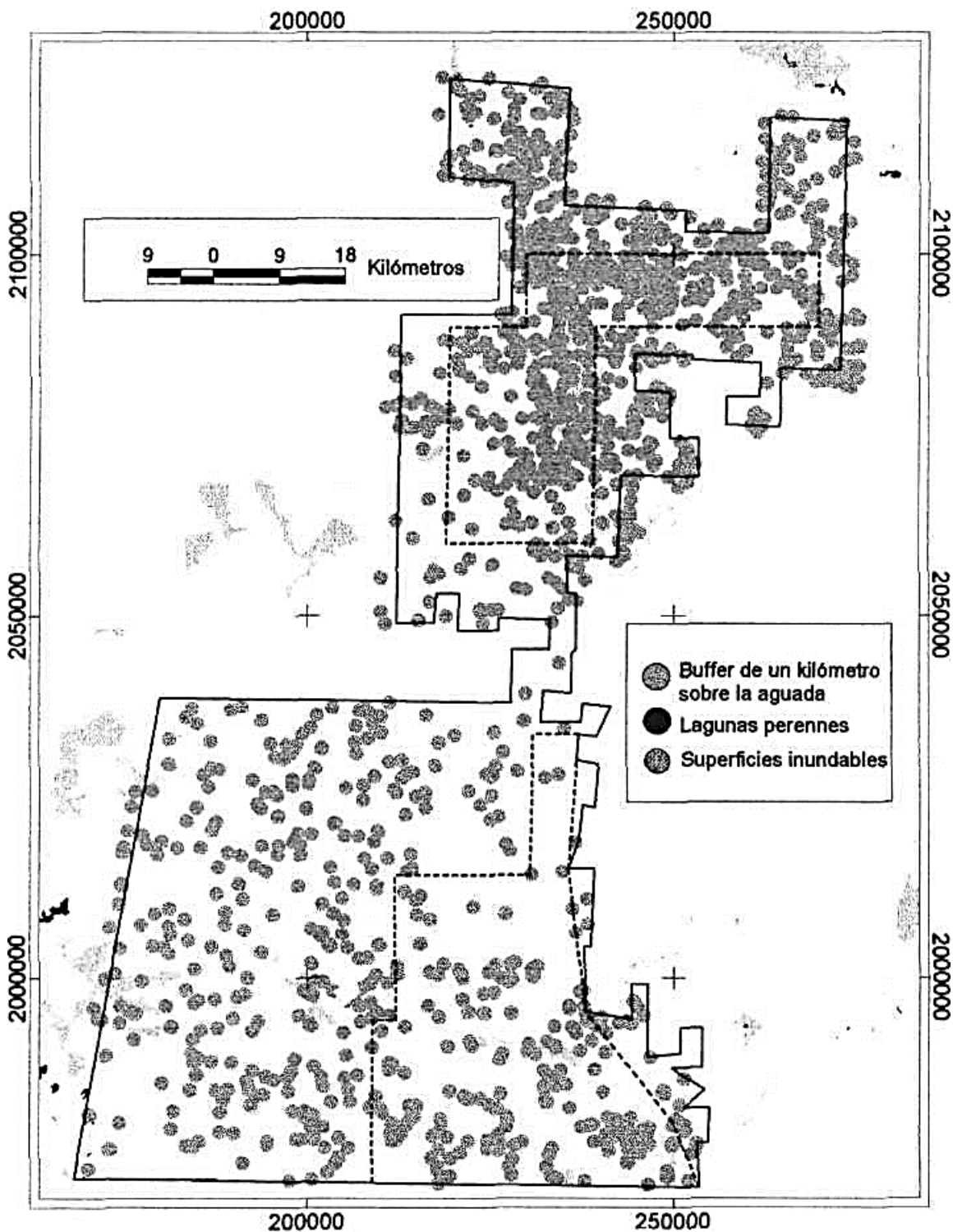


Figura 3.33 Distribución de aguadas o dolinas en la Reserva de la Biosfera de Calakmul.

### **3.16 Geología**

La península de Yucatán es una plataforma de rocas calcáreas que sobreyacen al basamento metamórfico de edad paleozoica (López, 1975); aflora además una secuencia de rocas calizas del Cenozoico, con deformaciones poco significativas. En las selvas de Calakmul se observan afloramientos del Paleoceno, que forman el relieve con mayor altitud en la península (380 m). Butterlin y Bonet en 1963 reportaron rocas calizas con arcilla parcialmente silicificadas, reconocibles por su color café, blanco o amarillo, dispuestas en capas dolomitizadas, con presencia de nódulos de pedernal, yeso y micro-fauna mal preservada; casi siempre se encuentran cubiertas por una capa blanda de material intemperizado llamado localmente "caliche" y por arenas margosas. Las calizas del Paleoceno forman los afloramientos más antiguos en la península de Yucatán, donde se aprecia el relieve más afectado por influencia de la tectónica; éstos se localizan en el extremo sur en los límites con Guatemala y Belice. Al centro y norte de la península afloran el cuaternario, eoceno y mioceno.

Los depósitos del cuaternario en la Reserva de la Biosfera de Calakmul están restringidos a superficies negativas o de acumulación de depósitos remanentes de la disolución de rocas calizas, que corresponden a material no consolidado formado por gravas, arenas, limos y arcillas calcáreas (Figura 3.34).

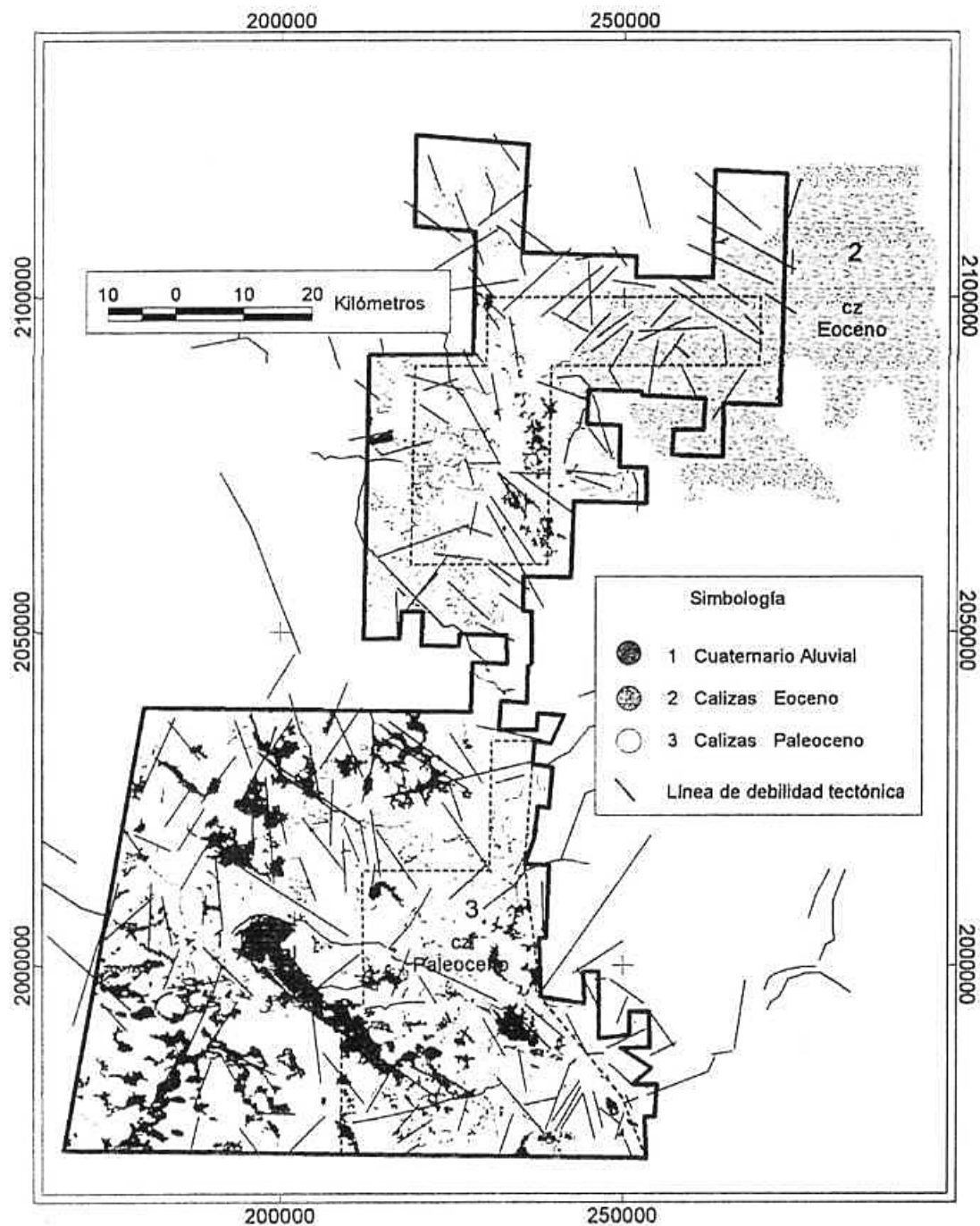


Figura 3.34 Mapa geológico y principales alineamientos tectónicos de la RBC.

### 3.16.1 Geología regional

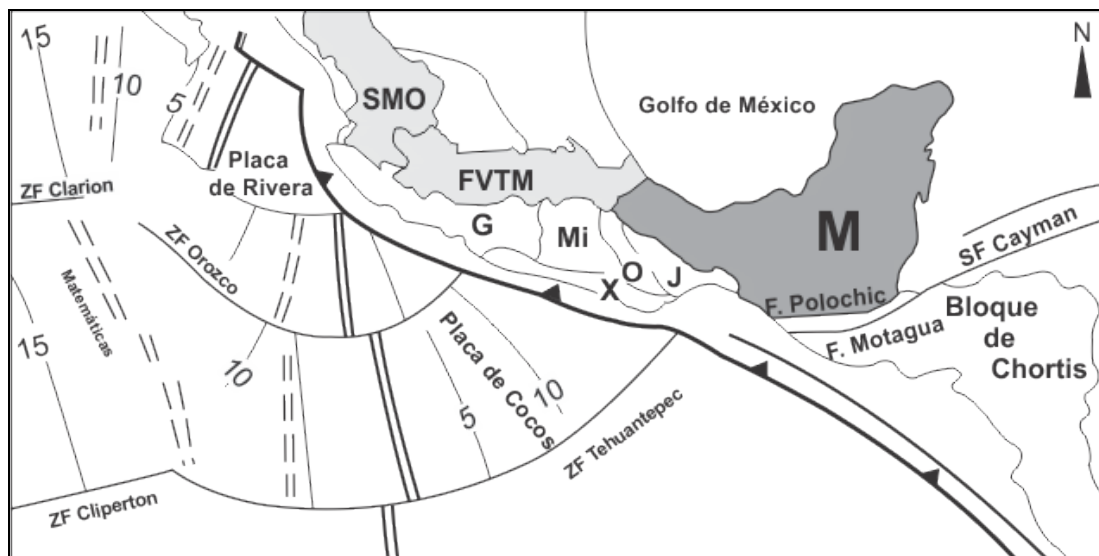
El Sur de México por muchos autores ha sido considerado como un ensamble o collage de terrenos tectonoestratigráficos (Campa y Coney, 1983; Sedlock et al., 1993; Ortega-Gutiérrez et al., 1999; Keppie, 2004). Durante los últimos años, la correlación de estos terrenos ha sido motivo de discusión, respecto a sus posiciones pre-Mesozoicas



como márgenes peri-Gondwanicos entre los megacontinentes Gondwana y Laurentia o como bloques exóticos en la margen pacífica que han sido identificados como elementos clave para el ensamble del mega continente Pangea durante el Paleozoico.

Normalmente se subdivide a la región sur de México y América Central en bloques separados por fallas mayores, en cuyas columnas estratigráficas contrastan sus componentes litológicos (Ortega-Gutiérrez et al., 2007). Sin embargo, la movilidad relativa y magnitud de desplazamiento de los bloques en la actualidad continúa siendo objeto de debate, esto debido a que los datos geocronológicos, isotópicos y paleomagnéticos para esta región son muy escasos. No obstante Ortega-Gutiérrez et al., (2007), reconoce tres dominios tectonoestratigráficos principales: Bloque Maya, Bloque Chortis y un conjunto de supuestos terrenos limitados por fallas, es decir, bloques de falla de acuerdo a Keppie, (2004), todos descritos de un modo individual debido a que poseen basamentos distintos que en ocasiones se encuentran bajo una cubierta de rocas sedimentarias y volcánicas.

El acuífero de Xpujil se ubica en el denominado Terreno Maya (Campa y Coney, 1938; Sedlock et al., 1993) O Bloque Maya (Dengo, 1985), el cual se describe como un bloque cortical que comprende La Península de Yucatán, parte de la planicie costera del Golfo de México, Belice y Guatemala hacia el sistema de fallas Polochic-Motagua, el cual representa el límite entre la placa de Norte Americana con la placa del Caribe (Figura 3.35). En un estudio sobre la evolución tectónica de México, Sedlock et al., 1993, dividen al Bloque Maya en tres provincias geográficas: la provincia del Norte, la Plataforma de Yucatán y la provincia del Sur.



**Figura 3.35 Ubicación geológica del área de estudio. SMO, Sierra Madre Occidental; FVTM, Faja Volcánica Transmexicana; G, terreno Guerrero; Mi, terreno Mixteca; O, terreno Oaxaca; J, terreno Juárez; X, terreno Xolapa; M, terreno Maya. ZF, zona de fractura (modificada de Morán-Zenteno et al., 2005).**

El basamento metamórfico del terreno Maya es de origen Pangéico continental, el cual se separa del Bloque Louisiana-Texas al momento de la apertura del Golfo de México (dispersión de Pangea); su posición actual viene desde finales del Triásico. Sobre este basamento se acumuló una capa gruesa de sedimentos marinos del Paleozoico tardío, representados por lechos rojos continentales, posterior durante el Calloviano, se produce una invasión de aguas marinas provenientes del Pacífico cubriendo una extensa zona con poca circulación, poco tirante de agua y alta evaporación, condiciones que favorecieron al depósito de grandes volúmenes de sal en el centro de la cuenca. Durante el Jurásico tardío hasta el Cretácico tardío la sedimentación estuvo dominada por carbonatos, cambiando a clásticos a principios del Paleógeno a causa de la Orogenia Laramide. Durante el resto del Paleógeno la sedimentación clástica se fue alojando en grandes depocentros formados en el antepaís de la Sierra Madre Oriental y en las porciones sur y suroccidental del Golfo de México, en donde el Macizo de Chiapas aportó un gran volumen de sedimentos, mientras que sobre el Bloque Maya continuaba el depósito de carbonatos de plataforma somera. En el Mioceno medio, durante el Serravaliano, la compresión derivada del movimiento lateral del Bloque de Chortis y de la subducción de la Placa de Cocos contra la terminación meridional de la Placa de Norteamérica formó los pliegues y fallas de la cadena de Chiapas-Reforma-Akal sobre el nivel de la sal del Calloviano; posteriormente estas estructuras se bascularon hacia el NNW cuando la sal se movilizó hacia el norte. El cambio de posición de la masa de sal generó nuevas fallas antitéticas regionales, que limitan las Cuencas del Sureste. El movimiento gravitacional de los depósitos Cenozoicos causó finalmente inversión tectónica en las cuencas neógenas, siendo esta más evidente en la Cuenca de Macuspana.

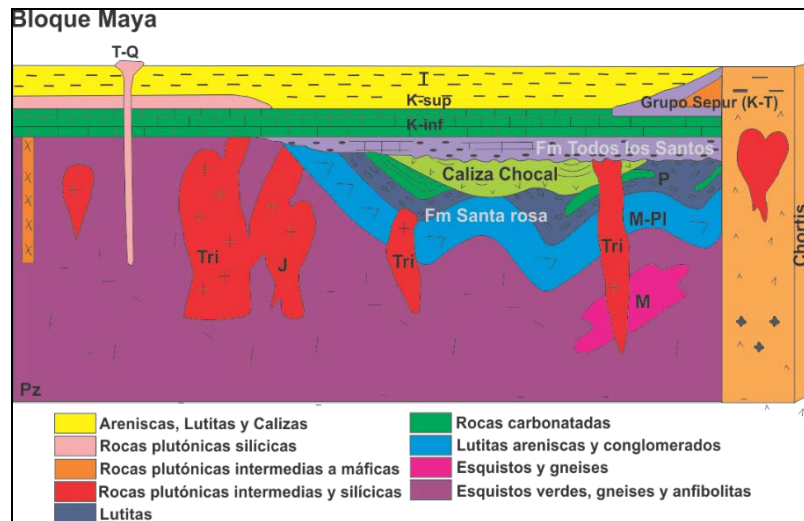
En general la Plataforma de Yucatán es conformada por calizas de periodos del Cretácico (144 a 165 millones de años) al Cenozoico-Cuaternario (65 millones de años al reciente), con la presencia de una estructura de impacto, el cráter de Chicxulub el cual es considerado como el límite Cretácico-Terciario (Blum et al., 1993). La plataforma refleja un gradiente temporal en sentido norte-sur, lo cual indica una emergencia paulatina de la plataforma durante el Plioceno (5.2 a 1.8 millones de años). Esta emergencia paulatina explica la asimetría, que se extiende solamente unos 10 km en el margen del Caribe y hasta 200 km del lado del Golfo de México.

### **3.16.2 Estratigrafía**

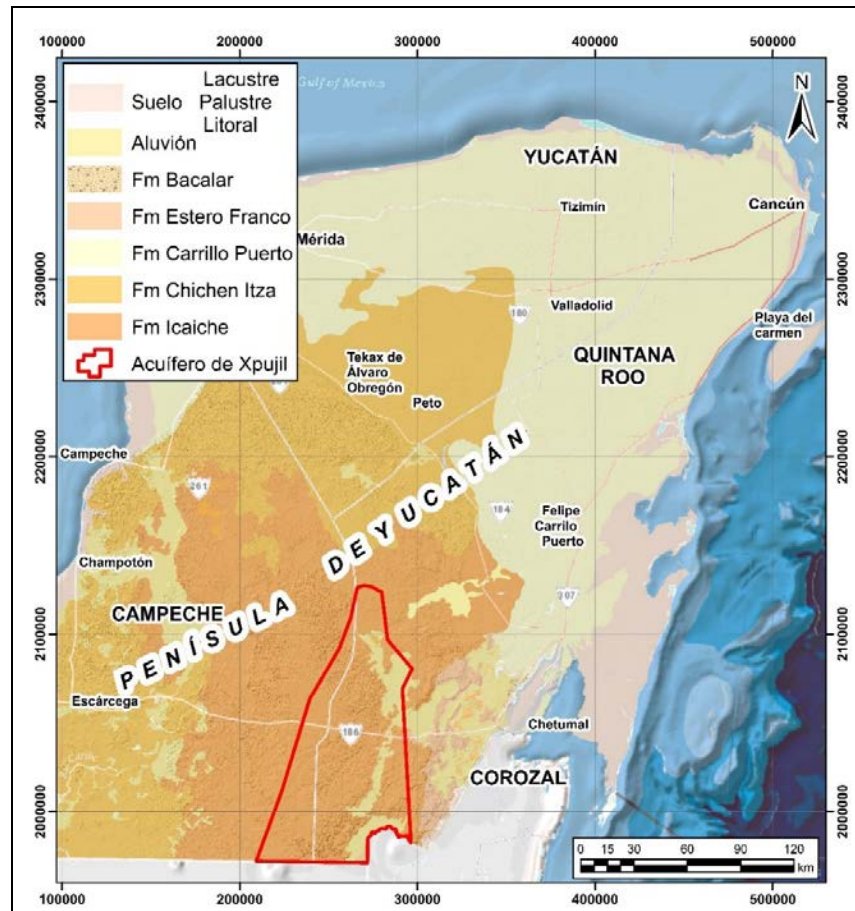
La sucesión estratigráfica general del sureste de México, en específico para la Península de Yucatán, consiste de un basamento pre-Mesozoico, el cual es cubierto por rocas carbonatadas del Mesozoico y Cenozoico (Figura 3.36). Solo es posible observar a estas rocas cristalinas en el área de Chicomuselo en Chiapas, Las Montañas Maya en Belice y en el corazón de los Altos Cuchumatanes en Guatemala, todos ubicados al sOur del Terreno Maya y son representados por las unidades litológicas correspondientes a la Formación Santa Rosa, la Formación Chocal y el Macizo de Chiapas (Sedlock et al, 1993). Dicho basamento Paleozoico como ya se mencionó fue cubierto posteriormente por una sucesión de sedimentos calcáreos de origen marino desde el principio del Mesozoico hasta el Cuaternario (Butterlin y Bonet, 1960).

Desde los inicios del Triásico hasta el Cuaternario fue el principio de una etapa extensa de depósitos de carbonatos y evaporitas, dichos depósitos se encargaron de dar origen a la denominada Plataforma de Yucatán (Figura 3.37).

A continuación, se describirán las unidades litológicas que constituyen la mencionada sucesión de sedimentos calcáreos (Figura 3.38) de acorde a su edad y en un orden cronológico.



**Figura 3.36 Columna estratigráfica esquemática de los paquetes que forman el Bloque Maya (modificada de Sedlock et al., 1993).**



**Figura 3.37 Mapa geológico de la Península de Yucatán, (cartografía tomada del SGM). Cenozoico.**

La sedimentación clástica se alojaba en depocentros sobre el antepaís de la sierra Madre Oriental y en las porciones sur y suroccidental del Golfo de México, mientras que sobre el Terreno Maya continuaba el depósito de carbonatos de plataforma somera.

Formación Icaiche (Paleoceno-Eoceno inferior). Esta formación se encuentra formada por calizas compactas de micro a macro cristalinas, generalmente dolomitizadas, a veces silicificadas o bien simplemente recristalizadas, lo que explica la ausencia de fósiles (Álvarez, 1969). López Ramos para el año de 1975 describió que al atravesar el pozo Corinto No 1 encontró una secuencia de más de 500 metros y no llegó a la base de la misma por lo que no se sabe el espesor exacto.

Formación Chichen Itzá (Eoceno medio-superior). Las rocas de esta formación son calizas con abundante fauna, presentan ligeras variaciones litológicas lo que permite dividirla en tres miembros: Miembro Xbacal, Miembro Pisté y Miembro Chumbec; fue depositada sobre una base casi plana, por lo que no ofrece grandes variaciones en los ambientes de depósito, es decir, se depositó bajo condiciones muy similares, lo cual puede ser diferenciado sólo mediante la microfauna.

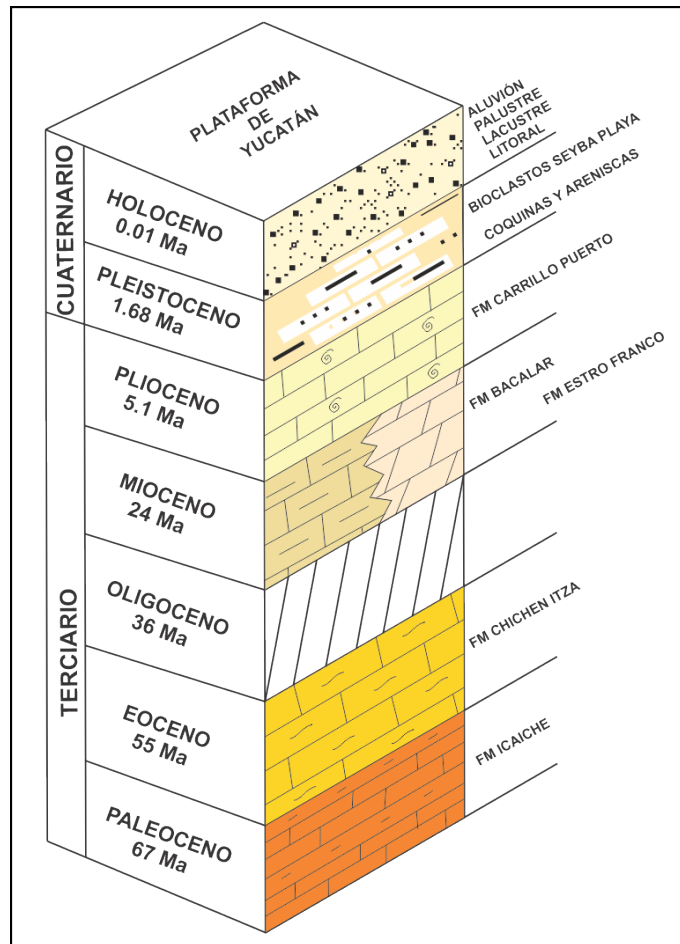
Miembro Pisté. Corresponde al Eoceno medio y está conformado por calizas blancas o amarillentas, a menudo masivas. La microfauna, que es abundante, está representada por numerosos foraminíferos sobre todo la familia Valvulinidae y por algas calcáreas (Clypeina), característicos del Eoceno medio del Caribe y semejantes a los niveles más elevados de la Formación Calcárea del Petén. El miembro Pisté constituye una gran parte de la región central de la Península.

Miembro Chumbec. Corresponde al Eoceno superior y se caracteriza por calizas masivas, blancas y muy cristalinas con aspecto de mármoles sacaroideos. El espesor de estas rocas es de 100 m aproximadamente.

Formación Bacalar (Mioceno Inferior). Fue definida por J. Butterlin en 1958, consiste de calizas blandas de colores blancos y de aspecto calichoso, pero con nódulos duros que pueden formar verdaderos niveles, éstas pasan a margas blancas en los niveles inferiores y a veces se presentan finas capas de yeso. El contenido fósil es representado por gasterópodos, ostrácodos y hexacolarios. Estos datos fueron reportados por López Ramos (1975), quien consideró que su espesor debió alcanzar varios centenares de metros.

Formación Estero Franco. Descrita por primera vez por M. Álvarez Jr. (1954), nombre asignado debido a que fue descrita cerca de un centro de extracción de goma. Son calizas y dolomitas cristalinas de colores amarillentos, con buena estratificación regularmente (10 a 50 cm de grosor) con presencia de nódulos de sílice relleno las fracturas, mostrando una textura sacaroide. Los niveles superiores están representados por estratos más masivos de tonos claros a rosados.

Estratigráficamente parecen cubrir de modo concordante a la Formación Bacalar, y es considerada como un equivalente lateral de la Formación Carrillo Puerto.



**Figura 3.38** Columna estratigráfica general de la Península de Yucatán (datos del SGM).

Formación Carrillo Puerto (Mioceno Superior-Plioceno). Fue reconocida por Butterlin (1958). Los niveles inferiores corresponden a coquinas de más o menos 10 m de espesor, cubiertas por calizas duras. La alteración de estas rocas por el intemperismo origina arcillas lateríticas. Los niveles superiores están representados por calizas blancas, duras y masivas. Los echados presentan orientación NNE, su localidad tipo se encuentra en el kilómetro 112 la carretera Peto-Carrillo Puerto, recubre concordantemente a la formación Bacalar que aflora en el Estado de Quintana Roo, o bien, descansa discordantemente sobre las series Eocénicas, lo cual muestra su carácter transgresivo; su espesor debe alcanzar varios centenares de metros.

Bioclastos Seiba Playa, areniscas y coquinas (Pleistoceno-Holoceno). Son bioclastos, conglomerados policmíticos de calizas coquiníferas intercaladas con coquinas masivas, bechas y sílice cementados en una matriz bioclástica con tonalidades de blanco a crema. Sobreyacen concordantemente a las unidades del Mioceno y probablemente las calizas consolidadas pertenecen al Pleistoceno y las capas superiores más blandas y costeras pertenezcan al Reciente.

Suelos (Holoceno). Cubriendo indistintamente o parcialmente a todas de las unidades litológicas ya mencionadas se encuentran depósitos aluviales constituidos esencialmente por limos y arcillas; depósitos lacustres constituidos principalmente por una gran cantidad de restos vegetales mezclados con limos y arcillas; y por depósitos palustres los cuales son formados por arcillas y limos con gran aporte de materia orgánica, en una mezcla con tallos y raíces.

### **3.16.3 Geología local**

Formación Icaiche. Esta unidad mantiene un dominio sobre la superficie del acuífero de Xpujil, en general se presenta como lomeríos semiredondeados, distribuidos irregularmente en una dirección NE-SO limitados por planicies. Estas secuencias de calizas sin deformación significativa son microcristalinas de textura mudstone, estratificadas y ocasionalmente de un aspecto masivo. Contiene raros fragmentos de sílice, así como cambios de facies limo-arcillosos, con depósitos de yesos y en ciertas partes nódulos de pedernal negro.

Las estructuras principales en esta unidad son mayormente poljes y en menor proporción dolinas, estos rasgos cársticos fueron probablemente ocasionados por la actividad geotectónica del Neógeno.

La Formación Icaiché es un acuífero regional de tipo libre, la intensa carstificación presente propicia zonas de gran permeabilidad, la alta solubilidad de su matriz ha desarrollado fracturas y canales de disolución, siendo entonces, un acuífero cárstico maduro, por donde los flujos subterráneos circulan preferentemente.

Aluvión. Cubriendo indistintamente a las unidades mencionadas se encuentran depósitos no consolidados de aluvión, el cuál es principalmente constituido por limos y arcillas aflorando con mayor abundancia en la porción suroeste del área de estudio, estas adoptan una morfología de acuerdo a las rocas subyacentes, sin embargo, estas ocasionalmente muestran inundaciones temporales.

## **4 ACTUALIZACIÓN PIEZOMÉTRICA EN EL ACUÍFERO XPUJIL Y EN LAS ZONAS DE CALAKMUL, HOLPECHEN, CONSTITUCIÓN Y NUEVO VERACRUZ**

### **4.1 Verificación de los aprovechamientos existentes**

Del 30 de mayo al 14 de junio, se realizó la actualización piezométrica en el acuífero Xpujil, registrando pozos en las zonas de:

- Acuífero Xpujil
- Ramón Corona
- Constitución

La verificación de los aprovechamientos en el acuífero Xpujil se llevó a cabo en base a aprovechamientos reportados en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), así como de la información del “Estudio geohidrológico y geofísico en el municipio de Calakmul, en el estado de Campeche” (CONAGUA, 2014) y en las zonas de Ramón Corona y Constitución en base a información publicada en el Estudio hidrológico, hidráulico y de calidad del agua en la zona de influencia del Tren Maya (IMTA, 2018).

Se incluyeron las zonas de Ramón Corona y Constitución, debido a que el “Estudio hidrológico, hidráulico y de calidad del agua en la zona de influencia del Tren Maya” realizado por el IMTA (2018), contempla la “Conducción de agua potable para suministro de las comunidades de nueva creación en el municipio de Calakmul” extrayendo agua de estas zonas y debido a que el suministro de agua a la Ciudad de Xpujil se realiza mediante la explotación y conducción de agua subterránea del acuífero ubicado en la zona de la laguna SILVITUC, se incluyeron los tres pozos existentes.

También se incluyen las zonas de Nuevo Veracruz, El Clavito, Santa Rosa y Dos Naciones debido a que según reportes de la CONAGUA (2015), el agua subterránea tiene agua de buena calidad.

En las Tablas 4.1 se muestra la identificación de los aprovechamientos verificados en las zonas antes descritas, así como sus coordenadas UTM.

En la Figura 4.1 se puede observar la localización de los aprovechamientos censados durante la actualización piezométrica llevada a cabo por el IMTA. En el Anexo No. 1, se muestra el álbum fotográfico de los aprovechamientos reportados.



**Tabla 4.1 Aprovechamientos censados en el acuífero Xpujil**

No.	Identificación	X	Y
1	P-R-CORONA	241,818	2,152,384
2	P-V-GRO	226,751	2,166,429
3	P-DBZCHEN	212,432	2,153,823
4	P-MEJIA	250,426	2,128,375
5	P-UKUM-2	254,179	2,129,519
6	P-UKUM1	254,646	2,129,620
7	P-UKUM	254,672	2,130,458
8	P-XMABEN1	256,598	2,128,554
9	P-XMABEN	256,681	2,128,493
10	P-XKAN-HA	254,624	2,113,701
11	P-XP31	797,622	2,063,056
12	P-ST-LUCIA	796,679	2,061,445
13	P-XP30	799,006	2,063,113
14	P-XP32	802,306	2,061,827
15	P-XP32	802,375	2,061,193
16	P-XP34	801,794	2,061,315
17	P-PGARGIA-	801,913	2,057,688
18	P-XP25	279,755	2,072,976
19	P-XP24	282,692	2,075,883
20	P-XP28	281,172	2,084,403
21	P-XP20	279,353	2,092,750
22	P-XP23	280,898	2,095,629
23	P-XP21	280,912	2,093,131
24	P-XP26	275,002	2,078,808
25	P-XP19	291,434	2,069,065
26	P-XP18	291,641	2,069,062
27	P-XP12	250,254	1,977,759
28	P-XP13	261,898	1,976,055
29	P-XP44	262,541	1,977,440
30	P-XP2	261,109	1,983,277
31	P-XP3	263,655	1,986,873
32	P-XP4	265,407	1,989,712
33	P-XP42	267,046	1,992,734

34	P-XP5	267,623	1,993,015
35	P-XP10	255,877	2,018,631
36	P-XP9	255,739	2,018,421
37	P-XP40	248,473	2,020,337
38	P-XP8	241,228	2,026,856
39	P-XP2	245,039	2,057,962
40	P-XP14	256,379	2,041,667
41	P-XP16	280,696	2,042,944
42	P-XP17	278,074	2,040,400
43	P-XP43	274,383	2,037,653
44	P-3REYES	251,215	2,083,629
45	P-XP6	269,801	1,997,078
46	P-XP7	273,207	2,005,415
47	P-XP1	257,846	1,979,017
48	Manantial Nuevo Becal	260,483	2,057,552
49	P-1 Silvituc	788,245	2,064,385
50	P-2 Silvituc	788,745	2,064,309
51	P-3 Silvituc	789,233	2,064,248
52	Caobas Nuevo	286,082	2,038,624
53	Rancho Icaiché	272,131	1,996,924



## **4.2 Resultados de la verificación de aprovechamientos existentes en el acuífero Xpujil.**

Se registraron 53 aprovechamientos:

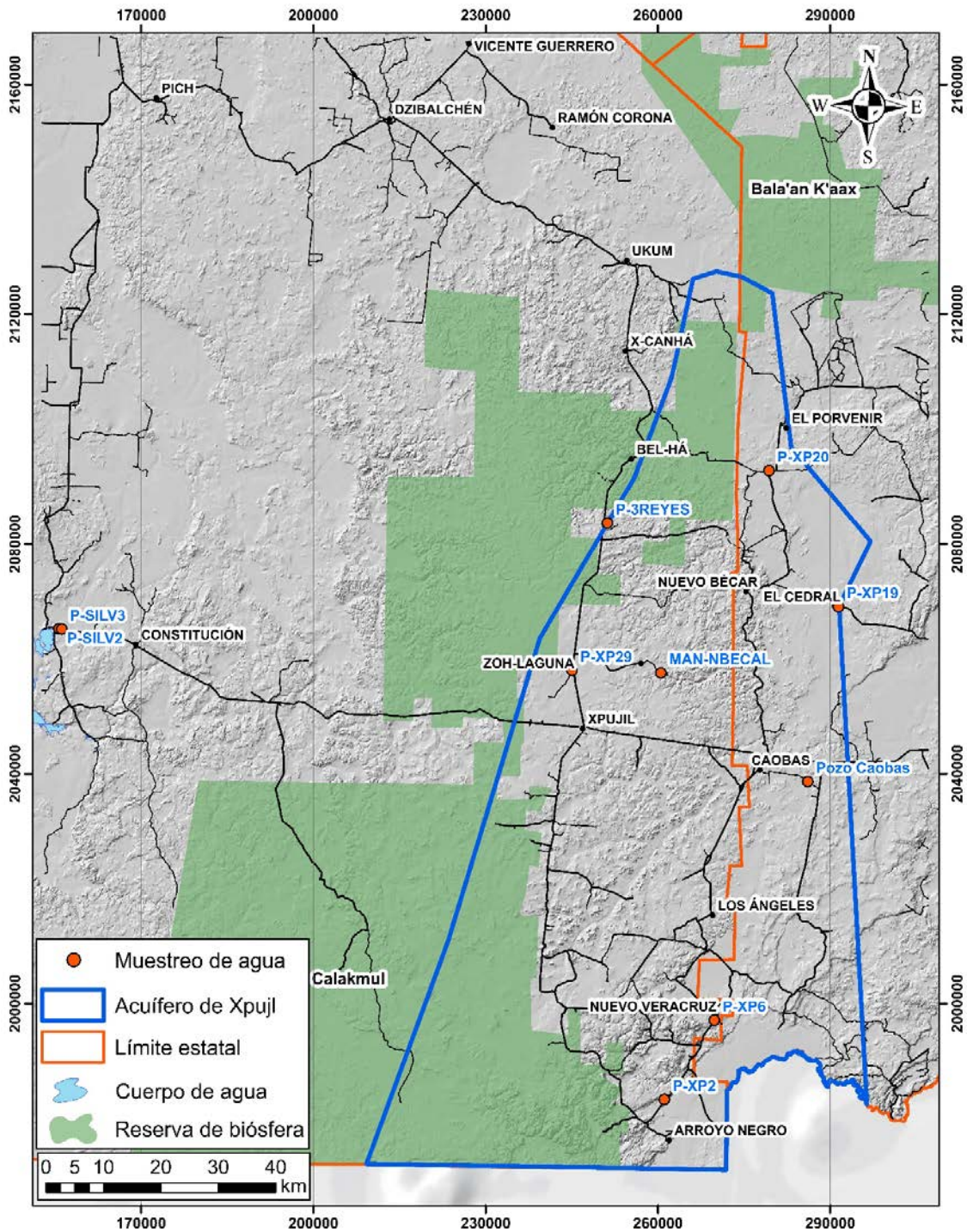
- 46 son pozos que se localizan en los poblados dentro del acuífero Xpujil y suministran agua para el uso público-urbano, doméstico y servicios.
- 3 norias en el poblado la virgencita y Ricardo Payro (al sur de Xpujil), para uso doméstico y servicios.
- 1 “olla de agua” principal fuente de abastecimiento en el poblado La Virgencita (al sur de Xpujil), para uso doméstico y servicios.
- 3 pozos en Silvituc que conducen el agua subterránea a la Ciudad de Xpujil.
- La profundidad de los pozos es de 80 a 200 m.
- En 46 aprovechamientos, los diámetros de descarga son de 1, 2 y 3”
- En 46 aprovechamientos, los caudales de extracción fluctúan entre 2 a 10 lps.
- Los pozos de Silvituc tienen descargas de 12” y caudales de extracción de 40, 50 y 30 lps, respectivamente. Entregan 47 lps a Xpujil.
- Durante los recorridos de campo en la zona de Xpujil y comunidades alrededor se observó que en la mayoría de las viviendas captan el agua de lluvia de los techos hacia tinacos de 1,000 litros o de más capacidad.

## **4.3 Selección de la red de pozos de observación**

Durante los recorridos de campo para la verificación de aprovechamientos en el acuífero Xpujil, se seleccionaron los aprovechamientos considerando que:

- i) La posibilidad de introducir la sonda eléctrica, para poder medir el nivel estático y/o dinámico, ya que todos están equipados con equipo sumergible y carecen de un poliducto para introducir el cable;
- ii) La ubicación espacial, para poder utilizar la técnica de la configuración triangular de tres pozos propuesta por Driscoll (1986), ya que la dirección del flujo del agua subterránea se puede calcular mediante la conexión de un triángulo, donde a través de los niveles piezométricos medidos en tres pozos, es posible interpolar.
- iii) Para el muestreo y análisis físico-químico e isotópico, se consideró su distribución espacial, así como que el tren de descarga posea un grifo, válvula de descarga, etc.

Los pozos seleccionados para el muestreo y análisis físico-químico e isotópico se muestran en la figura 4.2.



**Figura 4.2 Red de pozos de observación para calidad del agua en el acuífero Xpujil**

## **5 NIVELACIÓN DE BROCALES**

De acuerdo con la verificación de aprovechamientos y la selección de la red de pozos de observación en cada zona de influencia de los manantiales en estudio (acuíferos Cuautla-Yautepec, Cuernavaca y Zacatepec), los cuales servirán de apoyo para medir la profundidad del nivel del agua, calcular la elevación de su brocal, determinar la elevación del nivel estático y como un resultado definir la dirección del flujo subterráneo en cada zona.

Uno de los principales elementos requeridos para dicho estudio es la elevación referida sobre el nivel medio del mar de cada punto, para ello fue necesario realizar una nivelación topográfica a través de un método directo. A continuación se muestra la metodología, características y demás aspectos relacionados al trabajo topográfico realizado para conocer las elevaciones de los puntos ya mencionados.

### **Introducción**

El trabajo topográfico ha existido desde todo momento, con la necesidad de conocer la superficie terrestre y con ella estudiarla para mejorar las condiciones de vida y comunicación del ser humano. Con los diferentes métodos de medición es posible obtener la configuración de un lugar mediante distancias, ángulos y niveles, y así poder proyectar grandes diseños de ingeniería que satisfacen las diferentes necesidades de la sociedad.

La Topografía opera sobre porciones pequeñas de terreno, no teniendo en cuenta la verdadera forma de la Tierra, sino considerando la superficie terrestre como un plano. Cuando se trata de medir grandes extensiones de tierra, como por ejemplo, para confeccionar la carta de un país, de un estado o de una ciudad grande, no se puede aceptar la aproximación que da la topografía, teniéndose entonces que considerar la verdadera forma de la Tierra y por consiguiente la superficie ya no se considera un plano sino se toma como parte de la superficie de un elipsoide y tendremos que acudir a la Geodesia.

La geodesia es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de la tierra y la superficie del fondo oceánico, además de la orientación y posición de la Tierra en el espacio.

Una parte fundamental de la geodesia es la determinación de la posición de puntos sobre la superficie terrestre mediante coordenadas (latitud, longitud, altura). La materialización de estos puntos sobre el terreno constituyen las redes geodésicas, conformadas por una serie de puntos (vértices geodésicos o también señales de nivelación), con coordenadas que configuran la base de la cartografía de un país, por lo que también se dice que es "la infraestructura de las infraestructuras" (Instituto Geográfico Nacional, España 2014).

A través de Levantamientos Geodésicos realizados en campo con el apoyo de equipos GPS, se pueden obtener las coordenadas Geográficas (Latitud, Longitud) de cualquier punto sobre la tierra así como su elevación referidos al nivel medio del mar, para una posterior transformación a un Sistema de Coordenadas sobre una Proyección (Este, Norte, altura o X, Y, Z). El levantamiento Geodésico a comparación de los levantamientos topográficos tradicionales, basan sus coordenadas en Sistemas de Referencia (Datum), los cuales sirven de base para dar, obtener y propagar coordenadas precisas y geo referidas de un lugar específico sobre la superficie terrestre.

## **Objetivo**

De acuerdo con la selección y establecimiento de la red de pozos de observación, se tiene como objetivo obtener las elevaciones referidas sobre el nivel medio del mar en los brocales en pozos ubicados en el acuífero Xpujil, Campeche.

## **Levantamiento geodésico**

### **Metodología**

Para la adecuada planificación y realización del levantamiento Geodésico de los puntos ya señalados anteriormente, fue necesario conocer y tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Ubicación y localización. Esto refiere a asegurar las condiciones físicas que permitan la adecuada ejecución del trabajo ya que la presencia de árboles y/o vegetación alta, interfieren con la recepción de señal de satélites empleados por el equipo GPS.
- b) Rutas de acceso
- c) Distancia entre puntos
- d) Tiempo de recorrido

Los principales obstáculos que se pudieran presentar para la realización del levantamiento fueron, las rutas de acceso sean transitables para que el traslado entre un punto a otro no excediera en tiempo hasta una hora de recorrido, además de la falta de un banco de nivel fijo o una placa geodésica previamente establecida por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), aldañas o ubicadas en los municipios anteriormente mencionados.

Conociendo dichas situaciones, se obtendrán las coordenadas UTM en posición plana y ortométrica (m.s.m.n.) de elevación de los brocales de los pozos realizando un levantamiento topográfico con equipo satelital de alta precisión tipo GPS RTK marca LEICA 09 o similar (base y móvil), con capacidad de recibir señal de diferentes satélites de posicionamiento (GPS-NAVSTAR) equipados con radios para comunicación, con

controladora inalámbrica para uso rudo, protección contra agua y polvo, bluetooth interno para comunicación con los GPS fijo y móvil.

Para la obtención de las coordenadas geográficas y elevaciones de los brocales de los pozos respecto al nivel medio del mar se deberán ubicar puntos de control como base ligada a la RGNA (Red Geodésica Nacional Activa) del INEGI, instalando un equipo geodésico satelital como base durante todo el tiempo que se esté trasladando la estación móvil en cada uno de los puntos a nivelar.

La estación móvil deberá realizar la colecta de datos de cada sitio en un tiempo no menor de 10 minutos.

Una vez realizado el levantamiento de cada uno de los puntos se procederá a descargar la información de las estaciones base y móvil para su postproceso en gabinete con Software para postproceso con capacidad de transformación de coordenadas, visualización y análisis de los resultados del trabajo y exportación de datos en ASCII, NMEA, CR5, CRD o DXF.

Los datos se ligarán a la estación de referencia de la RGNA, para la obtención de los datos en coordenadas UTM, geográficas y la altura elipsoidal especificando la calidad de cada punto observado.

Para la obtención de las alturas ortométricas, se utilizará la página del INEGI, la cual se alimenta con cada coordenada y su respectiva altura elipsoidal, obteniendo el resultado con la altura ya calculada usando el modelo GGM10.

### **Trabajo de campo**

Conociendo la ubicación de los puntos a levantar, posibles obstáculos que entorpecieran el levantamiento y la metodología para la ejecución del trabajo, se procedió a iniciar con el levantamiento y recolección de información en campo.

La colocación del equipo GPS dependió de los puntos a tomar. Para el caso de los Aprovechamientos de agua subterránea el equipo se centró y niveló de tal manera que el punto a tomar fuera el brocal del pozo, el punto de medición, o a nivel de terreno natural. Foto 1.





**Foto 1 Medición del brocal del pozo XP-31.**

Una vez colocado el equipo GPS sobre los puntos a levantar, se encendió el equipo se calibró y actualizó la fecha y hora correspondiente al día del levantamiento, se esperó la recepción de satélites ubicados sobre el firmamento, esperando a que el equipo detectara un mínimo de tres satélites para iniciar con la recolección de información. Una vez detectado un número adecuado de satélites, se iniciaba el levantamiento, para ello se midió la distancia vertical que existía entre la antena y el brocal del pozo, para ingresarla al equipo y darle un tiempo de espera para la recolección de datos de un aproximado de cuarenta minutos a una hora, para así tener la información necesaria y obtener la precisión deseada. El tiempo de espera y precisión de levantamiento de tipo Geodésico, es directamente proporcional a la recepción de satélites que detecte el equipo, entre más satélites capte el equipo, menor será la espera y mayor será la precisión.

Durante el tiempo de espera que duraba la recolección de datos con el equipo GPS se observó que el límite del PDOP (Position Dilution of Precision), no fuera mayor a un rango de tres, el PDOP indica la calidad de la geometría de los satélites GPS en el horizonte, un PDOP bajo indica una geometría buena tres o menor. Un PDOP alto indica problemas en la geometría de los satélites y si es mayor de diez existen errores con la precisión de las coordenadas obtenidas.

Durante la toma de coordenadas de los puntos levantados el rango PDOP no excedió a 2.5.

## Resultados

**Tabla 5.1 Nivelación de brocales en pozos de observación**

No.	Identificación	X	Y	Elevación (msnm)
1	P-XMABEN1	256,597	2,128,554	142.8683
2	P-XMABEN	256,680	2,128,493	137.9874
3	P-XP31	797,621	2,063,056	71.48752
4	P-ST-LUCIA	796,679	2,061,445	102.4052
5	P-XP30	799,006	2,063,113	74.97143
6	P-XP32	802,306	2,061,827	87.34179
7	P-XP32	802,375	2,061,193	88.53168
8	P-XP34	801,794	2,061,315	90.46744
9	P-PGARGIA-	801,913	2,057,688	87.65736
10	P-XP25	279,755	2,072,975	103.6015
11	P-XP24	282,692	2,075,882	93.4035
12	P-XP28	281,172	2,084,403	92.24588
13	P-XP20	279,353	2,092,750	95.24943
14	P-XP23	280,898	2,095,629	89.69839
15	P-XP21	280,912	2,093,131	91.61812
16	P-XP26	275,002	2,078,808	122.7694
17	P-XP19	291,434	2,069,065	100.0974
18	P-XP18	291,641	2,069,062	101.2538
19	P-XP12	250,254	1,977,759	188.4881
20	P-XP13	261,898	1,976,055	89.69729
21	P-XP44	262,541	1,977,440	84.44344
22	P-XP2	261,109	1,983,277	81.83144
23	P-XP3	263,655	1,986,873	80.29964
24	P-XP4	265,407	1,989,712	124.9049
25	P-XP42	267,046	1,992,734	93.15707
26	P-XP5	267,623	1,993,015	82.65974
27	P-XP2	245,039	2,057,962	298.6604
28	P-3REYES	251,215	2,083,629	242.9968
29	P-XP6	269,801	1,997,078	131.2287
30	P-XP7	273,207	2,005,415	164.3359

## 6 CONFIGURACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO, ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO Y DIRECCIÓN DE FLUJO

### 6.1 Profundidad al nivel estático

En la zona de influencia de este acuífero, se determinó la profundidad al nivel estático (PNE) en pozos y norias en el mes de mayo-junio de 2019, utilizando para ello sondas eléctricas calibradas. En la tabla 6.1, se muestran los valores de la profundidad del nivel del agua medida en únicamente 16 aprovechamientos, de los 52 visitados, debido a que todos se encuentran equipados con equipos de bombeo sumergibles, sin un dispositivo para medir niveles, lo cual dificulta y en algunos casos imposibilita la introducción del cable de la sonda.

En la figura 6.1 se muestra la configuración de la profundidad al nivel estático en el acuífero Xpujil, la que se describe a continuación:

Al nor-oriente, en las zonas de los poblados el Cedral, Miguel Alemán y Nuevo Becar, la profundidad del nivel del agua fluctúa de 71.73 m (pozo XP-21) a 77.97 m (pozo XP-25).

Al nor-poniente, cerca del poblado Nueva Vida, en un pozo recién perforado en el rancho “Los Tres Reyes”, la profundidad del nivel del agua registro 25.88 m.

Al sur en el poblado Arrollo Negro, la profundidad registrada fluctúa de 72.75 m (pozo XP-44) a 96.29 m en el poblado Nuevo Veracruz (pozo XP-06).

En la zona de Xpujil no existen pozos; El suministro de agua a la población de Xpujil, es por medio de agua subterránea extraída por pozos en Silvituc (conducción); En la zona captan el agua de lluvia.

**Tabla 6.1 Profundidad al nivel estático en el acuífero Xpujil, Campeche.**

Identificación	Nivel Estático/dinámico (m)
P-XMABEN1	80
P-XMABEN	65
P-XP31	43.46
P-ST-LUCIA	59.09
P-XP32	53.72
P-PGARGIA-	59.03
P-XP25	77.97
P-XP21	71.73
P-XP19	xx
P-XP44	72.75
P-XP4	84.67
P-XP5	41.32

P-XP2	48
P-3REYES	25.88
P-XP6	96.29
50	XX
52	XX

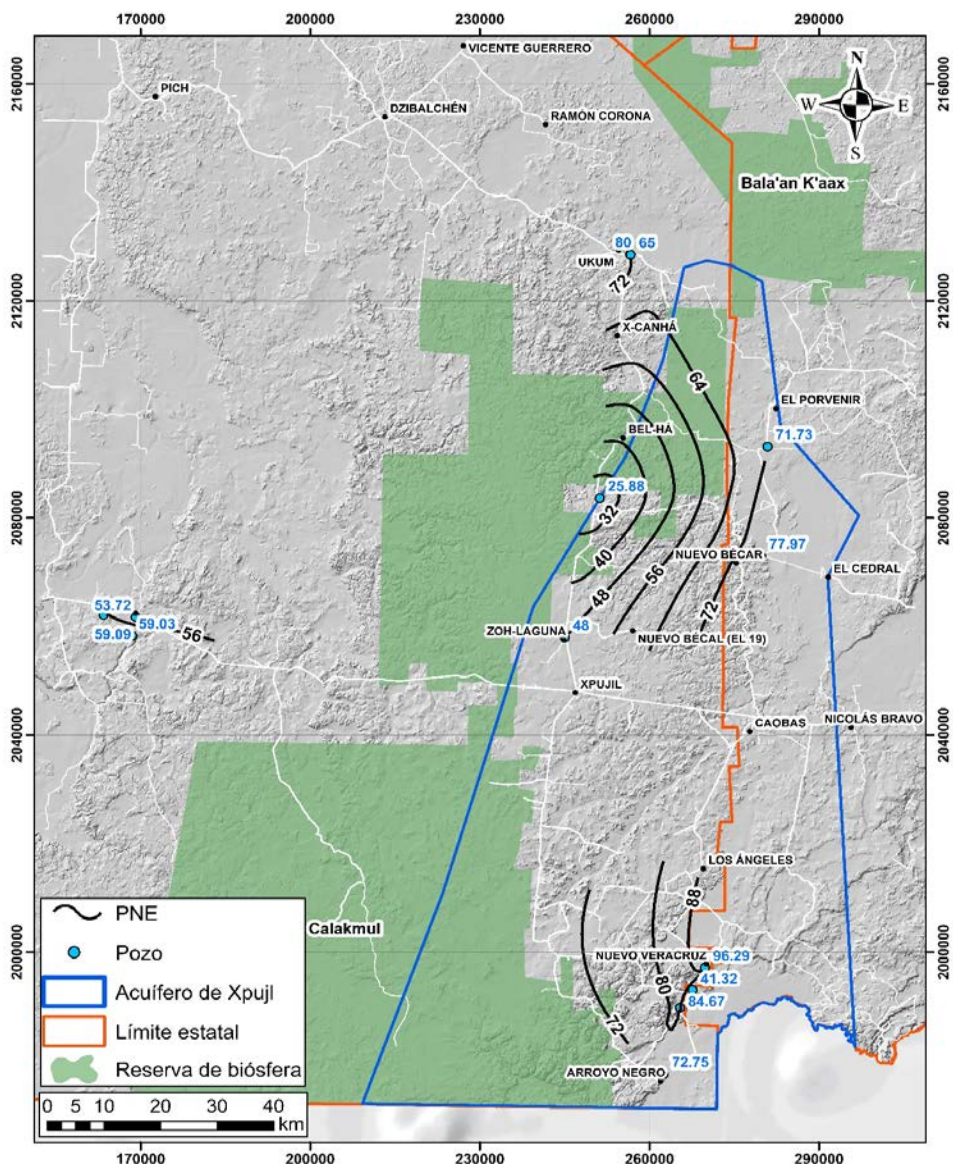


Figura 6.1 Configuración de la profundidad al nivel estático

## 6.2 Elevación del nivel estático

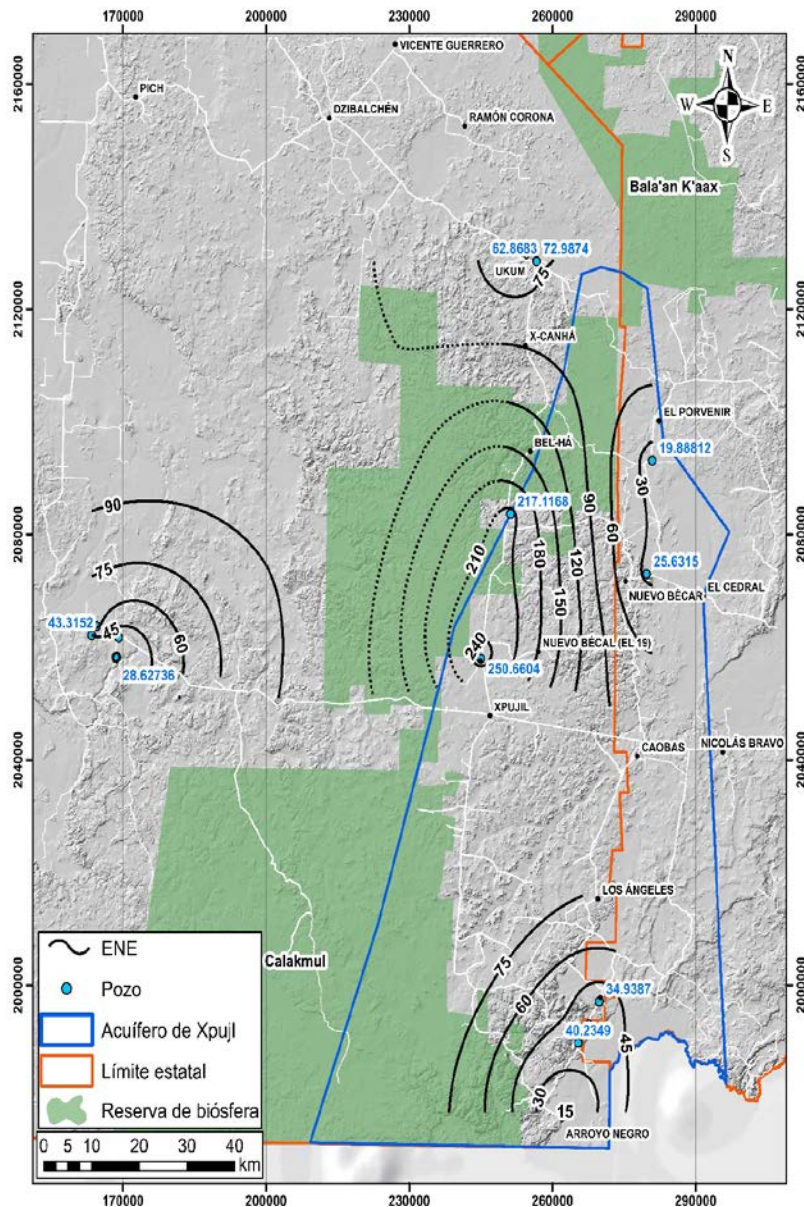
De acuerdo con los pozos seleccionados, en los cuales se determinó la elevación sobre el nivel medio del mar de sus brocales, con lo que se calculó mediante la sustracción del valor de la elevación de los brocales y la profundidad al nivel estático, la elevación del nivel estático en cada uno de los pozos (tabla 6.2) y con ello se realizó la configuración de la elevación del nivel estático en el acuífero Xpujil (figura 6.2).

De acuerdo con la configuración, a continuación se describen las variaciones de las equipotenciales en la zona de estudio:

- Al poniente del acuífero, en la zona de Xpujil, se presenta un alto topográfico, donde el nivel del terreno tiene una elevación aproximada de 290 m.s.n.m., donde desde el punto de vista hidrológico, se tiene el trazo del parteaguas, originando que el agua precipitada se infiltre y transite gradiente abajo, presentando de manera general equipotenciales que van de 240 a 30 m.s.n.m., respectivamente.
- En la porción norte del acuífero Xpujil, la elevación del nivel estático fluctúa de los 210 msnm a los 30 msnm, disminuyendo hacia el oriente.
- En la porción sur del acuífero, tenemos que las equipotenciales van desde los 75 msnm a los 30 msnm.
- En la porción poniente de los 240 m.s.n.m. en la zona de Xpujil a los 45 m.s.n.m., en la zona del poblado Constitución.

**Tabla 6.2 Elevación del nivel estático en el acuífero Xpujil**

<b>Identificación</b>	<b>Elevación (m.s.n.m.)</b>	<b>PNE (m)</b>	<b>ENE (m)</b>
P-XMABEN1	142.87	80.00	62.87
P-XMABEN	137.99	65.00	72.99
P-XP31	71.49	43.46	28.03
P-Sta. Lucia	102.40	59.09	43.31
P-XP32	88.53	53.72	34.82
P-Pablo Garcia	87.66	59.03	28.63
P-XP25	103.60	77.97	25.63
P-XP21	91.62	71.73	19.89
P-XP44	84.44	72.75	11.69
P-XP4	124.90	84.67	40.23
P-XP5	82.66	41.32	41.34
P-XP2	298.66	48.00	250.66
P-3 Reyes	242.99	25.88	217.12
P-XP6	131.23	96.29	34.94



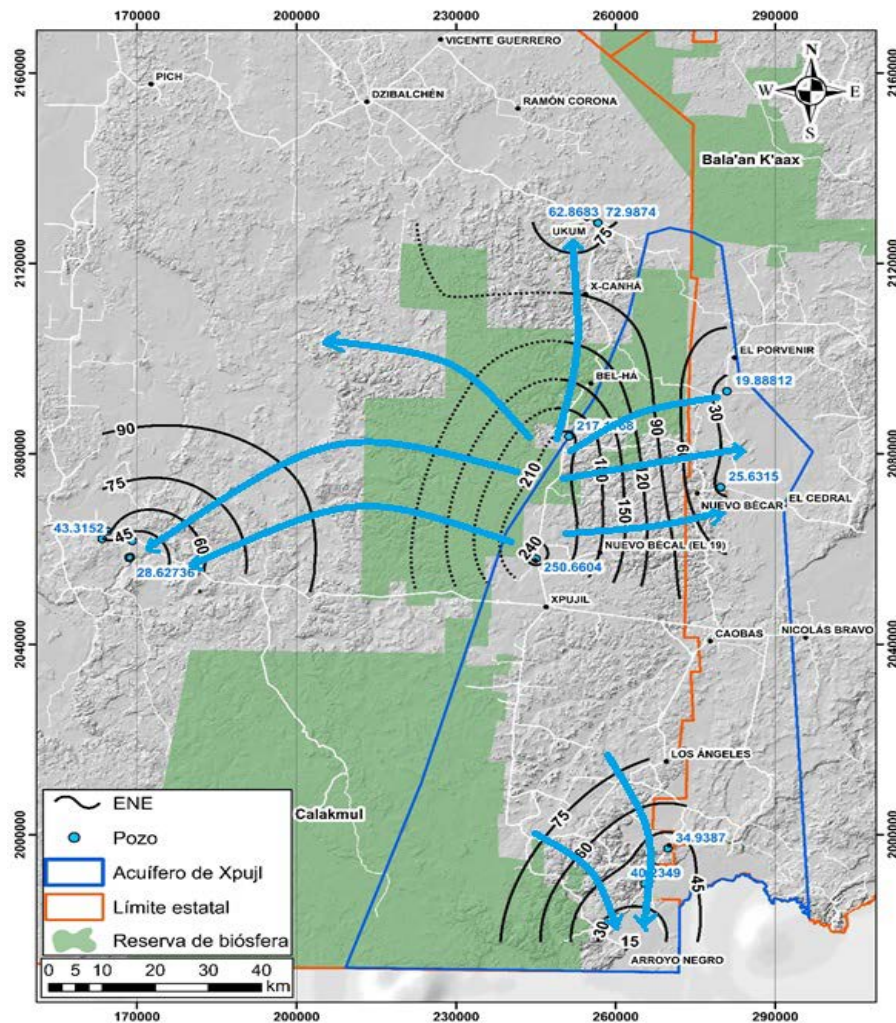
**Figura 6.2 Configuración de la elevación al nivel estático**

### 6.3 Determinación de la dirección del flujo subterráneo

La red de flujo consiste de dos series de líneas. La primera serie, referida como líneas equipotenciales unen puntos de igual carga y representan la altura de la superficie piezométrica. La segunda serie, referida como líneas de flujo, describe los patrones idealizados seguidos por las partículas de agua, en su movimiento a través del acuífero.

De acuerdo con la red de flujo mostrada en la figura 6.3), la cual fue construida a partir de la configuración de la elevación del nivel estático tenemos que:

- Como se menciona anteriormente, se identificó que en una porción del acuífero Xpujil (norte-sur pasando por el poblado de Xpujil), se encuentra en un alto topográfico (aprox. 290 msnm), presentando un parteaguas donde el flujo del agua subterránea se divide, presentando direcciones hacia el oriente y poniente principalmente.
- En la porción sur del acuífero la dirección del flujo subterráneo es aproximadamente de norte a sur.



**Figura 6.3 Dirección del flujo en el acuífero Xpujil**

## 7 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS MEDIANTE PRUEBAS DE BOMBEO

Se determinaron los parámetros hidráulicos en algunas zonas del acuífero Xpujil, tales como la transmisividad y conductividad hidráulica mediante cinco pruebas de bombeo y/o recuperación. Estos parámetros permitirán cuantificar las propiedades del acuífero en relación con la dinámica del flujo subterráneo, además de conocer el funcionamiento de los pozos, específicamente sobre su rendimiento.

A continuación se describe el desarrollo de cada una de las pruebas así como su interpretación correspondiente.

### 7.1 Desarrollo de las pruebas de bombeo

A continuación se describe el procedimiento empleado y algunas particularidades importantes que se presentaron durante el desarrollo de cada una de las pruebas de bombeo.

El programa de las pruebas de bombeo y recuperación fue realizado metódicamente, registrando el tiempo, el caudal de descarga, así como el registro de la evolución de la profundidad del nivel dinámico.

### 7.2 Pozos seleccionados

Los pozos seleccionados para realizar la prueba de bombeo y/o recuperación se encuentran emplazados en los acuíferos Xpujil y Península de Yucatán (Pozo 2 Silvituc), su ubicación espacial puede observarse en la [figura 7.1](#). El nombre del pozo, caudal, profundidad y coordenadas se muestra a continuación en la tabla 7.1.

**Tabla 7.1 Datos de los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo y/o recuperación**

No. Pozo	Caudal (lps)	Profundidad (m)	Coordenadas geográficas (UTM)	
ZOH-Laguna	6.7	>200	776513	2948543
Pozo 2 Silvituc	50	100	773244	2947881
Nuevo Veracruz	11.9	120	790164	2988560
Santa Lucía	10	80	786394	2986275
Rancho Icaiche	7	70	750148	2952684



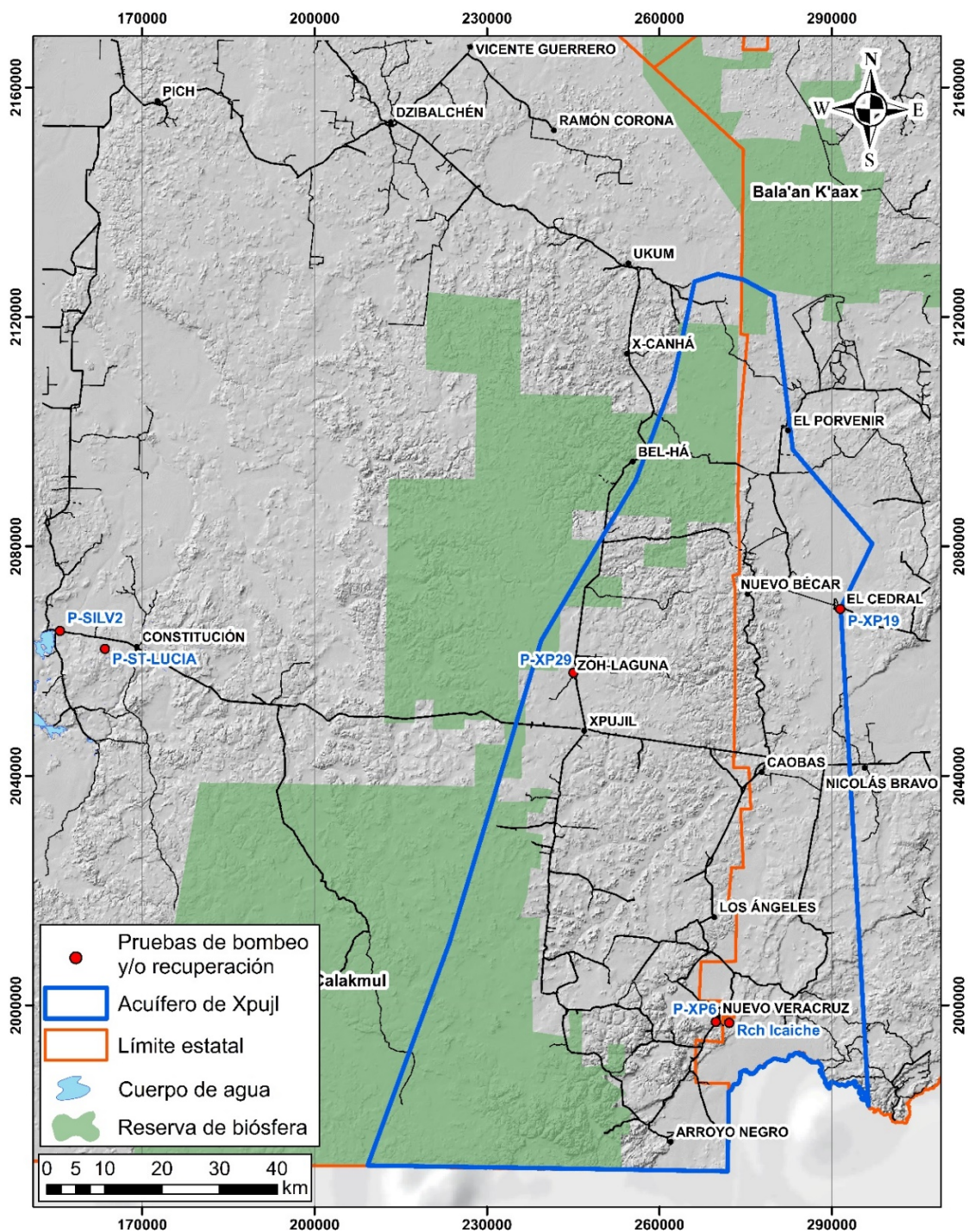


Figura 7.1 Localización de los pozos con prueba de bombeo

### 7.3 Duración de las pruebas Inyección y bombeo e intervalos de medición

El tiempo de duración de las pruebas de bombeo fue de 1 a 3 horas, debido a que los pozos probados se ubican en los poblados (Zoh-Laguna, Nuevo Veracruz, Santa Lucia y

Icaiche) que bombean el agua extraída hacia los tanques elevados el tiempo necesario para llenar estos depósitos, de donde se distribuye por gravedad hacia la red de distribución y no es posible operarlos más tiempo. En el caso del pozo 2 Silvituc, extraen agua subterránea que se conduce hacia el poblado de Xpujil, el agua extraída se descarga en cárcamos de donde es rebombada, motivo por el cual también los tiempos de operación corresponden a los necesarios para el llenado de estos. En el caso del pozo ubicado en el rancho Icaiche, este opera por lapsos de tiempo para llenar recipientes que transportan a sitios donde la utilizan para su ganado y las maquinas que separan semillas de calabaza. El propietario solo dio permiso para medir la etapa de recuperación del pozo. El tiempo de operación medido durante las pruebas se puede observar en la tabla 7.2:

**Tabla 7.2 Tiempos en la etapa de bombeo y recuperación de las pruebas.**

No. Pozo IMTA	Etapa de prueba	Tiempo de - bombeo (minutos)	Tiempo de recuperación (minutos)
ZOH-Laguna	Bombeo	180	-
Pozo 2 Silvituc	Bombeo	180	-
Nuevo Veracruz	Bombeo	120	-
Santa Lucia	Bombeo	60	-
Rancho Icaiche	Recuperación	-	60

#### 7.4 Pruebas de bombeo

Una vez iniciada la prueba de bombeo y/o recuperación, se procedió a medir en forma simultánea la profundidad al nivel del agua en el pozo bombeado (ya que no se tienen pozos de observación), con la secuencia de tiempos que se indican en las tablas 7.3 y 7.4:

**Tabla 7.3 Tiempos de medición del nivel durante la etapa de bombeo**

Lectura	Tiempo
1	Inmediatamente antes del bombeo
2	15 segundos, luego de iniciado el bombeo
3	30 segundos
4	un minuto
5	dos minutos
6	cuatro minutos
7	ocho minutos
8	quince minutos
9	30 minutos
10	hora

**Tabla 7.4 Tiempos de medición del nivel durante la etapa de recuperación**

Lectura	Tiempo
1	Inmediatamente antes de finalizar el bombeo
2	15 segundos, después de haber finalizado el bombeo
3	30 segundos
4	un minuto
5	dos minutos
6	cuatro minutos
7	ocho minutos
8	quince minutos
9	30 minutos
10	1 hora

## 7.5 Programa de bombeo

El programa para la ejecución de las pruebas de bombeo fue presentado y definido en común acuerdo con el personal a cargo de la supervisión de los trabajos. El número de pozo, así como las fechas de realización de las pruebas se muestra en la tabla 7.5.

**Tabla 7.5 Fechas de realización de las pruebas de bombeo**

No. de pozo	Fecha de realización
ZOH-Laguna	3 de septiembre del 2019
Pozo 2 Silvituc	5 de septiembre del 2019
Nuevo Veracruz	7 de septiembre del 2019
Santa Lucia	10 de septiembre del 2019
Rancho Icaiche	13 de septiembre del 2019

## 7.6 Determinación de los caudales

El caudal de extracción de los pozos probados fue determinado mediante la lectura del fluxómetro instalado en la descarga de los pozos y/o a partir del tiempo de llenado de los depósitos donde se almacena. Como una referencia como realizar la determinación del caudal con más exactitud a continuación se describe un método más preciso.

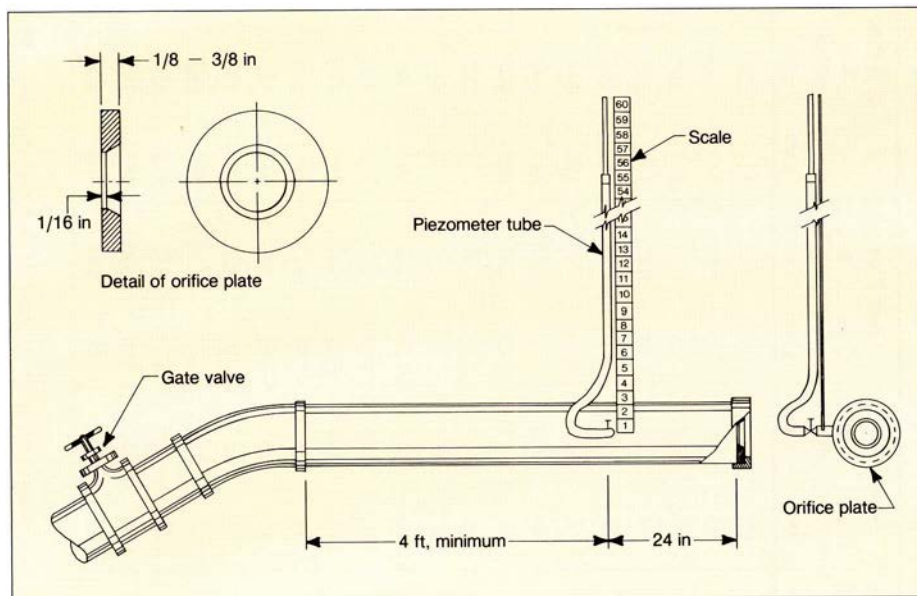
La verificación del caudal durante una prueba de bombeo, necesita de un dispositivo preciso para medir la descarga de la bomba y una manera conveniente de ajustarla para mantener ésta lo más constante posible. El mejor control se obtiene mediante una válvula instalada en la descarga de la bomba (Driscoll, 1986).

El tamaño de la tubería de descarga y el de la válvula, deberá ser tal que esta última permanezca abierta la mitad o las tres cuartas partes, cuando se esté bombeando a la descarga deseada.

Los cambios no percibidos de velocidad que son el resultado de variaciones de voltaje en motores eléctricos, temperatura, humedad y mezcla del combustible en los motores de gasolina, causarán menores fluctuaciones de la descarga cuando la bomba actúa contra la presión que se desarrolla al estar la válvula parcialmente cerrada.

Al tratar de regular la descarga de la bomba mediante el recurso de cambiar su velocidad, no siempre resulta satisfactorio. Esto es todavía más inconveniente cuando la bomba trabaja a descarga abierta y entrega el agua a baja presión.

El dispositivo de orificio circular es el instrumento más comúnmente usado para medir la descarga de una bomba centrífuga o de turbina. Desde luego, no podría medir el flujo pulsante de una bomba de pistón. La figura 7.2 muestra los detalles esenciales de la construcción y armado del aparato.



**Figura 7.2 Esquema del diseño del tubo y orificio (Driscoll, 1986).**

El orificio consiste de una abertura perfectamente redonda situada en el centro de una placa circular de acero, con bordes a escuadra bien definidos y espesor de 1.6 mm. Esta placa deberá fijarse contra el extremo final de la tubería de descarga a nivel, de modo que el orificio quede centrado en esta, previamente el extremo del tubo debe cortarse a escuadra de modo que la placa quede en posición vertical. El interior de la tubería deberá ser liso y encontrarse libre de cualquier obstrucción que pudiera causar turbulencia anormal. La tubería de descarga debe ser recta y a nivel en una distancia

de por lo menos 1.80 m hacia atrás de la placa del orificio, que de ser posible esta conducción deberá ser más larga. Aproximadamente a 60 cm de la placa del orificio, deberá realizarse una perforación en el tubo de descarga con un agujero de 3.2 o 6.4 mm de diámetro, situado en un plano coincidente con el diámetro horizontal. Para medir la carga de agua o presión dentro de la tubería de descarga, se fija a este agujero, un tubo piezométrico, el cual consiste en un tubo transparente de 1.20 a 1.50 m de longitud, en donde el nivel que el agua alcanza en el tubo representa la presión existente en el tubo de descarga cuando el agua fluye a través del orificio de salida. Fijando a un soporte una escala graduada, se puede registrar la altura piezométrica alcanzada, desde el centro de la tubería de descarga hasta el nivel alcanzado.

Para cualquier tamaño de orificio, el caudal que fluye a través de éste varía con la carga de presión medida. Se han publicado tablas estándar que proporcionan los valores de la descarga para varias combinaciones de diámetros de tubo y orificio.

El caudal a través del orificio se calcula mediante la fórmula:

$$Q = A V C$$

Donde  $Q$  es el caudal por unidad de tiempo,  $A$  es el área del orificio,  $V$  es la velocidad de flujo a través del orificio,  $C$  es el coeficiente de descarga para el orificio.

La velocidad del agua conforme ésta pasa a través del orificio, es la velocidad en el tubo de aproximación más la velocidad adicional creada por la caída de la presión entre el punto en donde se mide la carga piezométrica y el punto el agua descarga por el orificio. Puesto que el chorro descarga a presión atmosférica, toda la carga indicada en el tubo piezométrico se convierte en velocidad, haciendo caso omiso de la fricción en la tubería.

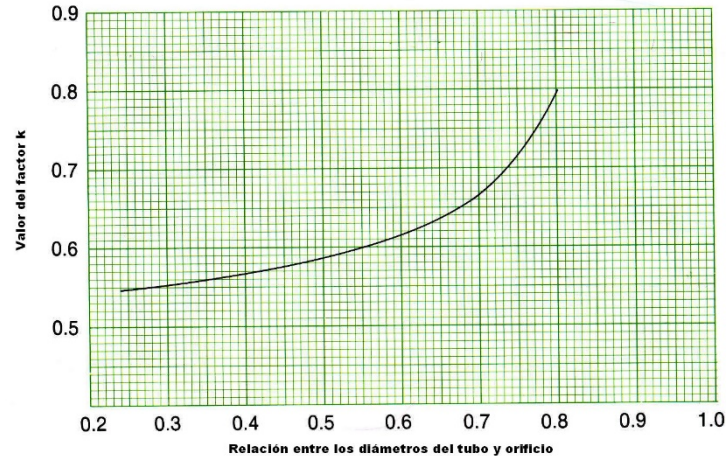
La velocidad de salida de un orificio, es:

$$v = \sqrt{2 g h} .$$

Donde  $v$  es la velocidad en m/seg,  $g$  es la aceleración de la gravedad, en m/seg<sup>2</sup>,  $h$  es la caída de presión en metros de agua.

Para obtener el valor correcto de  $V$ , la velocidad real a través del orificio, el valor de  $v$  dado por la relación anterior, debe sumarse a la velocidad en el tubo de aproximación y a su vez, la suma debe corregirse mediante dos factores. Una corrección es debida a la contracción del chorro que tiene lugar justamente afuera del orificio, y la otra se debe al súbito cambio de sección transversal del área de flujo y que está representado por el tamaño del orificio con relación al tamaño del tubo de aproximación.

Por conveniencia, la velocidad de aproximación y los dos factores de corrección pueden combinarse en un solo factor cuyo valor varía con la relación existente entre el diámetro del orificio y tubo, tal como se muestra en la figura 7.3.



**Figura 7.3 Valor del coeficiente K para tubo y orificio (Driscoll, 1986).**

Combinando las relaciones anteriores y llamando  $K$  al factor de descarga, tendremos la relación para la descarga a través del orificio:

$$Q = KA\sqrt{2gh}$$

La que se puede escribir como:

$$Q = 4.43 K A \sqrt{h}$$

Los valores de  $K$  pueden obtenerse de la gráfica de la figura 5.3 y la relación anterior puede utilizarse para calcular la descarga en cualquier combinación de diámetro de orificio, tubería de aproximación y altura de agua en el tubo piezométrico.

## 7.7 Requerimientos técnicos necesarios previos a la prueba de bombeo

Los requerimientos técnicos para el desarrollo e interpretación adecuados de las pruebas de bombeo y/o recuperación son el conocimiento de: *i)* la columna litológica del pozo, *ii)* las características constructivas del pozo y *iii)* el equipo de bombeo instalado.

Los propietarios de los pozos donde se realizaron las pruebas proporcionaron algunos datos constructivos, en todos los casos se midió la profundidad al nivel del agua en los pozos probados con sondas eléctricas calibradas.

### **7.8 Operación de aprovechamientos cercanos durante el desarrollo de las pruebas de bombeo.**

Durante el desarrollo de las pruebas de bombeo y/o recuperación, se verificó que los aprovechamientos cercanos al pozo de prueba no fueran operados, antes y durante el ensayo.

Al respecto, se menciona que previo al inicio de la prueba, el IMTA realizó un recorrido en los pozos aledaños al área de influencia del pozo de prueba, y reconociendo los pozos y pidiendo autorización a sus dueños o representantes para medir la profundidad del nivel estático y se verificó que la mayoría de los pozos estarían fuera de operación durante el desarrollo de las pruebas.

### **7.9 Revisión y calibración del equipo.**

El equipo de medición que se utilizó durante las pruebas consiste principalmente de: *i)* sondas eléctricas y transductores de presión, *ii)* cintas métricas y *iii)* cronómetros. Las sondas eléctricas utilizadas, corresponden a una sonda marca SOLINST de fabricación americana, marcada a cada centímetro y además dos sondas marca HGE de fabricación nacional, con cable eléctrico bipolar del número 12, el cual fue marcado cada metro.

### **7.10 Descripción de las pruebas de bombeo**

El desarrollo de cada una de las pruebas consistió en el registro cuidadoso del tiempo, de la evolución del nivel y del caudal de descarga. Durante la realización de las pruebas de bombeo y/o recuperación se registraron los datos antes mencionados y que se muestran en este reporte.

### **Descripción de la prueba núm. 1**

La prueba núm. 1, fue realizada en el pozo XP-29 ubicado en un predio del poblado Zoh-Laguna. La prueba inició el día 3 de septiembre de 2019, aproximadamente a las 8:22 horas, registrando en el pozo de bombeo el caudal de descarga y los descensos.

### **Descripción de la prueba núm. 2**

La prueba núm. 2, se realizó en el pozo 2 Silvituc, ubicado aproximadamente a 1000 m al norte de la Laguna Silvituc. La Comisión de agua potable y alcantarillado del estado de Campeche, tiene tres pozos en esta zona que extraen agua del acuífero y mediante conducción suministran agua al poblado de Xpujil. Los 3 pozos son operados diariamente llenando cárcamos de rebombeo, así que se acordó con el operador realizar las mediciones en el pozo 2 (debido a que se puede sondear), el día 5 de septiembre de 2019, aproximadamente a las 9:46 horas, registrando en el pozo de bombeo un caudal de descarga que fluctúa entre los 49 y 52 lps y los descensos del nivel dinámico.

### **Descripción de la prueba núm. 3**

La prueba núm. 3, se realizó en el pozo XP-06, ubicado en el poblado Nuevo Veracruz. La prueba de bombeo fue realizado el día 7 de septiembre de 2019, aproximadamente a las 11:05 horas, registrando en el pozo de bombeo el caudal de descarga y los descensos.

### **Descripción de la prueba núm. 4**

La prueba núm. 4, se realizó en el pozo XP-31, ubicado en el poblado Santa Lucía. La prueba de bombeo fue realizado el día 10 de septiembre de 2019, aproximadamente a las 9:00 horas, registrando en el pozo de bombeo el caudal de descarga y los descensos.

### **Descripción de la prueba núm. 5**

La prueba núm. 5, se realizó en el pozo del Rancho en el Poblado de Icaiche. El pozo es operado intermitentemente, no se permitió bombearlo continuamente durante el tiempo necesario para la estabilización, solo se permitió apagar la bomba y medir la recuperación. Las mediciones fueron realizadas el día 13 de septiembre de 2019, aproximadamente a las 10:52 horas, registrando en el pozo de bombeo los ascensos.

## **7.11 Análisis de los datos de campo**

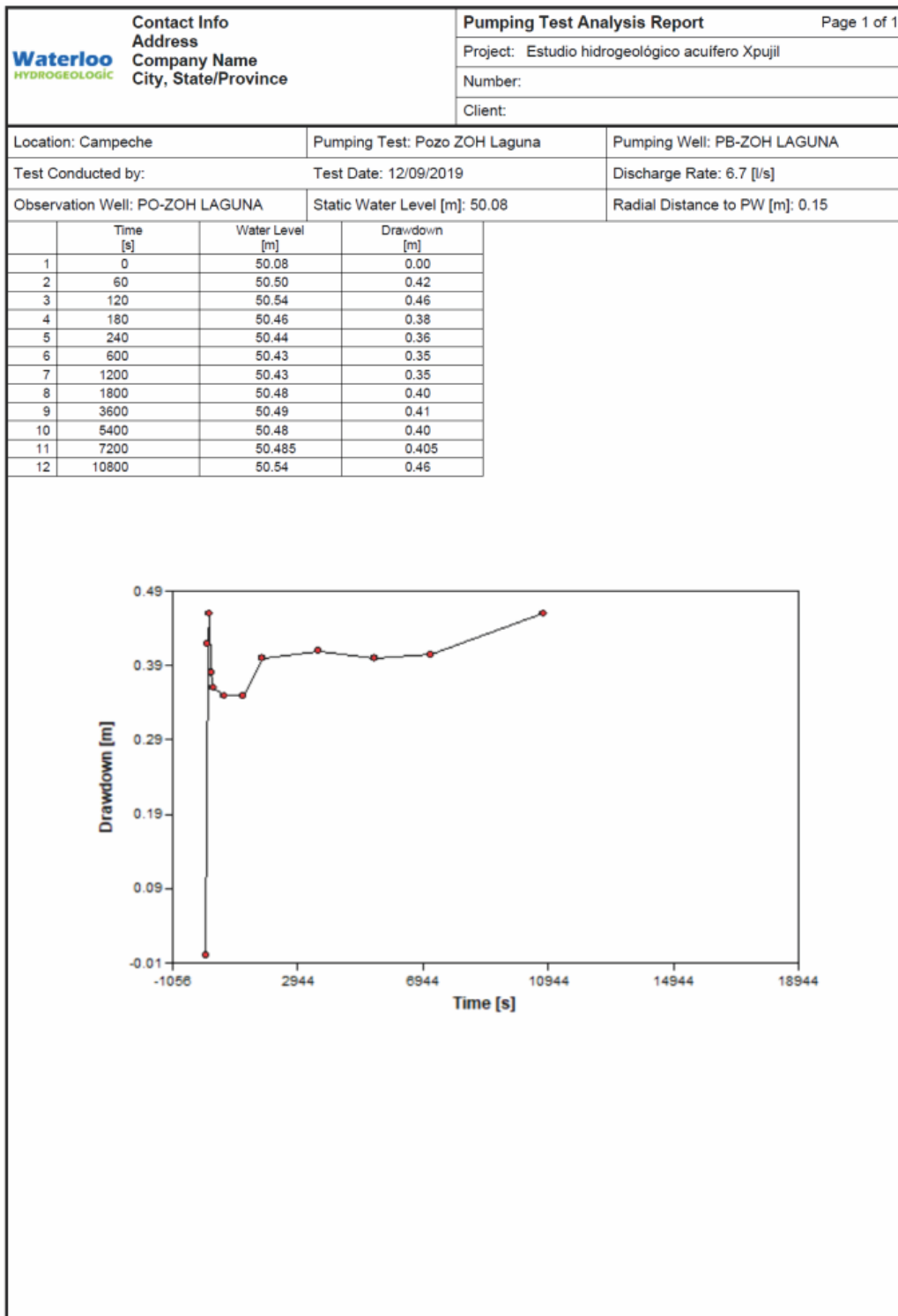
Los datos recopilados durante las pruebas de bombeo (abatimiento y tiempos), fueron graficados sobre escalas logarítmicas para realizar un análisis y decidir la estrategia de interpretación de las pruebas. En dichas gráficas se analiza el comportamiento



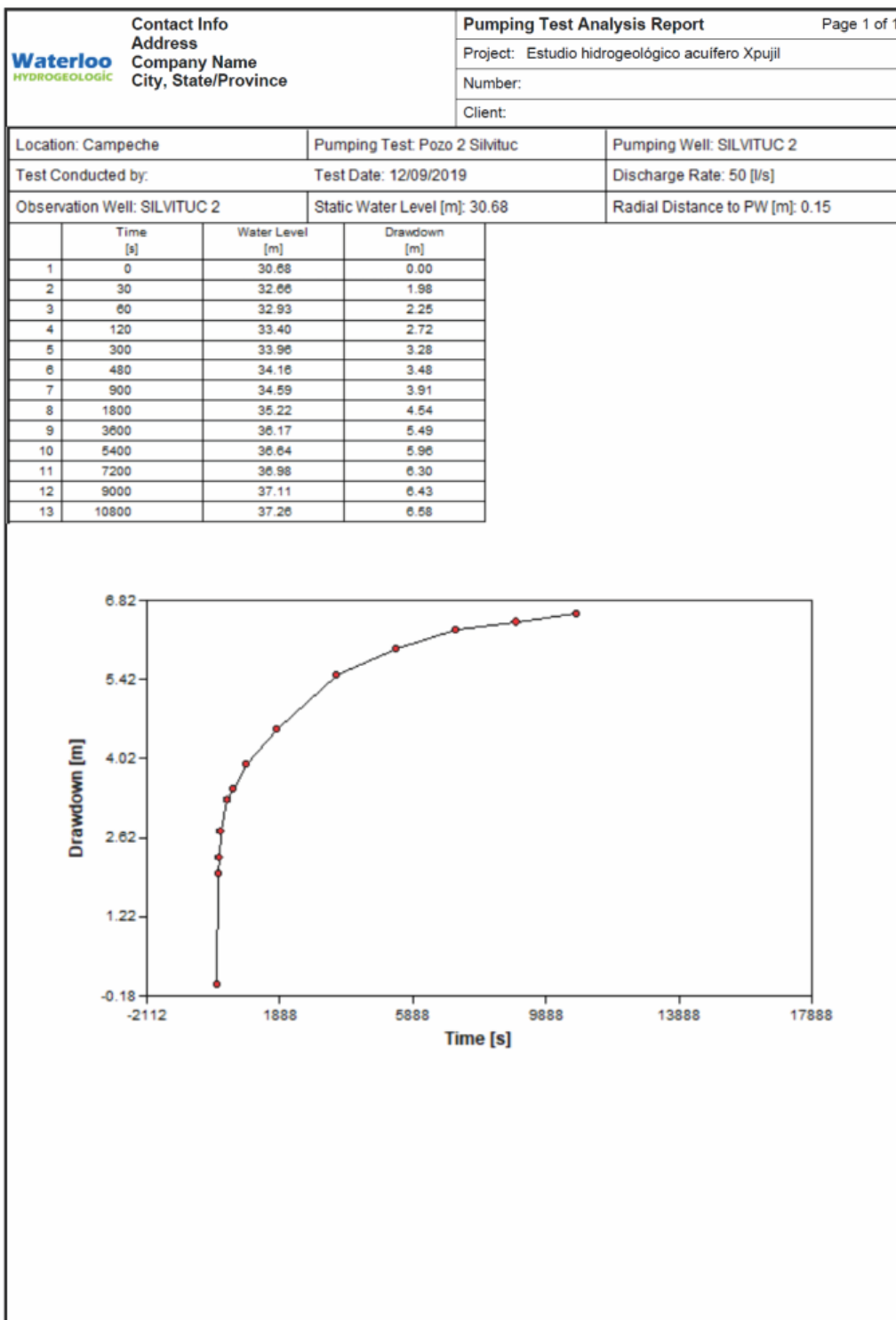
observado en campo, para posteriormente compararlo con las curvas tipo, para diferentes acuíferos (Freeze y Cherry, 1979).

### **Gráficos de abatimiento vs. Tiempo de los pozos analizados**

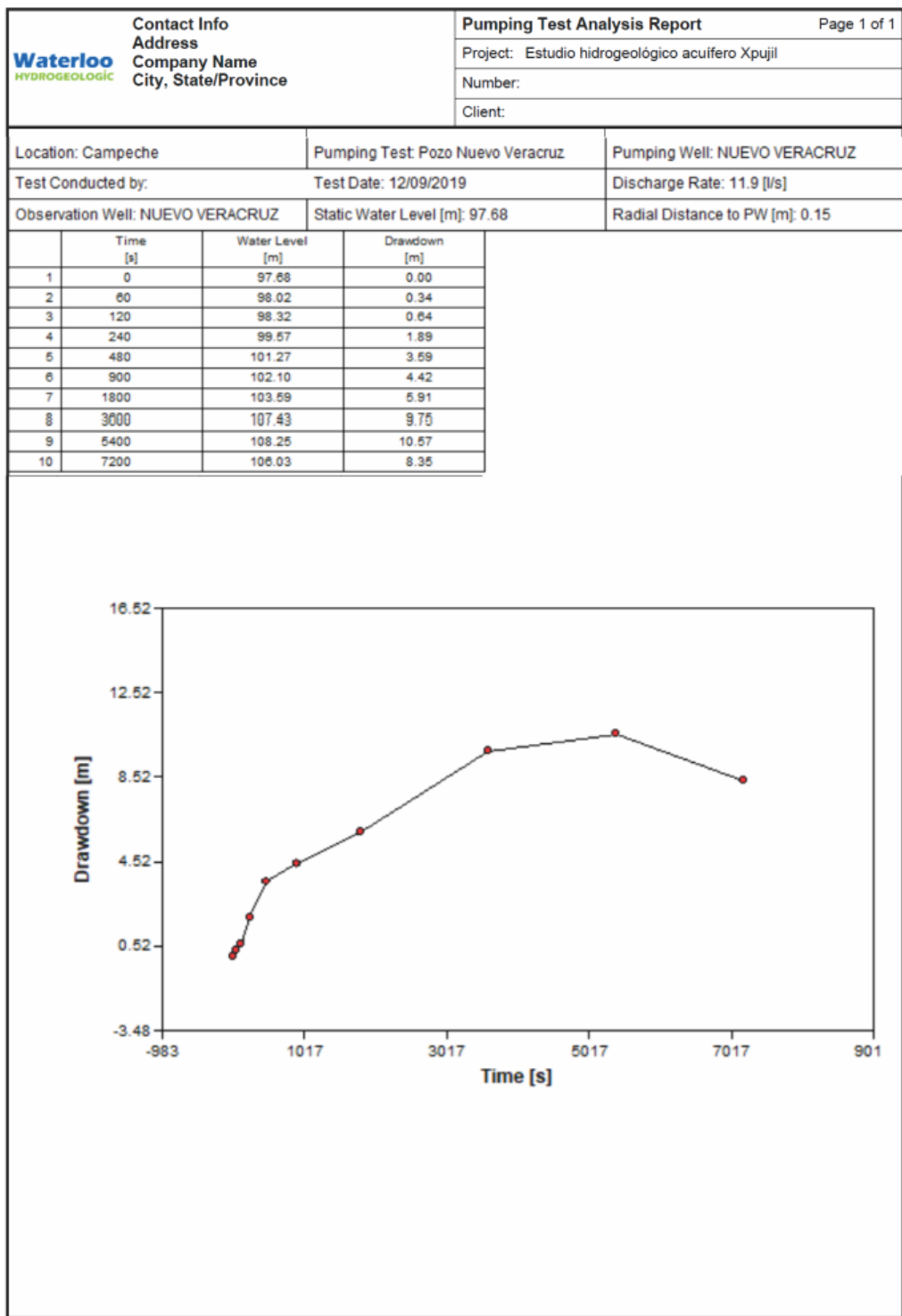
La forma de los datos de abatimiento vs tiempo graficados sobre escalas logarítmicas se muestran en las figuras 7.4 a la 7.8, algunas de ellas presentan la forma de la curva tipo de Theis, otras presentan sólo segmentos debido a la corta duración de las pruebas.



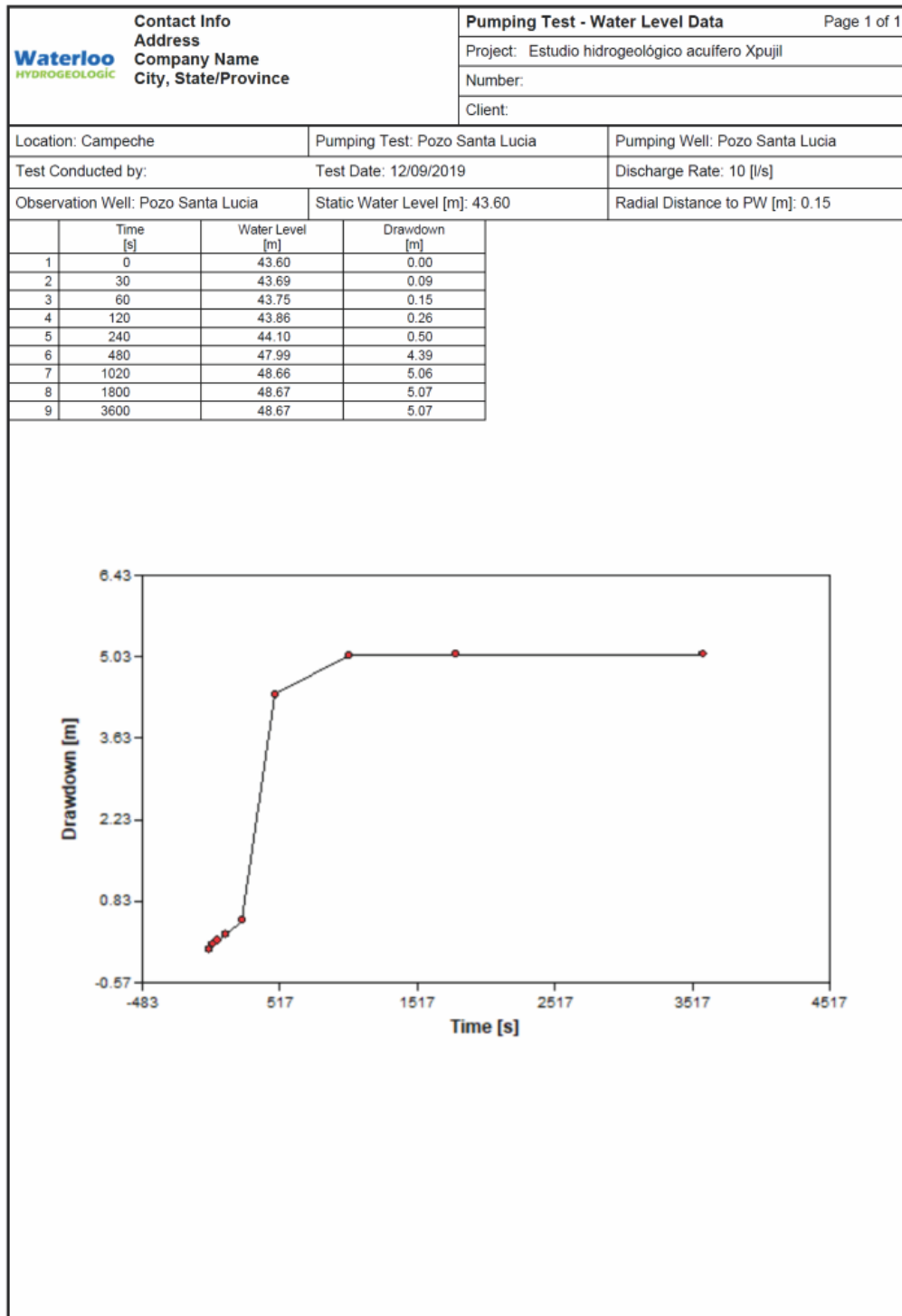
**Figura 7.4 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo Zoh-Laguna.**



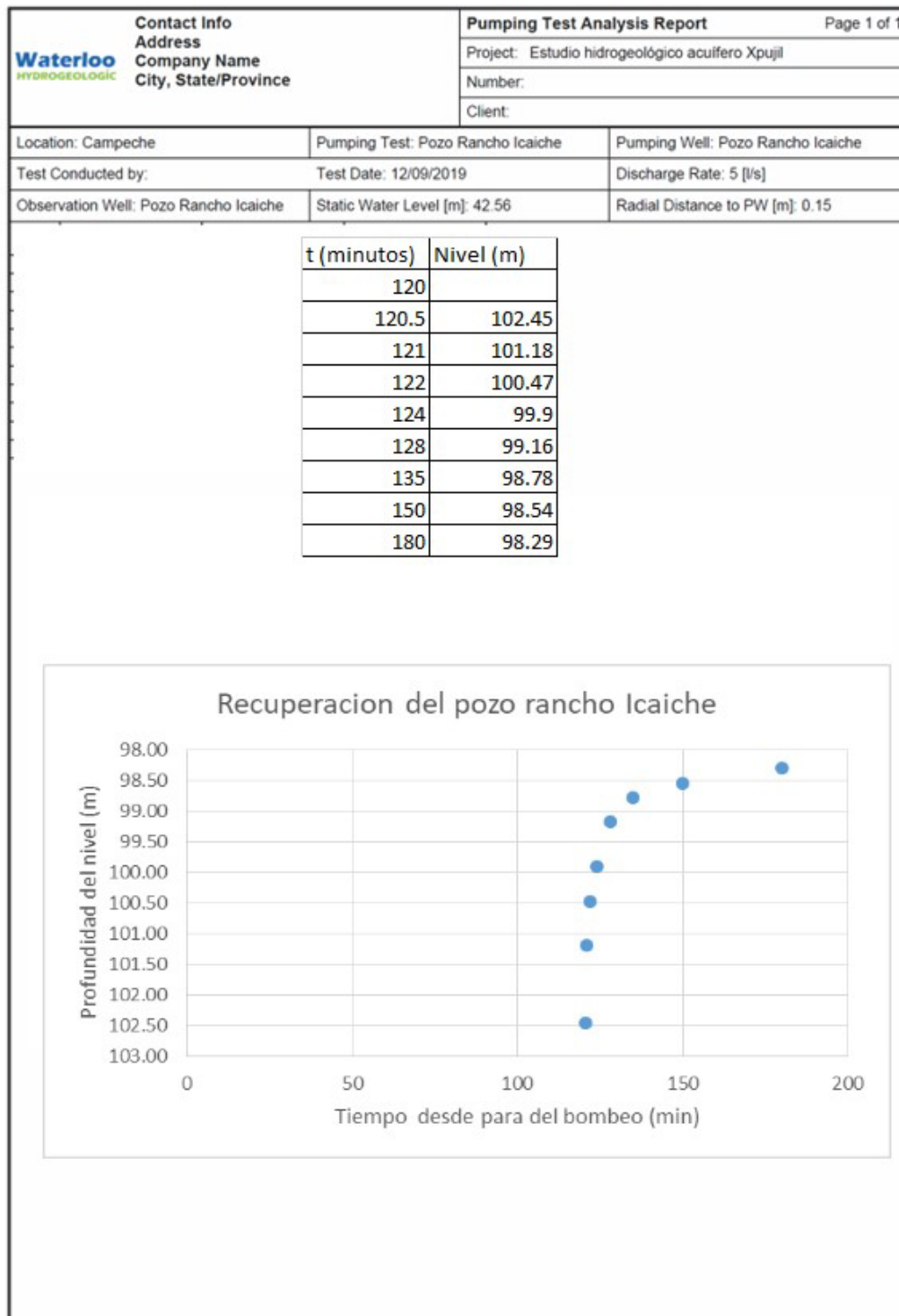
**Figura 7.5 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo 2 Silvituc.**



**Figura 7.6 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo Nuevo Veracruz.**



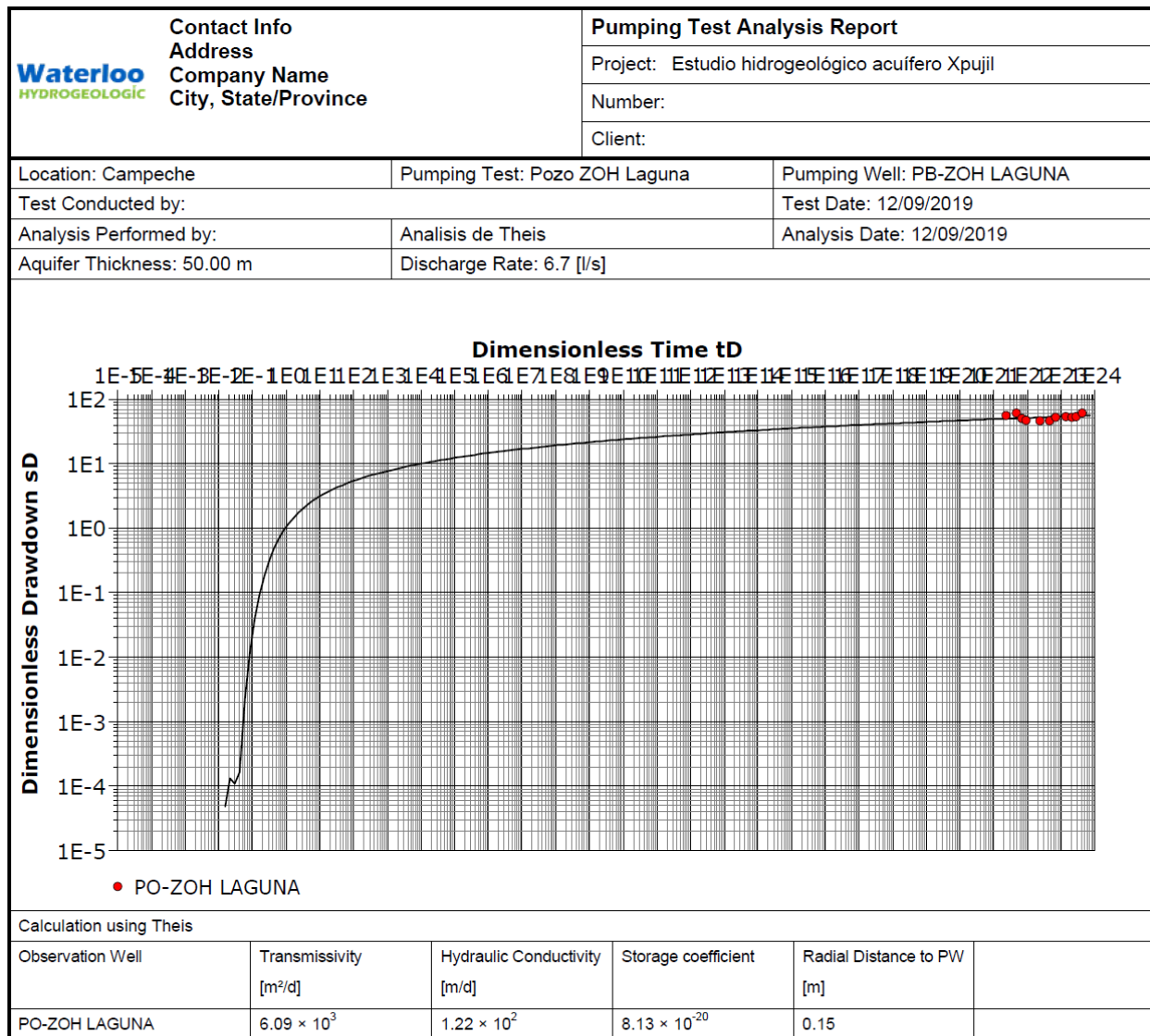
**Figura 7.7 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo Santa Lucia.**



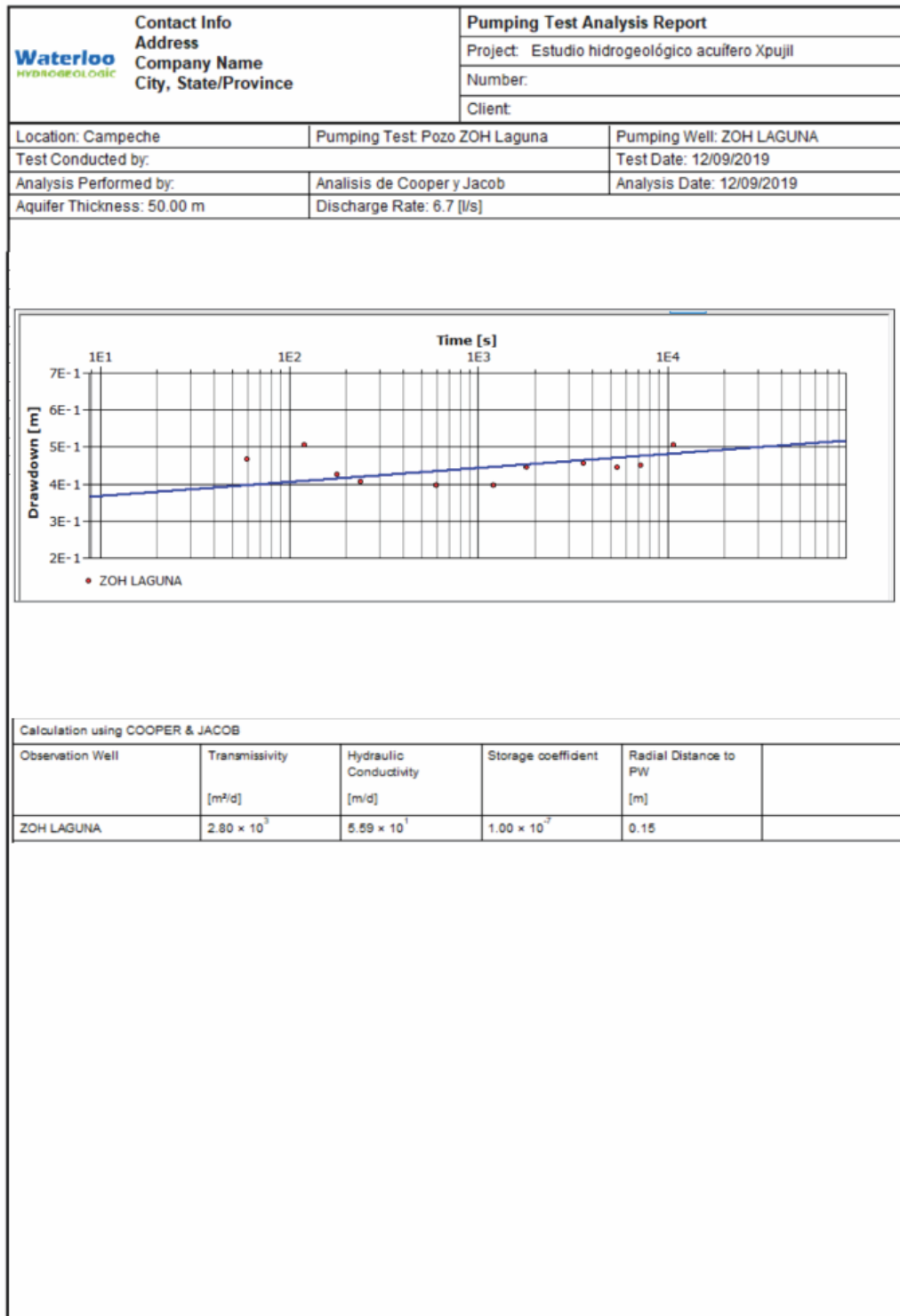
**Figura 7.8 Profundidad del nivel vs. Tiempo en prueba del pozo Santa Lucia.**

### 7.12 Interpretación de las pruebas de bombeo por métodos tradicionales

De acuerdo con el modelo conceptual planteado y el comportamiento observado de las pruebas de bombeo, se decidió interpretar las pruebas de bombeo utilizando la metodología propuesta por Theis (1935) y Cooper-Jacob (1946). Las pruebas de recuperación mediante los métodos de la recuperación de Theis y Jacob. A continuación se presentan los resultados de la aplicación de los métodos antes descritos en las figuras 7.9 a 7.17:

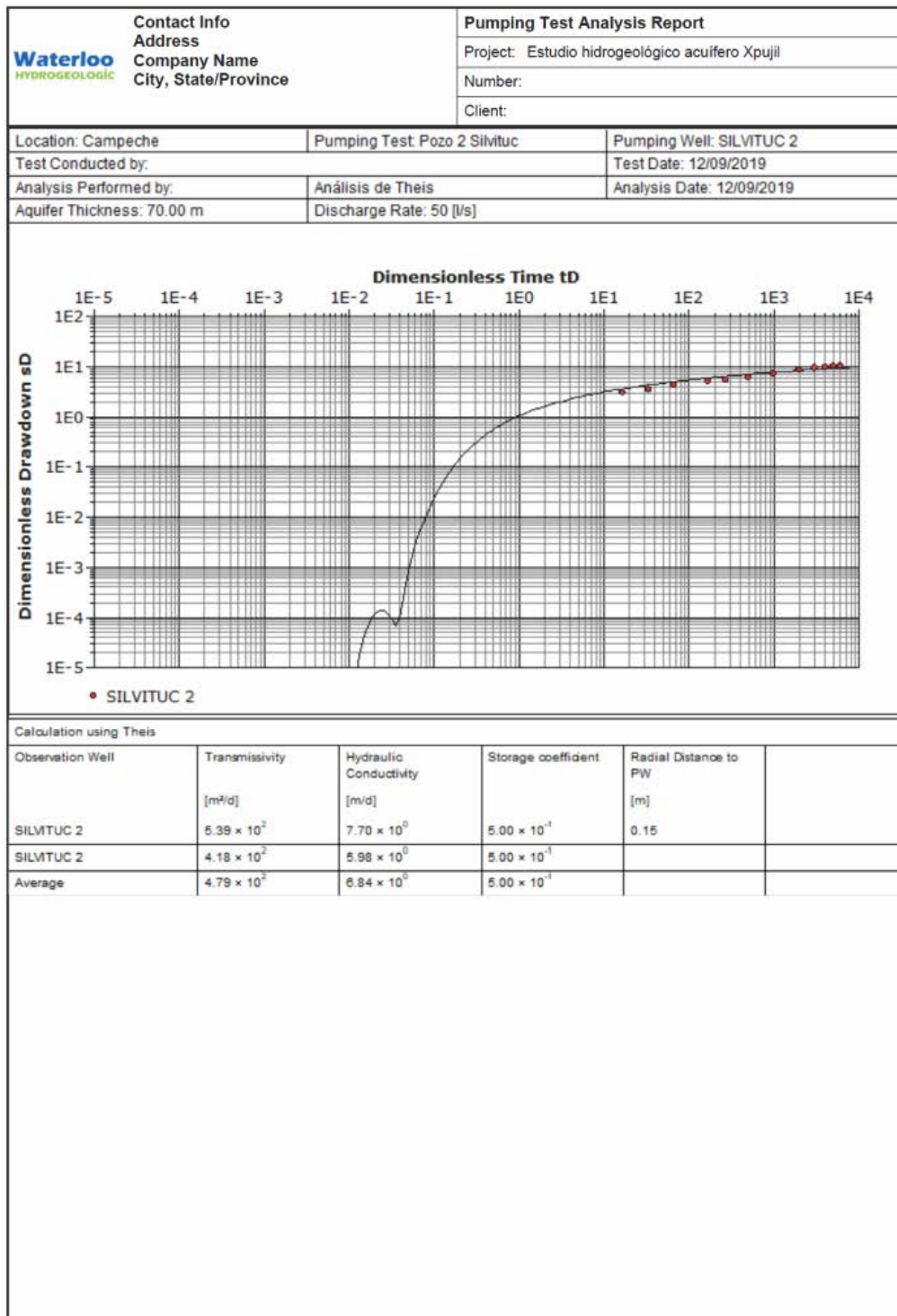


**Figura 7.9 Interpretación de prueba de bombeo (pozo Zoh-Laguna), por el método de Theis**

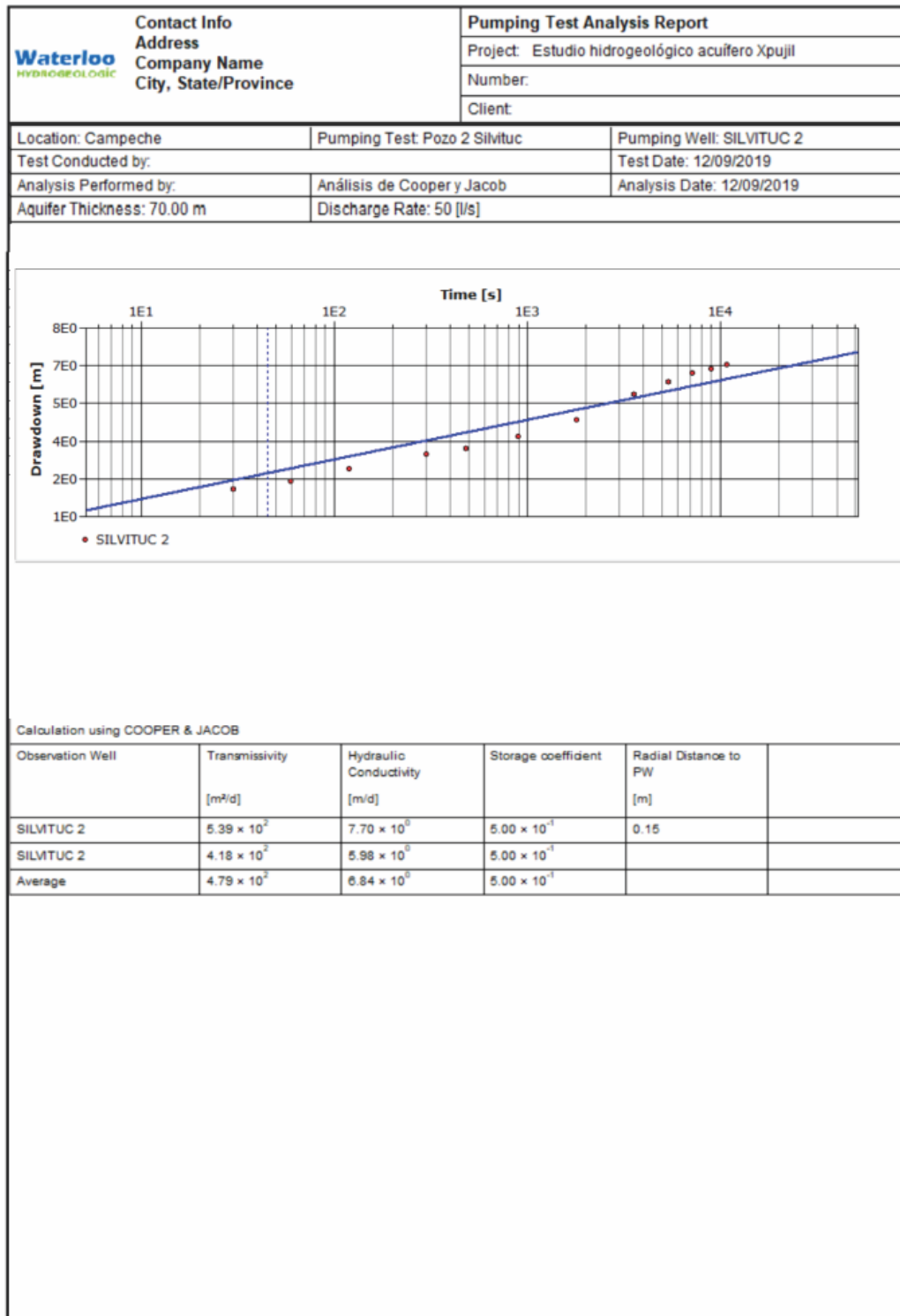


**Figura 7.10 Interpretación de prueba de bombeo (pozo Zoh-Laguna), por el método de Jacob.**

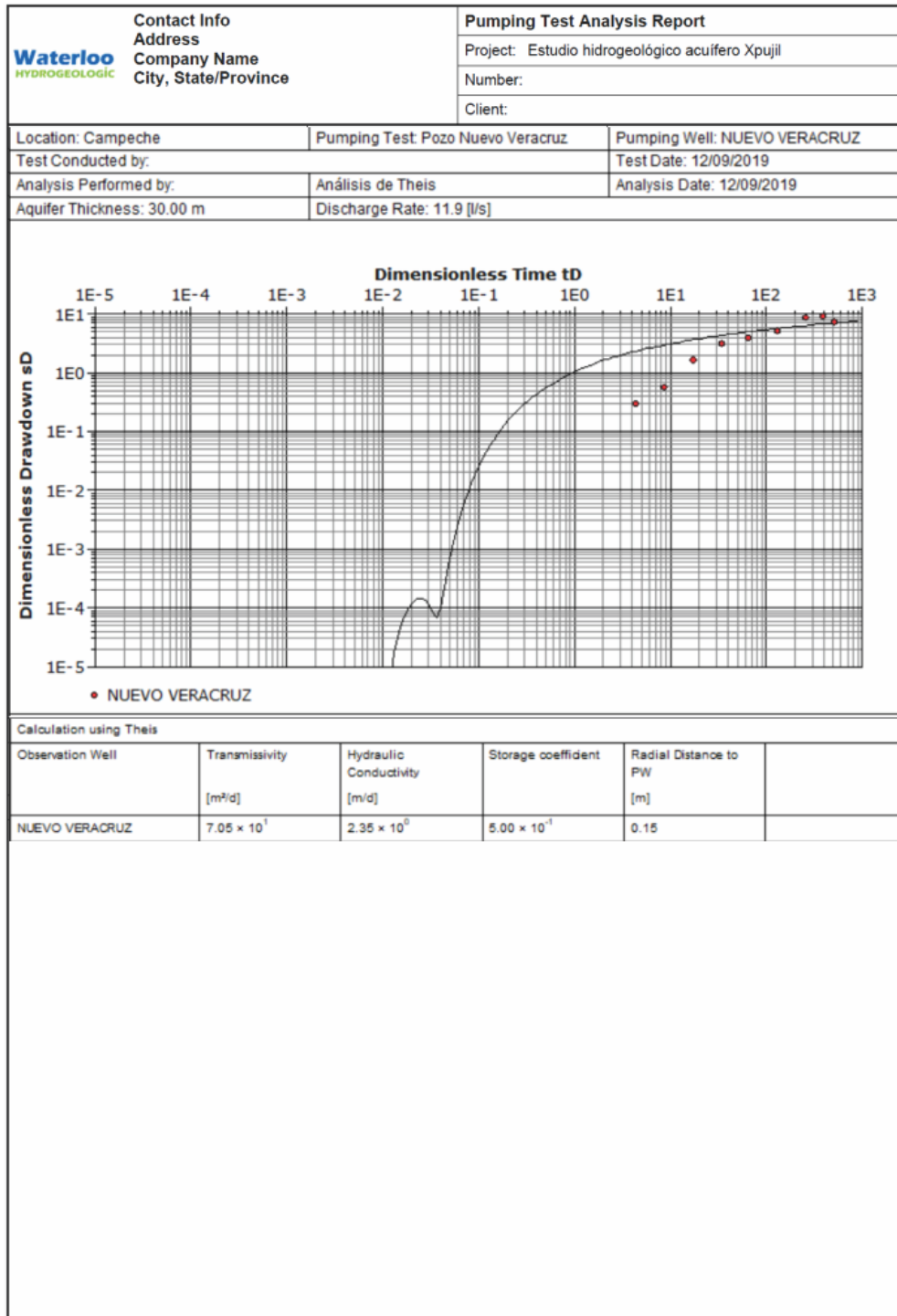




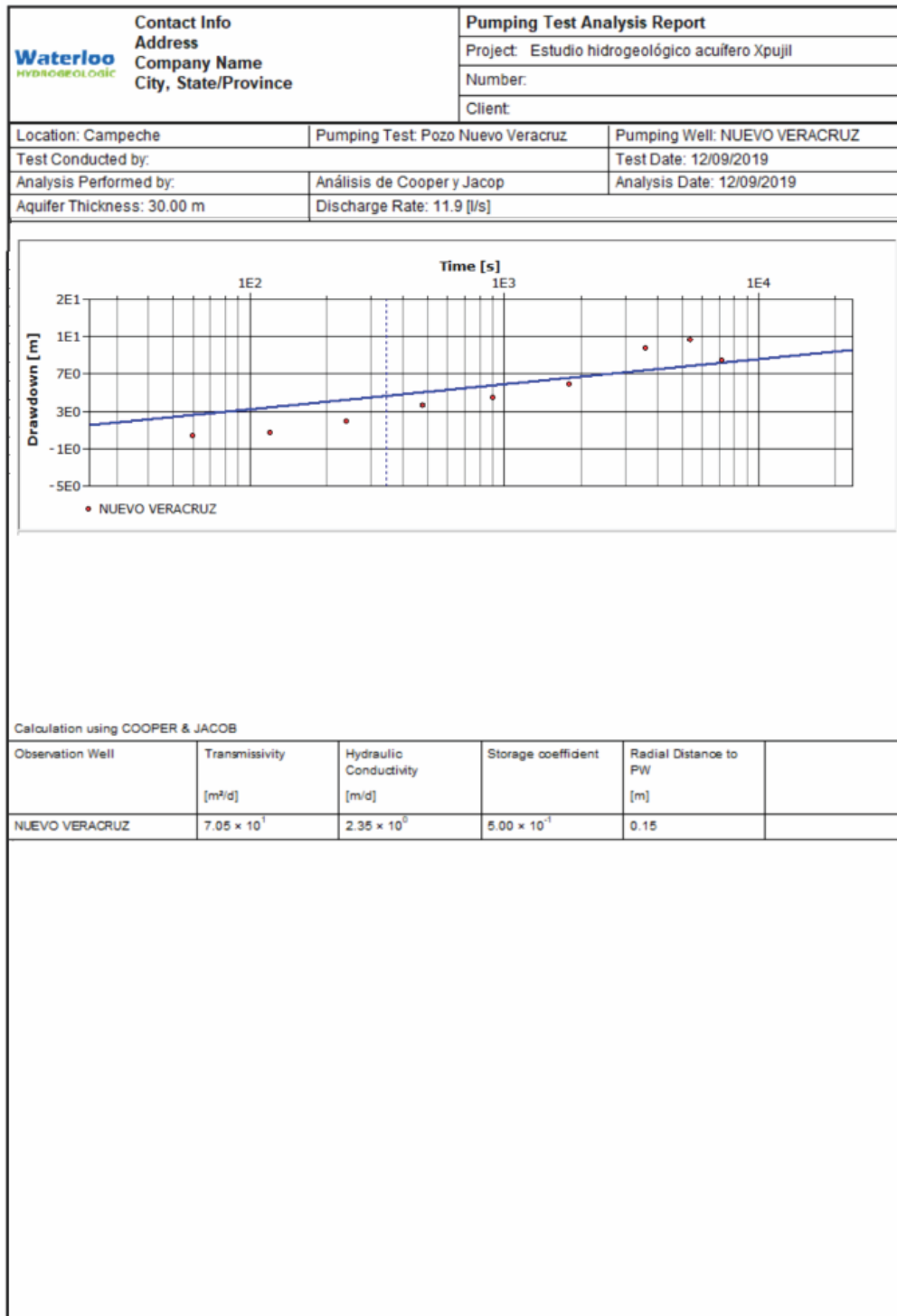
**Figura 7.11 Interpretación de prueba de bombeo (pozo No.2 Silvituc), por el método de Theis.**



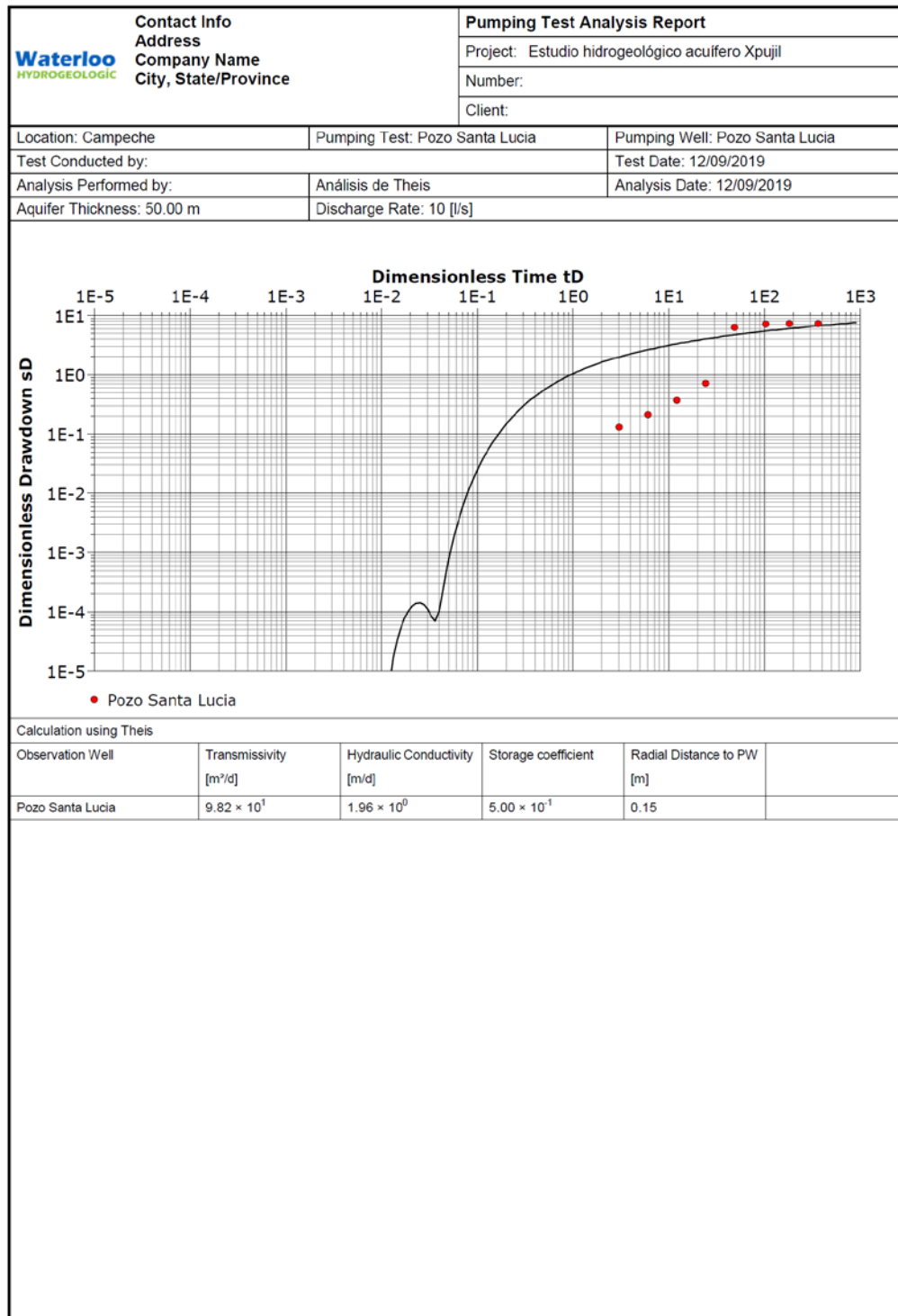
**Figura 7.12 Interpretación de prueba de bombeo (pozo No.2 Silvituc), por el método de Jacob.**



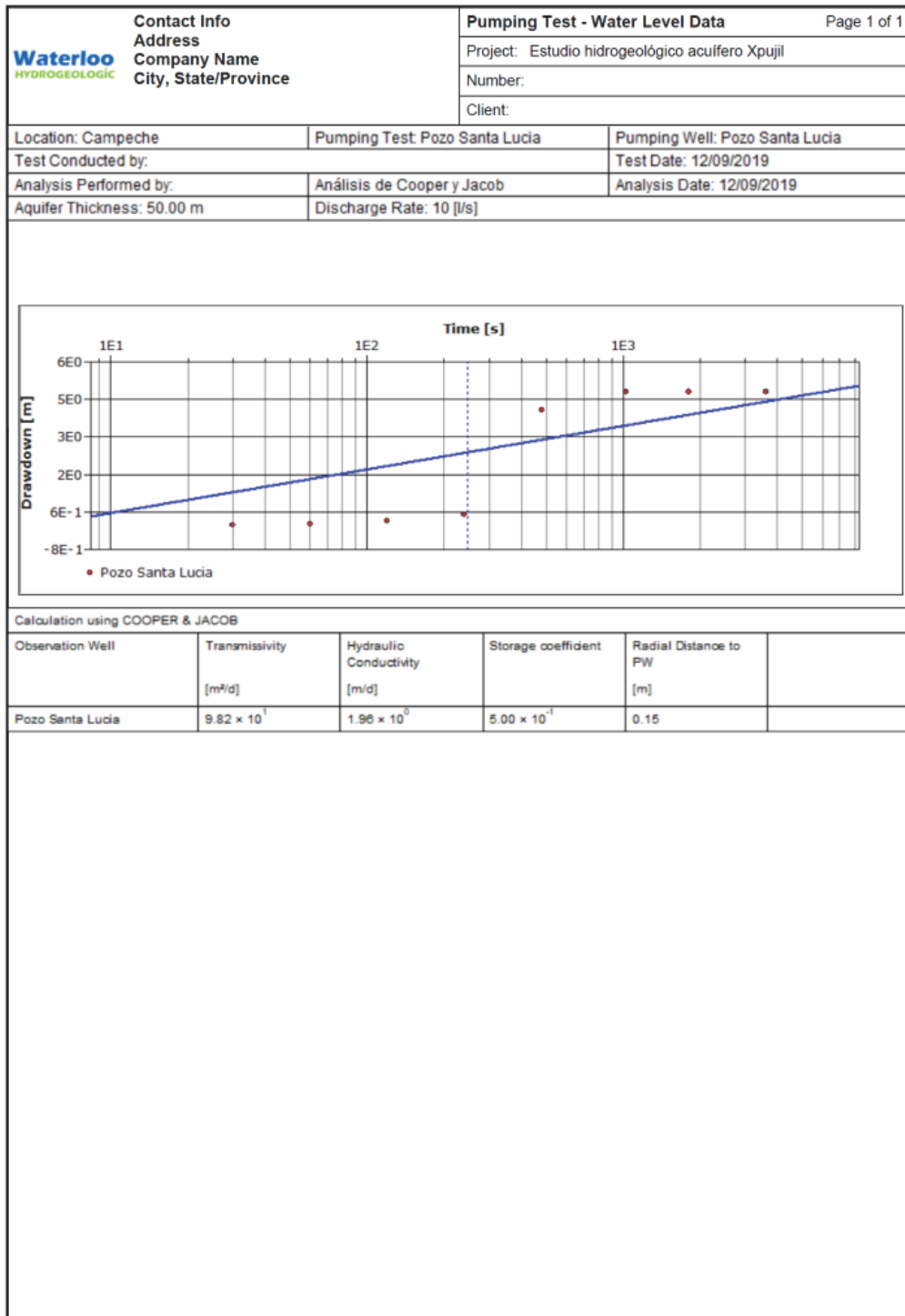
**Figura 7.13 Interpretación de prueba de bombeo (pozo Nuevo Veracruz), por el método de Theis.**



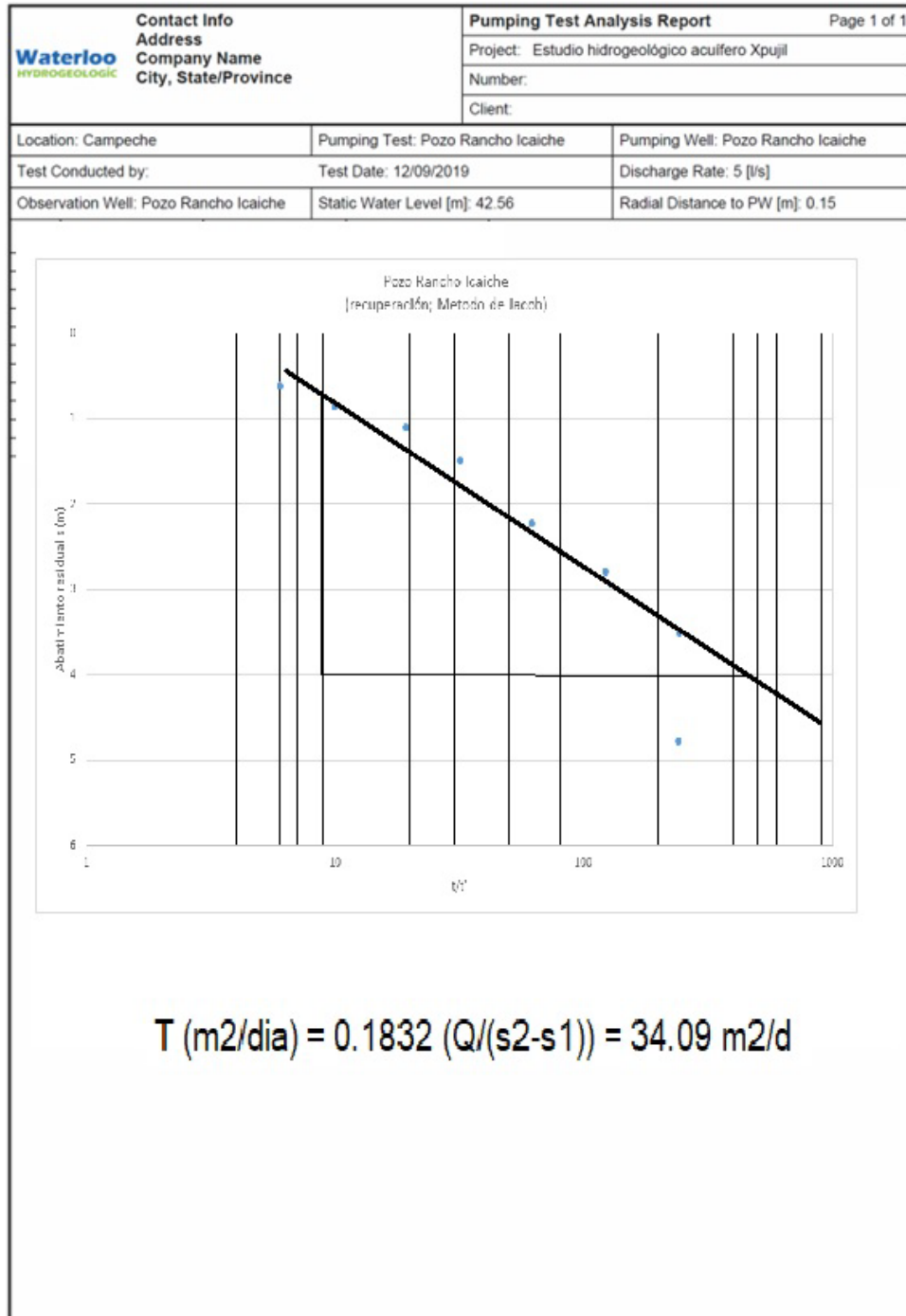
**Figura 7.14 Interpretación de prueba de bombeo (pozo Nuevo Veracruz), por el método de Jacob**



**Figura 7.15 Interpretación de prueba de bombeo (pozo Santa Lucia), por el método de Theis.**



**Figura 7.16 Interpretación de prueba de bombeo (pozo Santa Lucia), por el método de Jacob.**



**Figura 7.17 Interpretación de prueba de recuperación (pozo Rancho Icaiche), por el método de Jacob.**

### 7.13 Método de Theis

La ecuación diferencial parcial que describe el flujo radial saturado en dos dimensiones (horizontal) en un acuífero confinado en coordenadas radiales, es:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

La condición inicial requerida para resolver la ecuación diferencial anterior es:

$$h(r, 0) = h_0 \quad \text{para todo } r$$

Donde  $h_0$  es la carga hidráulica inicial (i.e. la superficie piezométrica es inicialmente horizontal).

La condición de frontera supone que no ocurre abatimiento en una distancia radial infinita y que la tasa de bombeo es constante.

Theis (1935) desarrolló una solución analítica para la ecuación del flujo radial a un pozo en un acuífero confinado,

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^\infty \frac{e^{-u}}{u} du; \quad u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

La integral se conoce como la función del pozo,  $W(u)$  y se puede representar con una serie de Taylor infinita:

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

Usando esta función, la solución de Theis se transforma en:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$



Cuando se grafica en escala log-log,  $W(u)$  en el eje Y y  $1/u$  en el eje X, resulta lo que se conoce como la *curva de Theis*. Los datos de campo se grafican como  $t$  o  $t/r^2$  en el eje X y el abatimiento ( $s$ ) en el eje Y. El análisis de los datos se hace ajustando la línea que resulta de graficar los datos observados, a la curva propuesta por Theis (figura 7.18).

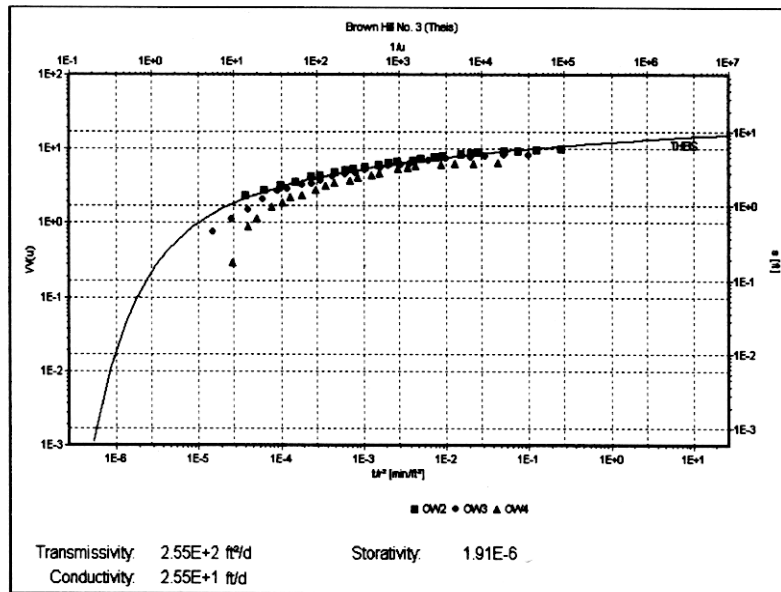
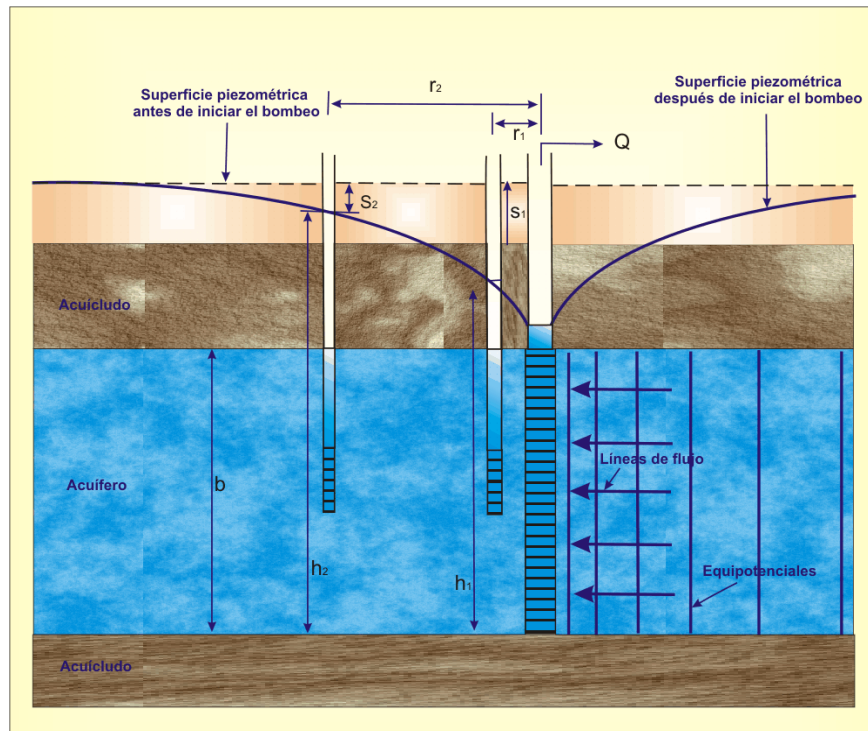


Figura 7.18 Curva de Theis.

Esta solución es apropiada para las condiciones que se muestran en la figura 7.19.



**Figura 7.19 Esquema de flujo radial hacia un pozo para el análisis de la solución de Theis.**

La solución de Theis supone lo siguiente:

- El acuífero es confinado y tiene una extensión radial infinita
- El acuífero es homogéneo, isotrópico y de espesor uniforme en el área de bombeo.
- Antes del bombeo la superficie piezométrica es horizontal
- El pozo penetra completamente y bombea a una tasa constante
- El agua que se remueve del almacenamiento, se descarga instantáneamente con una declinación en la carga
- El diámetro del pozo es pequeño, por lo que el almacenamiento del pozo es despreciable

Los datos que se requieren son:

- Abatimiento contra tiempo en el pozo de observación.
- La distancia del pozo de bombeo al pozo de observación.
- La tasa de bombeo (constante)

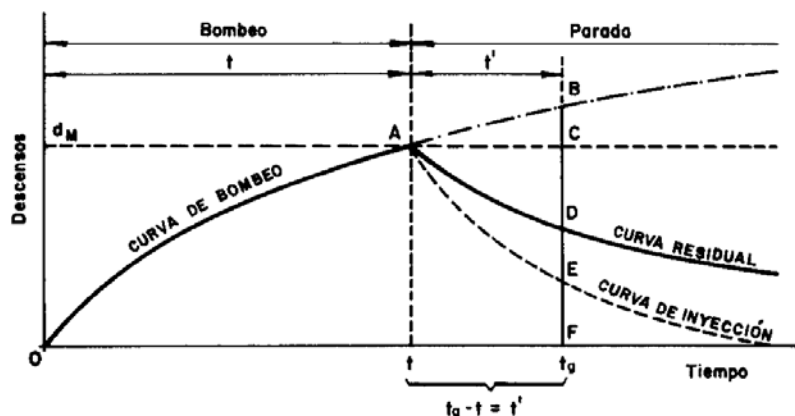
**7.14 Método de recuperación de Jacob (Tomado de Pozos y acuíferos. Capítulo IV. Métodos de recuperación, régimen variable. M. Villanueva y A. Iglesias, WEB, 2019.**

Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones del ensayo en base a los datos que se obtienen una vez que el pozo detiene su extracción de agua. A partir de la parada, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial. Estos métodos se basan en el análisis de la recuperación y/o evolución del ascenso de niveles posterior a la parada.

Interpretación de la evolución de niveles después de la suspensión del bombeo

Para analizar la evolución de los niveles después de la parada de la bomba en el pozo hay que empezar por simular matemáticamente esta parada. Para ello puede procederse. Razonando, que el efecto de parar un pozo que lleva bombeando un tiempo  $t$  a caudal constante  $Q$  es el mismo que simular que el pozo no se para y que a partir del instante  $r$  se le inyecta un caudal constante  $Q$ .

El descenso que se observa en el pozo o .descenso residual., diferencia entre los niveles estático y dinámico, será como consecuencia de lo visto en el apartado de 'Campos de pozos', y afecciones entre ellos, la diferencia entre el descenso producido por el bombeo desde que se inició el mismo y el ascenso producido por la inyección desde el momento de la parada. La deducción matemática se resuelve con la ayuda de la figura 7.20.



**Figura 7.20 Esquema de la deducción del valor del descenso residual  $d$ , en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada.**

El pozo está sometido a un bombeo con caudal  $Q$  que teóricamente no se interrumpe, y la curva de descensos producidos es  $O=$ . Cuando ha transcurrido un tiempo  $t$  y el descenso producido es  $d_M$ , se para el pozo, o lo que es lo mismo se simula una inyección de caudal  $Q$ . La curva de ascensos teóricos vendrá dada por E, obtenida llevando dichos ascensos teóricos a partir de la horizontal de  $d_M$  y en el sentido negativo del eje de ordenadas. La

curva residual. que en rigor es la observada en campo, será la representada por AD diferencia de las dos anteriores. En un tiempo genérico  $t$ , desde que se inició el bombeo, el pozo llevará parado un tiempo  $t' = t - t_0$ . En este momento, el descenso  $d$ , debido al bombeo será:

$$d_B = \overline{FB} = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T(t + t')}{r_p^2 S}$$

Siendo:

$Q$  = caudal de bombeo constante.

$T$  = transmisividad.

$r_p$  = radio del pozo.

$S$  = coeficiente de almacenamiento.

$t$  = tiempo que duró el bombeo real.

$t'$  = tiempo que ha transcurrido desde que se paró el bombeo.

El ascenso  $d_1$ , producido por la inyección a caudal  $Q$ , que se simula a partir del tiempo  $t_0$  que es cuando se interrumpe el bombeo, viene dada por:

$$d_1 = \overline{CE} = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T t'}{r^2 S}$$

Evidentemente, puede utilizarse la relación de Jacob, que prácticamente es siempre válida en el pozo de bombeo. El descenso residual  $d_R$ , que es el que se observa en el pozo. es la diferencia entre el nivel estático anterior a iniciar el bombeo y el nivel que se mide realmente en el tiempo  $t_g = t + t_0$ .

Vendrá dado por:

$$d_R = \overline{FD} = \overline{FB} - \overline{CE}$$

y, por tanto:

$$d_R = d_B - d_1$$

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T(t + t')}{r_p^2 S} - 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T t'}{r_p^2 S}$$

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{\frac{2,25 T(t + t')}{r_p^2 S}}{\frac{2,25 T t'}{r_p^2 S}}$$

de donde:

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{t + t'}{t'}$$

Expresión en la que si se toma  $d_R$  como función, y  $\lg(t + t')/t'$  como variable, representa una recta de la forma:

$$y = mx$$

en la que:

$$y = d_R$$

$$x = \lg \frac{t + t'}{t'}$$

$$m = 0,183 \frac{Q}{T} \quad [1]$$

Esta recta pasa por el origen de coordenadas y queda representada en el gráfico 7.21. La transmisividad (T), que es el parámetro que puede obtenerse en el análisis de la recuperación.

Se saca directamente de la pendiente de la recta  $m$  haciendo uso de la relación (1).

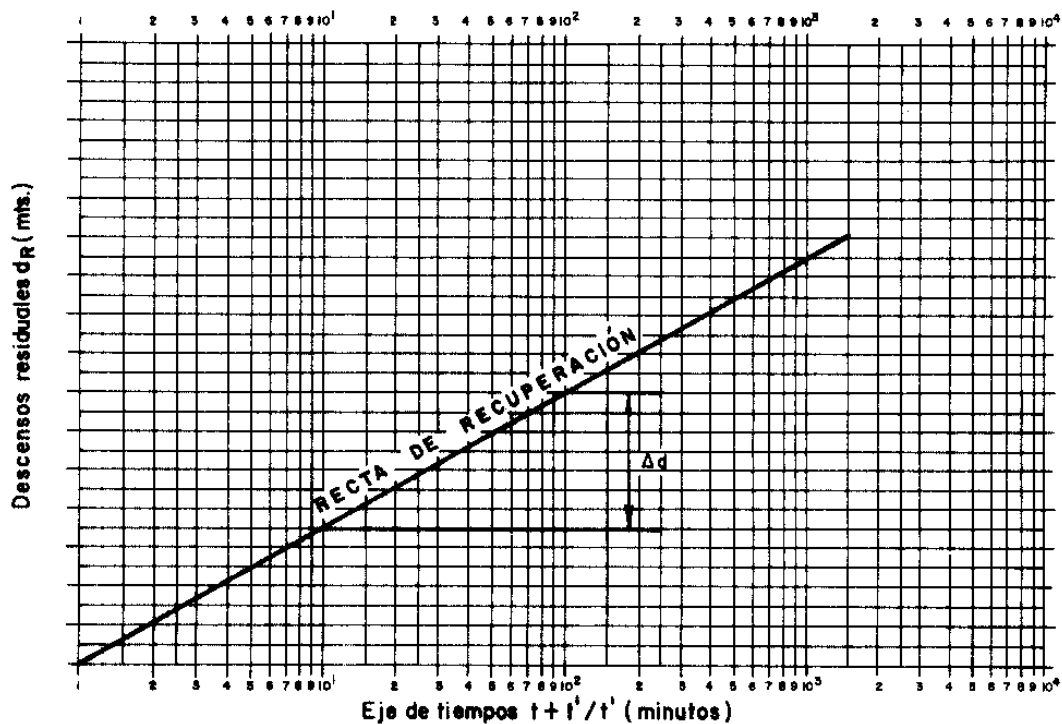


Gráfico 21.—Recta de recuperación.

$$T = 0,183 \frac{Q}{m}$$

Como ya se sabe  $m = \Delta d$ , siendo  $\Delta d$  la caída por ciclo logarítmico y por tanto:

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta d} \quad [2]$$

El caudal de bombeo  $Q$  debe expresarse en  $m^3/día$  para obtener  $T$  en  $m^2/día$ .

La forma de operar en campo es la siguiente: Se efectúa un bombeo a caudal constante  $Q$ . Al cabo de un tiempo  $r$ , la depresión es  $d$ , y se interrumpe el bombeo. Los niveles, a partir de este momento, empiezan a subir y las depresiones a decrecer. Las depresiones que se van midiendo son las depresiones o descensos residuales  $d_i$ . A partir de dicha parada, se miden los niveles (depresiones) con una secuencia en el tiempo análoga a la ya descrita para los bombeos, acorde con una escala logarítmica. Por ejemplo, minutos 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, etc.

Cada uno de estos minutos representa un tiempo  $f'$ , mientras que el tiempo de bombeo  $l$  es fijo.

Se representan en un gráfico semilogarítmico los valores de  $dn$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(l + t')/t'$  en abscisas (escala logarítmica). Se ajusta una recta a los puntos obtenidos y se obtiene el valor de  $T$  mediante la relación (2). Esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de valores de  $l'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(f + f')/f'$ , Por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

## **7.15 Resultados de la interpretación**

El análisis e interpretación de resultados de las pruebas de bombeo se realizó con el software Aquifer Test Pro 2016.1. Para las cuatro pruebas de bombeo se estimó la transmisividad utilizando la metodología de Theis (1935) y Cooper-Jacob (1946) y para la prueba de recuperación se calculó la transmisividad y conductividad hidráulica mediante el método de recuperación de Theis y Jacob.

En la tabla 7.6 se reportan los valores obtenidos de transmisividad y conductividad hidráulica calculada. Con respecto a los valores de conductividad hidráulica, estos fluctúan entre  $7.05 \times 10^{-2}$  m/seg y  $8.16 \times 10^{-4}$  m/seg, y que de acuerdo con la literatura especializada (Freeze & Cherry, 1979), la clasificación de estos valores de acuerdo con el modelo conceptual corresponden a rocas calizas kársticas.

Los resultados de la conductividad hidráulica son representativos, ya que los pozos están perforados en la Formación Icaiche, la cual se encuentra formada por calizas compactas de micro a macro cristalinas, generalmente dolomitizadas, a veces silificadas o bien simplemente recristalizadas.

**Tabla 7.6 Valores de transmisividad y Conductividad hidráulica.**

Pozo	Método de Theis		Método de Cooper-Jacob		Q (lps)
	T (m <sup>2</sup> /día)	K (m/seg)	T (m <sup>2</sup> /seg)	K (m/seg)	
XP-29 Zoh-Laguna	6.09 E03	1.4 E-03	2.8 E03	6.5E-04	6.70
Pozo No. 2 Silvituc	5.39 E02	8.9 E-05	4.2 E02	6.9 E-05	49-52
XP-06 Nuevo Veracruz	7.05 E01	2.7 E-05	7.05 E01	2.7 E-05	11.90
XP-31 Santa Lucia	9.82 E01	2.3 E-05	9.82 E01	2.3 E-05	10
Rancho Icaiche			5.68 E01	2.2 E-05	5-7



## 8 GEOFÍSICA

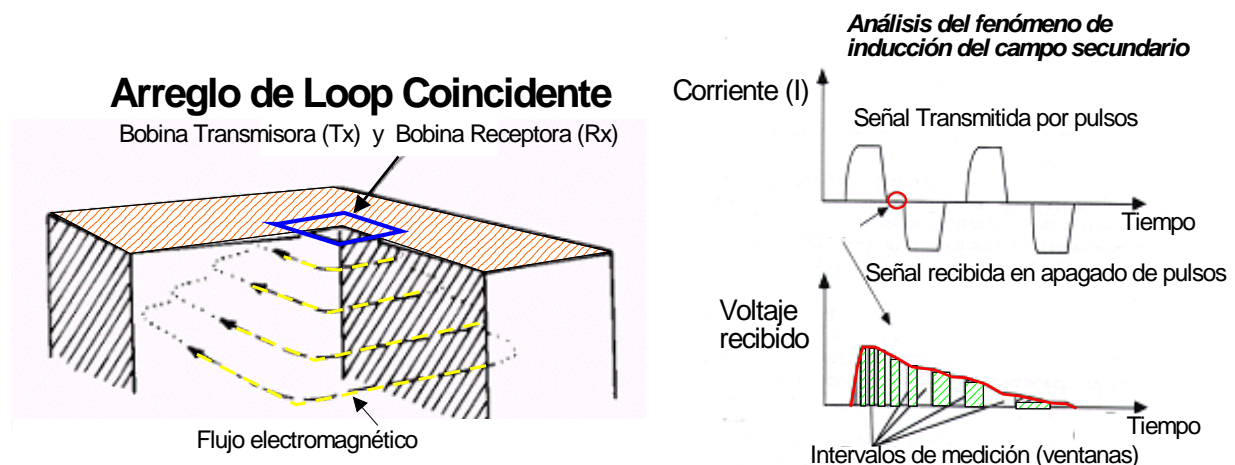
### 8.1 Métodos electromagnéticos

En el campo de la geohidrología, la Técnica del Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM), es una de las técnicas geofísicas más modernas para la exploración del agua subterránea, tanto en equipos de medición como en el soporte técnico-científico para la interpretación de los datos medidos.

#### 8.1.1 Método TDEM o TEM

Con el método electromagnético (TEM) se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad basados en la caracterización resistiva. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo. En las secciones del subsuelo es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca, donde además la presencia del agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad que es el parámetro experimental de campo que se mide.

La técnica del TEM (sondeo transitorio electromagnético), consistió en utilizar una espiral o bobina que está construida por un cable en forma de cuadro con dimensiones de 50 x50m (área de la bobina 2 500 m<sup>2</sup>), con el arreglo denominado "Loop coincidente" (figura 8.1).



**Figura 8.1 Arreglo de Loop coincidente.**

Con este arreglo se realizaron una serie de pruebas que consistieron en variar parámetros tales como:

1. Pruebas de la resistencia del circuito de transmisión y recepción
2. Análisis de la intensidad de corriente circulante
3. Análisis de ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias
4. Análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación)
5. Análisis de la repetibilidad de la respuesta medida por el equipo
6. Apilamiento de la señal con promedios de 256, 512, 1024 y 2048 muestras

Las pruebas y análisis anteriores se hicieron en dos sitios, de tal manera que fueran representativos de las condiciones generales esperadas.

El procesado de los registros se efectuó en las siguientes etapas, para cada sondeo y fueron:

1. Transferencia de los registros a la computadora.
2. Edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de nV/AMP contra tiempo (curva de decaimiento).
3. Conversión de la curva de decaimiento a Resistividad Aparente contra tiempo.
4. Cálculo del modelo estratificado.
5. Cálculo del modelo suavizado (inversión Occam).
6. Transferencia de las curvas y los modelos generados, formación de la base de datos.
7. Elaboración de plantas y secciones de isorresistividad.

Todas las etapas del proceso anterior se realizaron en gabinete, y los datos de campo fueron analizados el mismo día que fueron levantados. Para la ubicación de los sitios de medición, se utilizó un GPS, mientras que la elevación fue tomada de las cartas topográficas editadas por el INEGI.

### **8.1.2 Ventajas del método TEM**

1. Desde el punto de vista logístico es evidente la ventaja sobre el SEV para profundidades mayores a 200 m.
2. En presencia de capas resistivas superficiales donde la resistencia de contacto es muy alta (contacto galvánico) no afecta, ya que el fenómeno que se registra es de inducción.
3. También se salvan los problemas locales por contacto galvánico (SEV).
4. Alta resolución lateral.
5. Capacidad de penetración en capas conductoras.

## **8.2 Procesamiento de los datos**

El proceso de los datos, para cada sondeo, consistió en obtener un modelo unidimensional, partiendo de la curva de resistividad aparente la cual es procesada en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones.

Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es aplicar una regresión tipo Occam con lo cual se logra obtener un modelo multicapas (19 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección. A continuación se describe cada proceso.

### **8.2.1 Modelo suavizado**

El procesado de los datos consistió en obtener los modelos suavizados mediante una regresión tipo Occam, en la que se propone una resistividad inicial y una final, basada en los datos de campo.

El algoritmo requiere de un número de capas inicial, un valor de ajuste al que se quiere llegar y un número máximo de iteraciones, estos tres últimos parámetros no intervienen en la obtención del modelo suavizado, por lo que este sólo depende de los valores de resistividad de campo. Entonces la técnica se basa en el precepto filosófico dictado por William de Occam en los albores del siglo XIV que dice: "Es en vano hacer con lo más lo que puede ser hecho con lo menos", y en el uso de la regresión Ridge, para encontrar un modelo que cumpla con el error marcado en el ajuste o con el mínimo error posible.

### **8.2.2 Modelo unidimensional**

También los datos fueron procesados por el modelado por capas o unidimensional se hizo siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de la curva de campo, las pendientes de la curva y los tiempos a los que ocurren las inflexiones.

Este proceso posibilita que el intérprete modifique los parámetros del modelo y presenta el cálculo de las curvas teóricas de las modificaciones realizadas, esta característica hace que el ajuste del modelo sea rápido.

Una vez que se ha obtenido un ajuste aceptable, el modelo generado se somete a una regresión automática con las técnicas de Ridge y de Marquardt con algoritmos de aproximación de tipo Anderson para obtener, por inversión, el mejor ajuste bajo el criterio del error cuadrático medio mínimo.

Los modelos obtenidos, son sometidos a un nuevo proceso para obtener una serie de modelos equivalentes que cumplan con el mismo error de ajuste (anexo 2). Los modelos equivalentes posibilitan establecer el intervalo de variación de los espesores y resistividades en cada capa del modelo original con fines de correlación electroestratigráfica.

### 8.2.3 Localización de los TEM'S

La campaña de exploración geofísica consistió en realizar 9 sondeos: tres en la zona del acuífero Xpujil, con el objetivo de explorar el subsuelo cerca de la probable estación de servicio del Tren Maya; tres en la zona del poblado de Ramón Corona y tres en la zona del poblado de Constitución (debido a que el “Estudio hidrológico, hidráulico y de calidad del agua en la zona de influencia del Tren Maya” (IMTA, 2018), contempla la “Conducción de AP para comunidades de nueva creación en el municipio de Calakmul”, de esas zonas, debido a la mala calidad del agua del acuífero Xpujil). En la figura 8.2 se muestran las tres zonas de estudio y en las figuras 8.3, 8.4 y 8.5 los perfiles de los TEMS.



Figura 8.2 Localización de la zona de estudio.

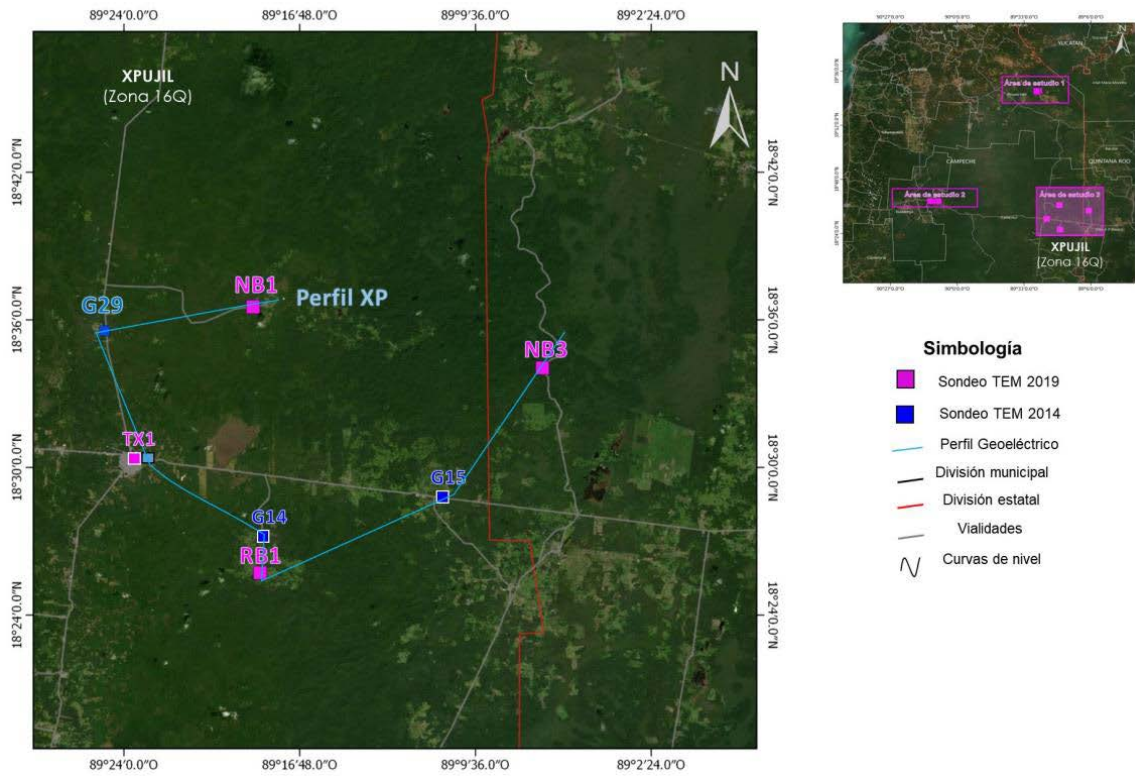


Figura 8.3 Localización del perfil con los TEMs en el acuífero Xpujil.

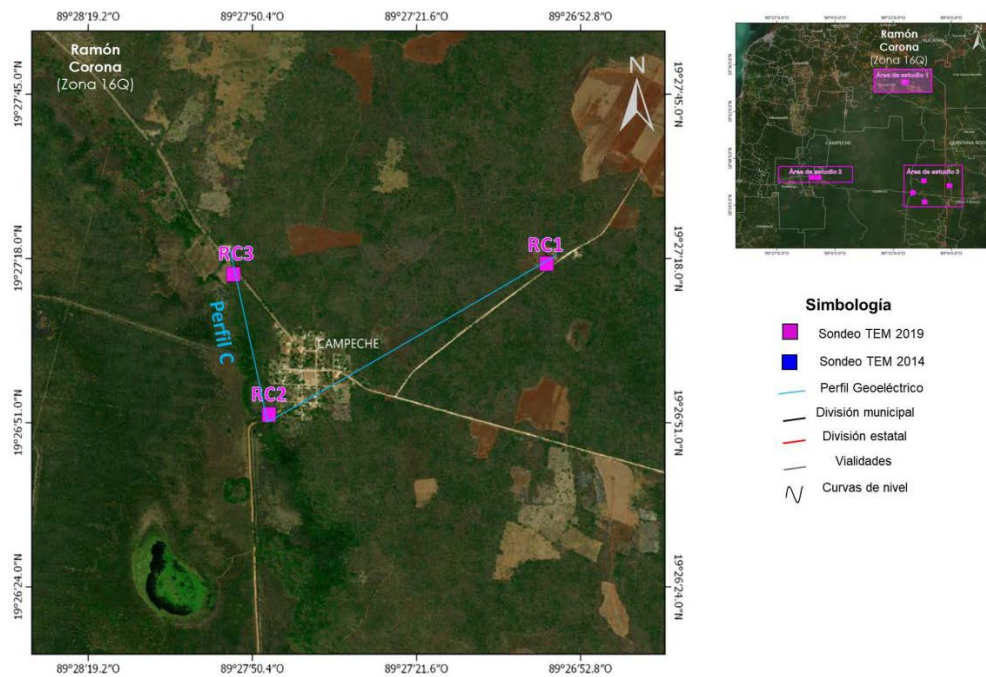
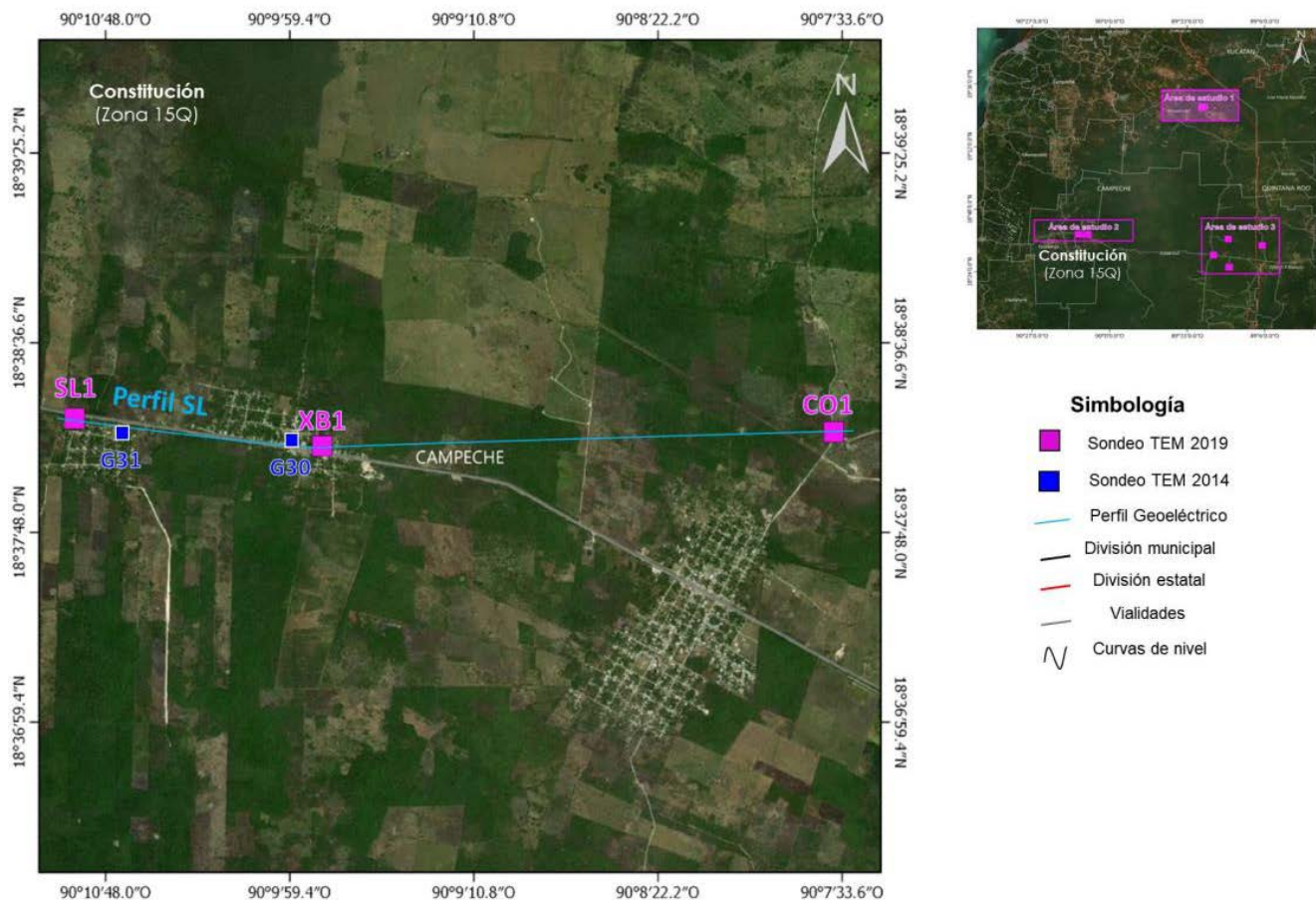


Figura 8.4 Localización del perfil con los TEMs en la zona del poblado Ramón Corona.



**Figura 8.5 Localización del perfil con los TEMs en la zona del poblado Constitución.**

### 8.3 Resultados

La resistividad real o verdadera definida, con la técnica de interpretación para los sondeos por transitorio electromagnético, puede diferir del valor que se obtiene con las otras técnicas existentes para su determinación. Esto se debe a múltiples factores que van desde el tipo de señal producida y forma de registro, hasta las suposiciones y simplificaciones empleadas en la formulación físico-matemática que define a la resistividad real.

Las secciones de resistividad, que se obtuvieron de los modelos suavizados, son de gran utilidad pues conjunta las variaciones de la resistividad en el plano vertical y permite observar las diferentes características de los materiales.

En los perfiles que integran los sondeos por transitorio electromagnético o TEM, se determinaron tres unidades geoelectricas o intervalos con algunas subdivisiones, dos con subunidades, las cuales se agrupan en la tabla 8.1. En la tabla se presenta la unidad georresistiva, su rango de valores y los materiales con que se asocia a la unidad geoelectrica.

**Tabla 8.1 Zonificación Geoeléctrica resultado de la exploración geofísica.**

Unidad Geoeléctrica	Intervalo Resistivo [ohm-m]	Posible Correlación
U1a	5 a 50	Capa de Cobertura, constituida por materiales de relleno, depósitos aluviales y material calcáreo.
U1b	50 a 100	Capa de cobertura, asociado con calizas fracturadas y/o alteradas que se consideran drenadas.
U2a	5 a 15	Calizas fracturadas con mayor desarrollo de karsticidad con intercalaciones de limos (posible presencia de margas).
U2b	15 a 50	Calizas fracturadas con desarrollo de karst y posible saturación
U3	50 a 150	Rocas calizas o lutitas con menor fracturamiento y permeabilidad de regular a baja.

La **Unidad geoeléctrica U1** (capa de cobertura): Dividida en dos segmentos para una mejor descripción, la subunidad **U1a** presenta resistividades de 5 a 50 Ohm-m y está conformada por materiales de depósito, sedimentarios (arena, arcilla, grava) y fragmentos de roca. La **subunidad U1b** agrupa materiales con resistividades de 50 a 100 Ohm-m, relacionados con rocas fracturadas y/o alteradas, posiblemente calizas que se consideran drenadas.

La **unidad geoeléctrica U2** (materiales fracturados con posibles intercalaciones de finos): Dividida en dos rangos, la **subunidad U2a** con resistividades de 2 a 15 Ohm-m se relaciona con calizas fracturadas con mayor desarrollo de karsticidad y según la información geológica regional, posibles intercalaciones de limos (margas). Se le atribuye una permeabilidad de regular a baja; la **subunidad U2b** presenta resistividades de 15 a 50 Ohm-m, con calizas fracturadas con desarrollo de karst, buena permeabilidad y presencia de saturación, pero las posibles intercalaciones de margas y arcillas reducen su permeabilidad y su potencial hídrico.

La **Unidad geoeléctrica U3 (calizas y/o lutita)**: presenta los valores de resistividad más altos por debajo de la cobertura, de 50 a 150 Ohm-m y se relaciona con calizas y/o lutitas que presentan menor fracturamiento y por lo tanto se consideran con menor permeabilidad.

### 8.3.1 Perfiles geoelectricos

Para mostrar el comportamiento de la resistividad eléctrica en perfil para los primeros 150 m, se construyeron tres secciones, que integran la información de la zona explorada en el acuífero Xpujil, Ramón Corona y Constitución.

Los perfiles geofísicos construidos se presentan en las figuras de la 8.6 a la 8.8, a través de estas imágenes de resistividad podemos conocer el comportamiento del subsuelo y asociarlo con características físico-químicas que presentan estos materiales, resultando una manera práctica de inferir la presencia de **zonas conductoras** asociadas con posibilidades de alojar acuíferos, o con cambios litológicos, ya que la presencia del agua y materiales con características arcillosas provocan cambios en la resistividad, en un orden menor.

Cabe señalar, que para correlacionar la información generada en este proyecto, se integraron los resultados de algunos sondeos cercanos a los perfiles, levantados en el año 2014 y que nos fueron proporcionados para la integración de este estudio.

A continuación se describen algunas secciones que muestran la distribución de las unidades geoelectricas identificadas.

#### 8.3.1.1 Perfil geoelectrico XP (Xpujil)

Este perfil (**Figura 8.6**) es el de mayor longitud (66,000 m) y que integra el mayor número de sondeos (7 sondeos); inicia al NW de la zona de estudio, en el sondeo NB1 (Nuevo Becal-1), continua hacia el sur por el costado oriente de las zonas de estudio por los sondeos G29, TH1, G14, RB1, cambia hacia el oriente hacia G15 y termina al noroeste NB3 al sur de la población hasta el RC2 y termina al norponiente en el sondeo RC1; el perfil muestra la distribución con más cambios laterales y verticales de los 3 sitios y que se describe a continuación: la Unidad U1 conforma la capa de cobertura y predominan los materiales relacionados con la subunidad U1a, relacionada con materiales de relleno y espesores de 20 a 40 m; por debajo de los sondeos NB1 y G15 se presentan cambios altos resistivos de la subunidad U1b, relacionado con rocas fracturadas y/o alteradas pero que se consideran drenadas, con espesores de 30m y 10m respectivamente; en la primera mitad del perfil subyace la subunidad U2b, relacionada con rocas fracturadas con posible permeabilidad y las mejores posibilidades para alojar agua subterránea, con excepción de las zonas donde se presenta la subunidad U2a, que se le atribuye una permeabilidad de regular a baja; por debajo de la cobertura en el sondeo G15 y por debajo de la Unidad U2 se presenta la Unidad U3, relacionado con rocas calizas y/o lutitas según la geología de la región, las cuales se les atribuye una menor permeabilidad.



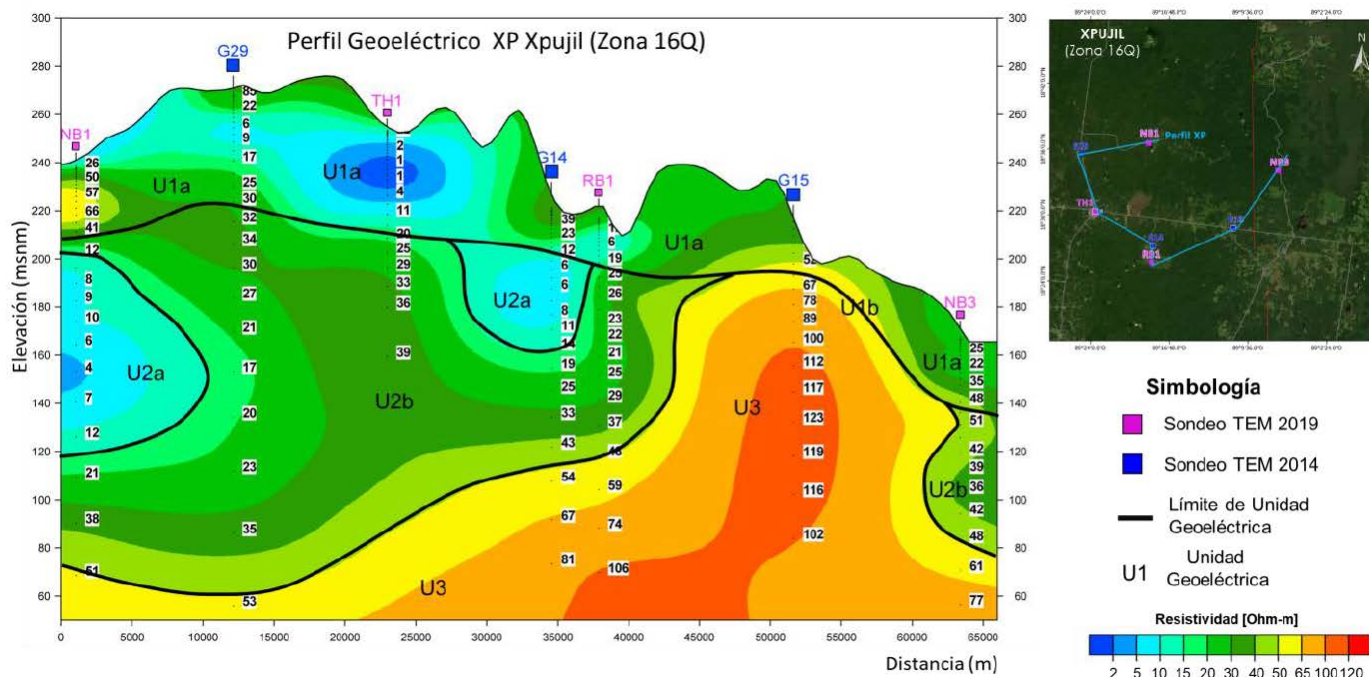
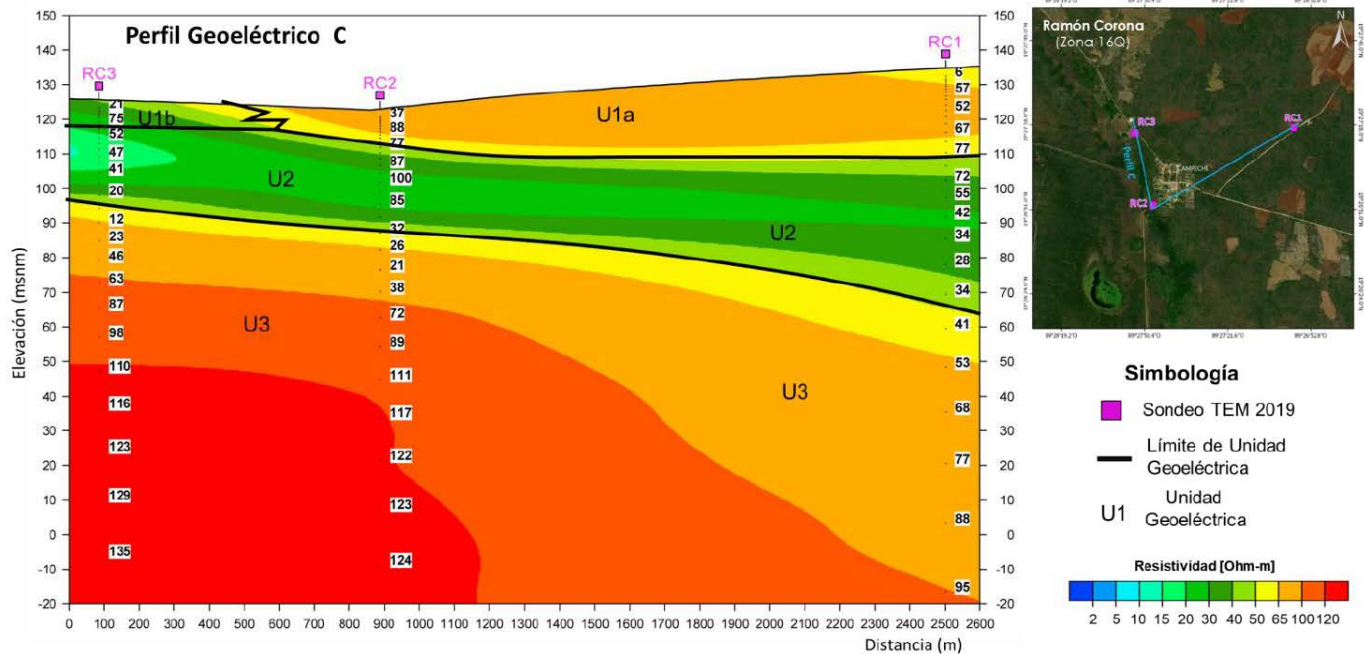


Figura 8.6 Perfil Geoelectrico XP Xpujil.

### 8.3.1.2 Perfil geoelectrico Ramón Corona

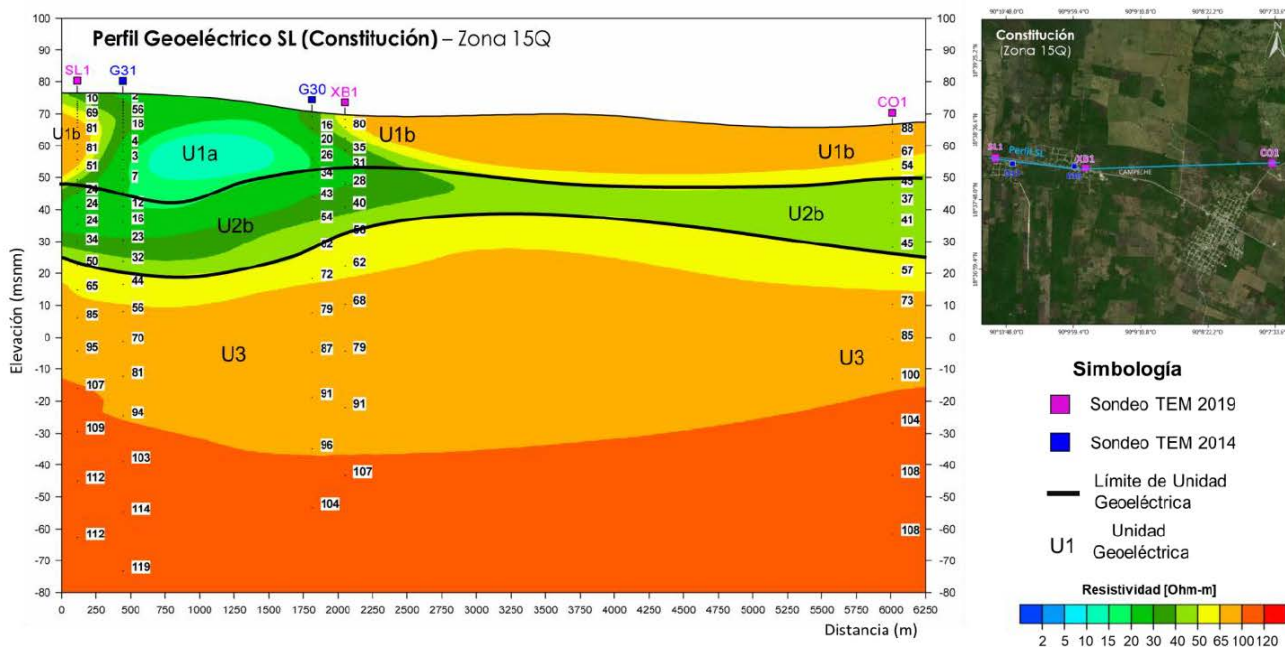
El perfil C (**Figura 8.7**) cubre una longitud de 2,600 m, inicia al nor-poniente de la zona de estudio en el sondeo RC3, continua al sur de la población hasta el RC2 y termina al norponiente en el sondeo RC1; el perfil muestra una distribución casi horizontal de las unidades y que se describe a continuación: la Unidad U1 conforma la capa de cobertura y presenta bajo el sitio RC3 la presencia de la subunidad U1a, relacionada con materiales de relleno con espesor promedio de 10m; en los otros dos sondeos de la cobertura, se presenta la subunidad U1b, relacionado con rocas fracturadas y/o alteradas pero drenadas, con espesores de 10 y 25m para los sondeos RC2 y RC1, respectivamente; subyaciendo se aprecian resistividades de U2b, relacionada con rocas fracturadas con posible permeabilidad y las mejores posibilidades para alojar agua subterránea, con espesor de creciente de 20 m por debajo de RC3 a 40 m por debajo de RC1; subyaciendo domina en el perfil materiales con resistividades agrupadas en la Unidad U3, relacionado con rocas calizas y/o lutitas según la geología de la región, las cuales se les atribuye una menor permeabilidad.



**Figura 8.7 Perfil Geoelectrico en la zona del poblado Ramón Corona.**

### 8.3.1.3 Perfil geoelectrico Constitución

El perfil SL (Figura 8.8) alcanza una longitud de 6200 m, con rumbo general poniente-oriente, y uno de los sondeos SL1, XB1 y CO1 realizados para este proyecto, además de integrar los sondeos G31 y G30 (2014); el perfil muestra una distribución horizontal de sus unidades, con un par de cambios en la cobertura además de algunos cambios de espesor; la Unidad U1 conforma la capa de cobertura con espesores de 20 a 30 m que muestra un cambio lateral con bajos resistivos, entre los sondeos SL1 y XB1 relacionado con materiales de relleno; por debajo se presenta un espesor de 20m en promedio de la subunidad U2b, relacionada con calizas fracturadas, con permeabilidad de regular a buena y que se les atribuye las mejores posibilidades para alojar agua subterránea; predomina en el perfil materiales con resistividades de 50 a 100 Ohm-m de la Unidad U3, por debajo de los 50m; en este caso se recomienda no descartar la posibilidad que los materiales cercanos a la subunidad U2b puedan alojar agua subterránea que pueda ser extraída por medio de pozos.



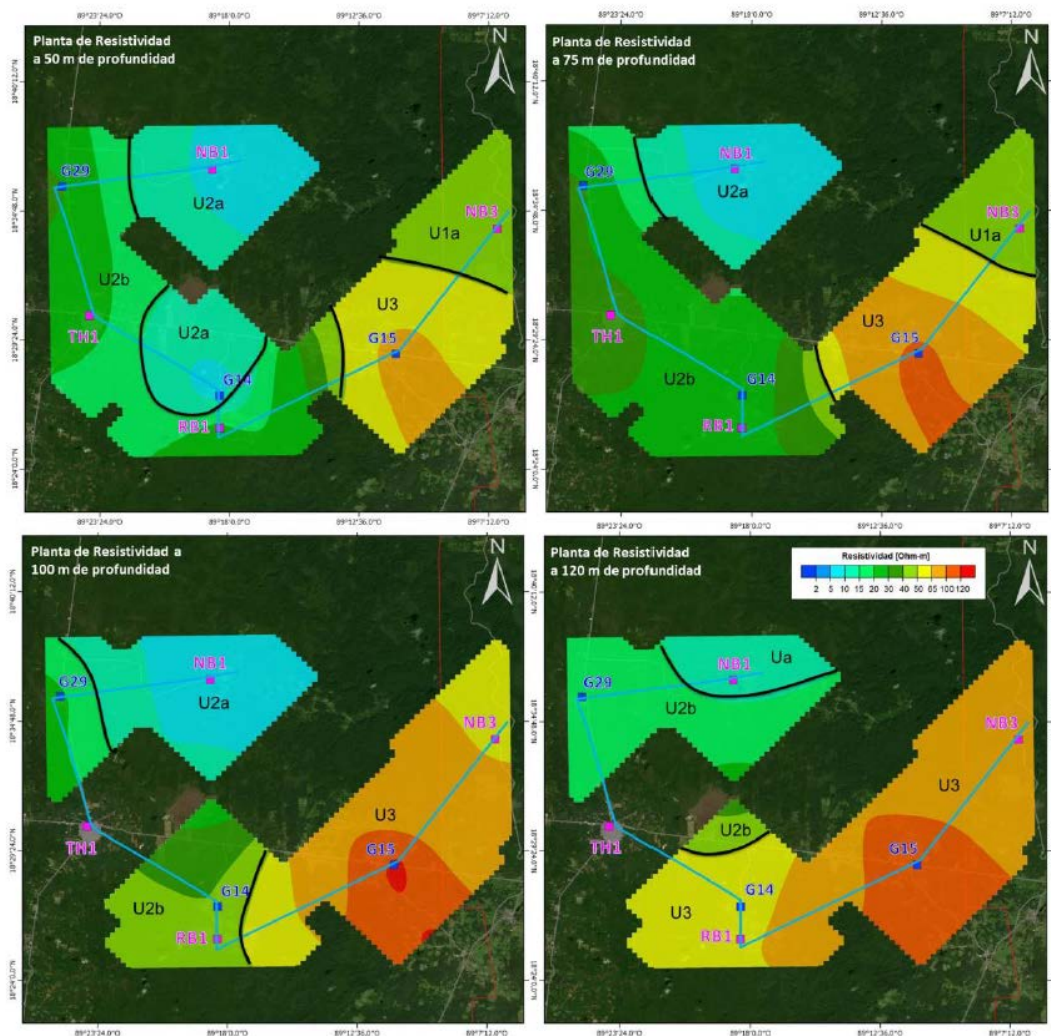
**Figura 8.8 Perfil Geoelectrico SL, sondeos en Santa Lucia (SL1), Xbonil (XB1) y Constitución (CO1).**

### 8.3.2 Mapas de resistividad

Los **mapas de resistividad** son de gran utilidad pues conjuntan las variaciones de resistividad en el plano vertical y horizontal, respectivamente, lo que permite zonificar las diferentes unidades para observar las diferentes características de los materiales a distintas profundidades (planos) y permite ubicar las zonas con mejor potencial geohidrológico. Para este proyecto se elaboraron mapas a las profundidades de a 10, 30, 50, 75, 100 y 120 m los cuales contribuyeron con el análisis e interpretación del modelo geoelectrico que se presenta en cada zona.

#### 8.3.2.1 Mapas de resistividad en la zona explorada del acuífero Xpujil

En la Figura 8.9 se muestran los mapas de la zona de exploración del Xpujil, que cubren un área mayor y que incluyen un mayor número de sondeos; en los mapas a 50, 75 y 100 m destaca en el costado poniente de la zona de estudio, la presencia de la subunidad U2b, que se relaciona con mejor potencial geohidrológico, con base en los valores resistivos que presenta (15 a 50 Ohm-m), y al oriente destacan en tonos amarillos las zonas con materiales de la U3.



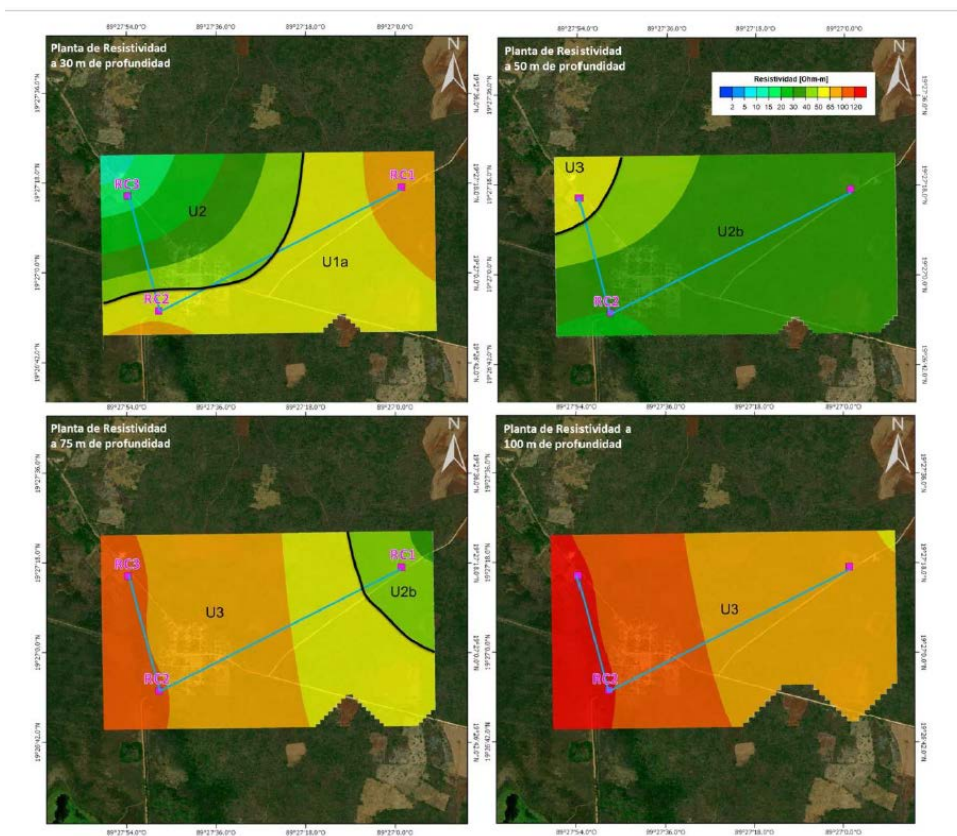
Clasificación geofísica.

Unidad Geoelectrica	Intervalo Resistivo [ohm-m]	Posible Correlación
U1a	5 a 50	Capa de Cobertura, constituida por materiales de relleno, depósitos aluviales y material calcáreo.
U1b	50 a 100	Capa de cobertura, asociado con calizas fracturadas y/o alteradas que se consideran drenadas.
U2a	5 a 15	Calizas fracturadas con mayor desarrollo de karsticidad con intercalaciones de limos (posible presencia de margas).
U2b	15 a 50	Calizas fracturadas con desarrollo de karst y posible saturación
U3	50 a 150	Rocas calizas o lutitas con menor fracturamiento y permeabilidad de regular a baja.

Figura 8.9 Mapas de Resistividad a 30, 75, 100 y 120m, en la zona del acuífero Xpujil.

### 8.3.2.2 Mapas de resistividad en la zona de Ramón Corona

En la Figura 8.10 se muestra la distribución de la subunidad U2b, que se considera con potencial Geohidrológico al norponiente del mapa a 30m, en casi todo el mapa a 50m y al nororiente del mapa a 75m de profundidad, aunque destaca que en los otros dos sitios se presenta la Unidad U3.



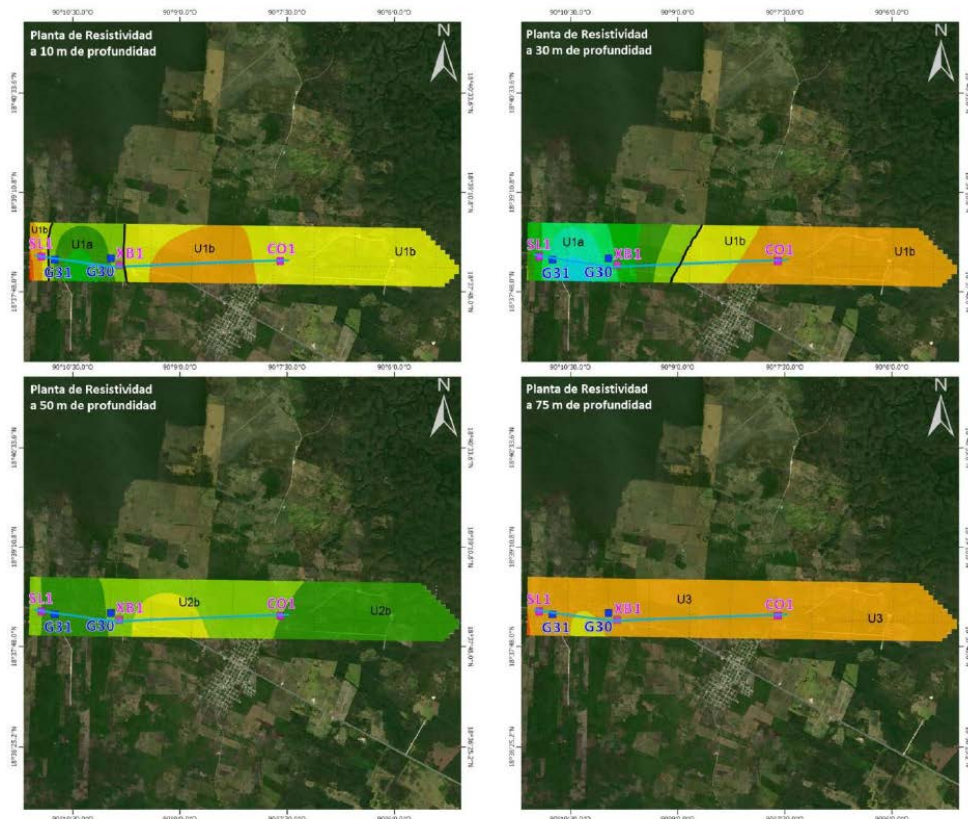
Clasificación geofísica.

Unidad Geoeléctrica	Intervalo Resistivo [ohm-m]	Posible Correlación
U1a	5 a 50	Capa de Cobertura, constituida por materiales de relleno, depósitos aluviales y material calcáreo.
U1b	50 a 100	Capa de cobertura, asociado con calizas fracturadas y/o alteradas que se consideran drenadas.
U2a	5 a 15	Calizas fracturadas con mayor desarrollo de karsticidad con intercalaciones de limos (posible presencia de margas).
U2b	15 a 50	Calizas fracturadas con desarrollo de karst y posible saturación
U3	50 a 150	Rocas calizas o lutitas con menor fracturamiento y permeabilidad de regular a baja.

Figura 8.10 Mapas de Resistividad a 30, 50, 75 y 100m en la zona de Ramón Corona

### 8.3.2.3 Mapas de resistividad en la zona de Constitución.

La Figura 8.11 muestra la distribución y geometría de la cobertura, que presenta zonas de relleno en la U1a y materiales drenados en la U1b. Al poniente de la zona de estudio se presenta la zona más conductora, relacionada con la U2b, en el mapa a 30m y se predomina en el mapa a 75m de profundidad y desaparece en el mapa a 75m para dar paso a los materiales de la Unidad U3.



Clasificación geofísica.

Unidad Geoeléctrica	Intervalo Resistivo [ohm-m]	Posible Correlación
U1a	5 a 50	Capa de Cobertura, constituida por materiales de relleno, depósitos aluviales y material calcáreo.
U1b	50 a 100	Capa de cobertura, asociado con calizas fracturadas y/o alteradas que se consideran drenadas.
U2a	5 a 15	Calizas fracturadas con mayor desarrollo de karsticidad con intercalaciones de limos (posible presencia de margas).
U2b	15 a 50	Calizas fracturadas con desarrollo de karst y posible saturación
U3	50 a 150	Rocas calizas o lutitas con menor fracturamiento y permeabilidad de regular a baja.

Figura 8.11 Mapas de Resistividad a 10, 30, 75 y 100 m, en la zona Constitución.

## 8.4 Conclusiones y recomendaciones

Se llevó a cabo un estudio de exploración geofísica aplicando la técnica de Sondeo por Transitorio Electromagnético, mejor conocido como sondeo TEM en 9 sitios, con la finalidad de conocer la electro-estratigrafía por debajo de los sondeos, para determinar el comportamiento de Unidades Geofísicas del subsuelo e inferir sus características Geohidrológicas, con una profundidad de investigación del orden de los 150m.

Con los 9 sondeos realizados, se construyeron tres perfiles, donde se desprende un modelo electro-estratigráfico con tres unidades Geoeléctricas, 2 con subunidades, que se describe a continuación:

- La unidad U1a corresponde con materiales de la capa de cobertura con resistividades de 5 a 50 Ohm-m relacionado con arenas y materiales de relleno poco consolidados.
- La unidad U1b agrupa materiales con resistividades de 50 a 100 Ohm-m, que corresponde con calizas fracturadas y/o alteradas de la capa de cobertura que se consideran drenadas compactas o drenadas
- La Unidad U2a con resistividades de 5 a 15 Ohm-m se infieren calizas con mayor desarrollo de karsticidad y posible saturación
- La Unidad U2b basado en los valores resistivos que presenta se relaciona con calizas fracturadas, con desarrollo de karst y posible saturación, por lo que se le atribuye el mayor potencial Geohidrológico.
- La Unidad U3 se conforma con materiales resistivos de 50 a 150 Ohm-m, asociados con calizas y/o lutitas con menor fracturamiento, por lo que se le atribuye una permeabilidad de regular a baja, en especial para las zonas con valores más altos

Finalmente, con los resultados del estudio y del análisis de la información recopilada, se desprende un modelo electro-estratigráfico con tres unidades Geoeléctricas, se logró el objetivo de caracterizar geo-hidrológicamente la zona de las cuales la unidad U2b se asocia con calizas fracturadas, con desarrollo de karsticidad y posible saturación, por lo que se considera con mejor potencial geohidrológico, pero las posibles intercalaciones de margas y arcillas reducen su permeabilidad y su potencial hídrico, por lo que se recomienda correlacionar la información para contribuir con una óptima elección de sitios de exploración directa.

## **9 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO**

### **9.1 Metodologías de vulnerabilidad de acuíferos: alcances y definiciones**

#### **9.1.1 Definiciones**

El concepto Vulnerabilidad se origina de la frase latina vulnerabilis, vulnerare que significa fácilmente dañado, herido o atacado. Desde los tiempos antiguos de (Períodos egipcio, romano y osmán), el uso del agua subterránea se ha relacionado con la protección y comprensión conceptual de la vulnerabilidad del acuífero a diferentes fuentes de contaminación. Este concepto fue atestiguado por primera vez por Balzac en 1836 (Glosario 2004). Margat (1968) introdujo el concepto de vulnerabilidad en la literatura hidrogeológica. Albinet y Margat (1971) presentaron el primer mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas del territorio francés (Moraru and Hannigan, 2018).

Como se ilustra en la Tabla 9.1, el concepto de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación tiene diferentes significados para diferentes personas. En su contexto más amplio, la vulnerabilidad del agua subterránea se refiere a si un acuífero subyacente se contaminará o no como resultado de las actividades en la superficie terrestre (NRC, 1993).

**Tabla 9.1 Las muchas formas de definir la vulnerabilidad del agua subterránea.**

La vulnerabilidad significa cosas diferentes para diferentes personas. Algunos la ven como una característica intrínseca de los suelos y otras partes del entorno natural. Otros encuentran que la vulnerabilidad depende de las propiedades de contaminantes individuales o grupos de contaminantes, pero es independiente de las prácticas específicas del uso de la tierra o de la gestión (por ejemplo, la cantidad de pesticida aplicada). Otros más asocian la vulnerabilidad con un conjunto específico de actividades humanas en la superficie terrestre. Algunos autores han intentado evitar por completo el término vulnerabilidad y han sustituido términos como sensibilidad. Las siguientes citas ilustran la diversidad en la terminología.

Foster (1987):

- Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero: "las características intrínsecas que determinan la sensibilidad de varias partes de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta".
- Riesgo de contaminación del agua subterránea: "la interacción entre (a) la vulnerabilidad natural del acuífero y (b) la carga de contaminación que se aplica, o se aplicará, en el ambiente subterráneo como resultado de la actividad humana".

U.S. General Accounting Office (1991):

- Vulnerabilidad hidrogeológica: "una función de factores geológicos como la textura del suelo y la profundidad del agua subterránea".



- Vulnerabilidad total: "una función de estos factores hidrogeológicos, así como de los factores de uso de pesticidas que influyen en la susceptibilidad del sitio".
- Riesgo total: "Este último enfoque es aún más amplio, ya que incorpora el tamaño de la población en riesgo por la posible contaminación por pesticidas, es decir, el número de personas que obtienen su agua potable del agua subterránea en el área".

Pettyjohn y col. (1991)

- Vulnerabilidad del acuífero: "La geología del sistema físico determina la vulnerabilidad".
- Sensibilidad del acuífero: "La sensibilidad del acuífero está relacionada con el potencial de contaminación. Es decir, los acuíferos que tienen un alto grado de vulnerabilidad y se encuentran en áreas de alta densidad de población, se consideran los más sensibles ...

U.S. Environmental Protection Agency (1993):

- Sensibilidad del acuífero: "La relativa facilidad con que un contaminante (en este caso, un pesticida) aplicado sobre o cerca de la superficie terrestre puede migrar al acuífero de interés. La sensibilidad del acuífero es una función de las características intrínsecas de los materiales geológicos de interés, cualquier material saturado subyacente y la zona no saturada sobreyacente. La sensibilidad no depende de las prácticas agronómicas o las características de los pesticidas".
- Vulnerabilidad del agua subterránea: "La relativa facilidad con la que un contaminante (en este caso un pesticida) aplicado sobre o cerca de la superficie terrestre puede migrar al acuífero de interés bajo un conjunto dado de prácticas de manejo agronómico, características del pesticidas y condiciones de sensibilidad hidrogeológica.

Para los propósitos de este informe, la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación se define como:

**La tendencia o probabilidad de que los contaminantes alcancen una posición específica en el sistema de agua subterránea después de su introducción en algún lugar sobre el acuífero superior.**

Tenga en cuenta que esta definición de vulnerabilidad de las aguas subterráneas se refiere a la contaminación resultante de fuentes no puntuales o fuentes puntuales de contaminación distribuidas localmente y no aborda las fuentes puntuales de contaminación individuales ni ninguna situación en la que se coloque un contaminante a propósito en el sistema de aguas subterráneas. Así, el concepto de vulnerabilidad de las aguas subterráneas aborda solo los contaminantes introducidos por humanos sobre la capa freática en o cerca de la superficie terrestre. Otra posible contaminación debe abordarse caso por caso utilizando otros medios.

Esta concepción de la vulnerabilidad del agua subterránea está limitada, como cualquier otra, por un principio fundamental conocido como la:

**Primera Ley de Vulnerabilidad del Agua Subterránea: Toda el agua subterránea es vulnerable.**

La vulnerabilidad no es una propiedad absoluta o medible, sino una indicación de la probabilidad relativa con que ocurrirá la contaminación; ningún agua subterránea (con posibles excepciones, como salmueras de cuencas sedimentarias profundas) es invulnerable.

Predecir la vulnerabilidad del agua subterránea es un ejercicio impreciso. La información sobre el subsuelo es costosa de obtener, especialmente en áreas extensas, y los métodos de evaluación solo pueden aproximarse a procesos ambientales reales u otras asociaciones. Así se llega a la:

**Segunda Ley de Vulnerabilidad del Agua Subterránea: La incertidumbre es inherente a todas las evaluaciones de vulnerabilidad.**

### 9.1.2 Metodología utilizada

En general, se pueden definir dos tipos de evaluación de la vulnerabilidad. La **vulnerabilidad específica** se usa cuando la vulnerabilidad se refiere a un contaminante específico, clase de contaminante o actividad humana. La **vulnerabilidad intrínseca** se refiere a la vulnerabilidad determinada sin considerar los atributos y el comportamiento de contaminantes particulares. En la práctica, no siempre se puede hacer una distinción clara entre ambas vulnerabilidades. Muchos métodos de evaluación de vulnerabilidad no se refieren a contaminantes específicos (y, por lo tanto, son intrínsecos); sin embargo, muchos de los parámetros utilizados en los métodos de evaluación (por ejemplo, contenido de carbono orgánico) tendrán diferentes influencias en diferentes contaminantes.

### Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea

En general, las evaluaciones de la vulnerabilidad del agua subterránea tienen como objetivo determinar la tendencia o la probabilidad de que los contaminantes alcancen un punto específico en el sistema de aguas subterráneas después de su introducción en algún lugar del acuífero superior (Adam et al., 2004; NRC, 1993). La vulnerabilidad del agua subterránea es un concepto, no una propiedad medible. Es la tendencia o la probabilidad de que ocurra contaminación en el futuro y, por lo tanto, debe inferirse de la información sustituta que se puede medir. En este sentido, una evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea es una declaración predictiva muy parecida a un pronóstico del tiempo, pero para procesos que se llevan a cabo bajo tierra y a largo plazo (NRC, 1993). Las evaluaciones de la vulnerabilidad ayudan en la evaluación de la susceptibilidad de un acuífero ante posibles amenazas de contaminación y la identificación de acciones correctivas que pueden reducir o mitigar el riesgo de graves consecuencias de las actividades humanas. Las evaluaciones de la vulnerabilidad combinan los componentes físicos y químicos del agua subterránea (es decir, el

entorno hidrogeológico) con indicadores de la naturaleza y el alcance de las posibles fuentes de contaminación para determinar el impacto potencial de éstas influencias antropogénicas en la calidad del agua subterránea (Hamerlinck y Arneson, 2003). Para ello, se requieren comprender los procesos hidrogeológicos y geoquímicos naturales, así como los efectos antropogénicos asociados sobre el recurso agua subterránea para una comprensión científica completa de la vulnerabilidad del agua subterránea (Focazio et al, 2002).

La posibilidad de que los contaminantes se filtren al agua subterránea depende de muchos factores, incluida la composición de los suelos y los materiales geológicos en la zona no saturada, la profundidad hasta el nivel freático, la tasa de recarga del agua subterránea y los factores ambientales que influyen en el potencial de biodegradación. La composición de la zona no saturada puede influir mucho en las transformaciones y reacciones. Por ejemplo, el alto contenido de materia orgánica o arcilla aumenta la adsorción y, por lo tanto, disminuye el potencial de contaminación. La profundidad hasta el nivel freático puede ser un factor importante porque las rutas de flujo cortas disminuyen la oportunidad de adsorción y biodegradación, lo que aumenta el potencial de que muchos contaminantes lleguen al agua subterránea. Por el contrario, las rutas de flujo más largas desde la superficie terrestre hasta el nivel freático pueden disminuir la posibilidad de contaminación por productos químicos que se adsorben o degradan a lo largo de la ruta de flujo. Las tasas de recarga de agua subterránea afectan la extensión y la velocidad de transporte de contaminantes a través de la zona saturada. Finalmente, los factores ambientales, como la temperatura, el pH y el contenido de agua, pueden influir significativamente en la degradación de los contaminantes por las transformaciones microbianas (NRC, 1993).

Existen ciertos factores geológicos e hidrológicos generales que influyen en la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación, como se muestra en la Tabla 1, junto con ejemplos de las características que conducen a una vulnerabilidad baja o alta. Aunque estos factores pueden parecer bastante simples a primera vista, muchos de ellos interactúan en el entorno para crear distinciones de vulnerabilidad más complejas y sutiles que las situaciones extremas mostradas en la Tabla 9.2. Además, muchos de estos factores que afectan la vulnerabilidad son muy variables y difíciles de identificar y caracterizar sobre cualquier área dada.

**Tabla 9.2 Principales características geológicas e hidrológicas que influyen en la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación (Fuente: NRC, 1993).**

<b>Característica Determinante</b>	<b>Baja Vulnerabilidad</b>	<b>Alta Vulnerabilidad</b>
<b>A. Marco Hidrogeológico</b>		
Zona no saturada	Zona no saturada gruesa, con alto contenido de arcilla y material orgánica.	Zona no saturada gruesa con altos niveles de arena, grava, caliza o basalto de alta permeabilidad.
Unidad confinante	Unidad confinante gruesa de arcilla o lutitas por arriba del acuífero.	Sin unidad confinante.

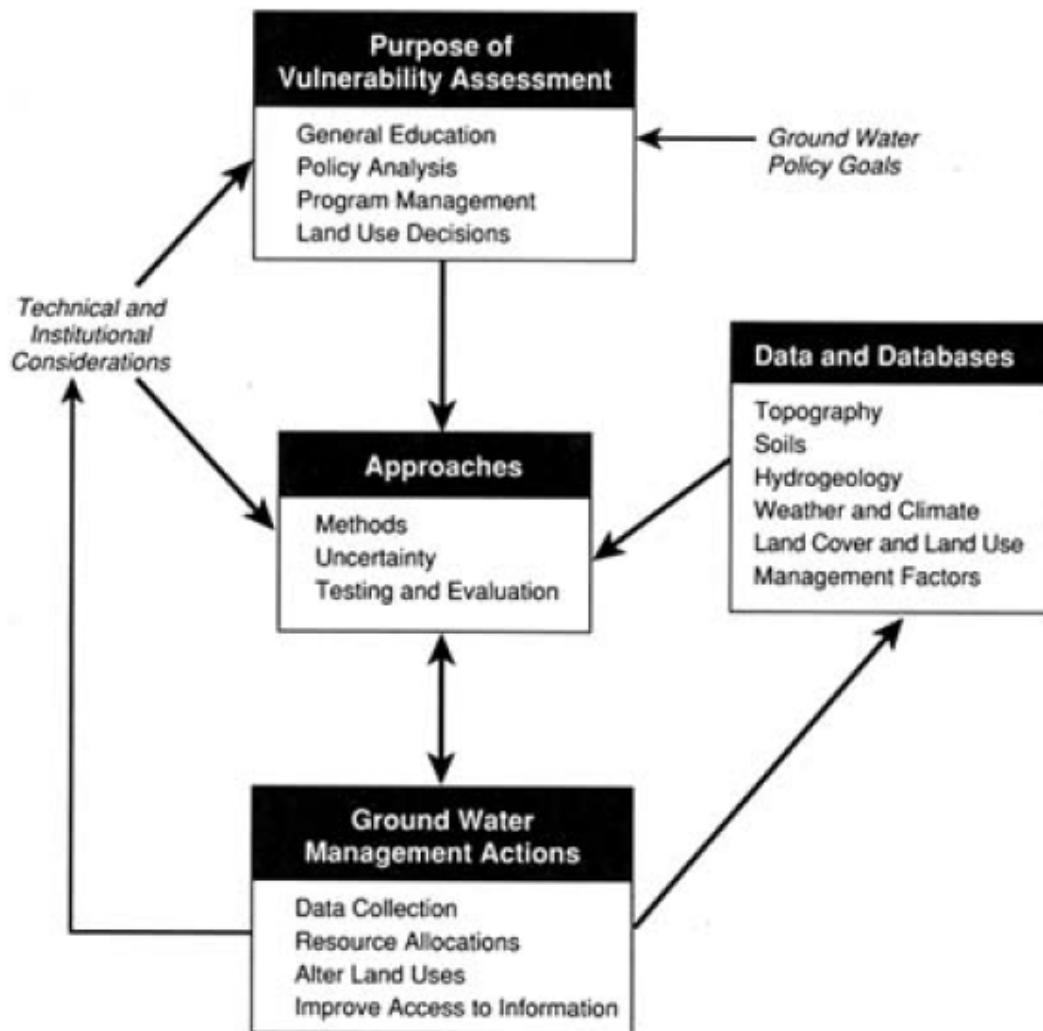
Propiedades del acuífero	Arenisca limosa o caliza shaley de baja permeabilidad.	Calizas cavernosas, arena y grava o basalto de alta permeabilidad.
<b>B. Sistema de flujo subterráneo</b>		
Tasa de recarga	Despreciable velocidad de recarga, como en las regiones áridas.	Altas tasas de recarga, como en las regiones húmedas.
Ubicación dentro del sistema de flujo (cercanía al área de recarga o descarga)	Localizado en la parte más profunda y lenta de un sistema de flujo regional.	Localizado dentro de un área de recarga o dentro de un cono de abatimiento de pozo de bombeo.

### Proceso de evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea

La evaluación de la vulnerabilidad es un proceso dinámico e iterativo que requiere la determinación del propósito de la evaluación, seguido de la selección de un método de evaluación, la identificación del tipo, disponibilidad y calidad de los datos necesarios, el desempeño real de la evaluación y el uso de la información obtenida del proceso de evaluación para tomar decisiones sobre la gestión de los recursos de aguas subterráneas (NRC, 1993).

El primer paso en el proceso de evaluación de la vulnerabilidad es identificar el propósito. Como se muestra en el diagrama de flujo (Figura 9.1), el propósito de una evaluación está determinado por una variedad de factores que incluyen el objetivo de la política de aguas subterráneas de la organización, consideraciones técnicas como la forma del producto y el costo de la evaluación, y cuestiones institucionales como el tiempo marco para la evaluación y disponibilidad de recursos. Los propósitos de las evaluaciones de vulnerabilidad son muchos, desde mejorar la información y la educación hasta analizar el impacto de políticas alternativas del agua subterránea, proporcionar una herramienta para asignar recursos y guiar las decisiones de los usuarios de la tierra o los administradores del uso de la tierra.

La siguiente etapa en el proceso de evaluación de la vulnerabilidad es seleccionar un enfoque adecuado. Hay varios métodos disponibles para la evaluación de vulnerabilidad. Esta etapa del proceso de evaluación incluye elegir un modelo o técnica, identificar las incertidumbres inherentes al modelo y los datos necesarios, y probar el modelo y sus supuestos.



**Figura 9.1 Proceso de evaluación de la vulnerabilidad (fuente NRC, 1993).**

Las consideraciones sobre la disponibilidad y la calidad de los datos requeridos están directamente relacionadas con el desempeño de una evaluación. Estas preguntas influyen tanto en la elección de la técnica como en la confianza de los encargados de formular políticas y los reguladores para tomar decisiones basadas en los resultados.

Una vez que se completa una evaluación, se toman varias medidas de gestión para proteger la calidad del agua subterránea o minimizar la contaminación. Las acciones de gestión van desde alterar las prácticas de uso de la tierra, focalizar las asignaciones de recursos o diseminar información de vulnerabilidad a través de un programa educativo hasta recopilar datos adicionales sobre factores relacionados con la vulnerabilidad o la calidad del agua subterránea. Los resultados y recomendaciones sobre el uso y la mejora de las evaluaciones de vulnerabilidad y la investigación relacionada también deberían aparecer al final del proceso.

Como muestra el diagrama de flujo, el enfoque utilizado para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas es fundamental para el proceso, pero también se ve directamente afectado por los aportes o las consideraciones que conlleva el propósito, la disponibilidad de datos y el uso de la gestión por parte de la evaluación. La selección y el desarrollo de un método para la evaluación de la vulnerabilidad no es simplemente una cuestión de ciencia apropiada, sino que también refleja preocupaciones sobre la necesidad de la evaluación, la disponibilidad de datos adecuados, el nivel de incertidumbre en el modelo o los datos, y el impacto de esta incertidumbre sobre las acciones de gestión resultantes de la evaluación (NRC, 1993).

### **Elementos clave de las evaluaciones de vulnerabilidad**

Los elementos clave a considerar en una evaluación de vulnerabilidad para una aplicación en particular incluyen la ubicación de referencia, el grado de especificidad de contaminante, las vías de contaminación consideradas y el tiempo y las escalas espaciales. La ubicación de referencia es la posición en el sistema de agua subterránea especificada como de interés. La capa freática es la ubicación de referencia utilizada en la mayoría de las técnicas existentes. Sin embargo, los gerentes pueden determinar que otra ubicación de referencia es más útil para sus propósitos. Las evaluaciones de vulnerabilidad pueden o no explicar el distinto comportamiento de diferentes contaminantes en el medio ambiente. Por lo tanto, hay dos tipos generales de evaluaciones de vulnerabilidad. El primero aborda la vulnerabilidad específica y hace referencia a un contaminante específico, clase de contaminante o actividad humana. El segundo aborda la vulnerabilidad intrínseca y es para evaluaciones de vulnerabilidad que no consideran los atributos y el comportamiento de contaminantes específicos. En la práctica, no siempre se puede hacer una distinción clara entre vulnerabilidad intrínseca y específica. Los contaminantes pueden ingresar a los acuíferos a través de una variedad de vías. La mayoría de las técnicas de evaluación existentes solo abordan el transporte que ocurre por percolación simple e ignoran las rutas de flujo preferenciales como biocanales, grietas, juntas y canales de disolución en la zona no saturada. La omisión de rutas de flujo preferenciales es probablemente una limitación significativa de las evaluaciones de vulnerabilidad en muchos entornos. Algunos métodos de superposición e índice han intentado abordar la contaminación que podría ocurrir en pozos y perforaciones mapeando esas características en combinación con los resultados derivados de otros métodos de evaluación. La utilidad general de una evaluación de vulnerabilidad depende en gran medida de la escala a la que se realiza, la escala a la que están disponibles los datos, la escala utilizada para mostrar los resultados y la resolución espacial del mapeo.

Inherentes a cualquier combinación de este tipo serán las incertidumbres científicas asociadas con errores en los datos, errores en el método y la posible incorrecta aplicación de un enfoque en un área determinada.

El NRC (1993) enumera tres reglas que deben reconocerse para cada evaluación de vulnerabilidad del agua subterránea:

- 1) La mayor parte del agua subterránea es vulnerable en cierto grado;
- 2) La incertidumbre es inherente a todas las evaluaciones de vulnerabilidad; y
- 3) Existe el riesgo de que lo obvio se oscurezca y lo sutil se vuelva indistinguible.

### **9.1.3 Análisis de métodos**

Se han desarrollado varios enfoques o métodos para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas que van desde modelos sofisticados de los procesos físicos, químicos y biológicos, hasta modelos que sopesan los factores críticos que afectan la vulnerabilidad a través de métodos estadísticos o el juicio de expertos. Los métodos se pueden clasificar en tres clases principales (NRC, 1993):

- 1) métodos de superposición e índice que combinan características físicas específicas que afectan la vulnerabilidad, a menudo dando una puntuación numérica,
- 2) métodos basados en procesos que consisten en modelos matemáticos que utilizan ecuaciones que aproximan el comportamiento de las sustancias en el ambiente subterráneo
- 3) métodos estadísticos que establecen asociaciones con áreas donde se sabe que ha ocurrido la contaminación.

En general, los métodos más complejos y detallados requieren un conocimiento más complejo y detallado del sistema que se está evaluando. Los métodos más simples incorporan más aproximaciones y son menos precisos, pero requieren información menos detallada sobre el sistema que se está evaluando. Aunque los métodos complejos pueden describir los mecanismos de transporte con mayor precisión, los datos requeridos a menudo no están disponibles y deben aproximarse a partir de información limitada existente.

Lindström (1997) dividió los métodos en las siguientes clases de evaluación:

- 1) empírica
- 2) determinista
- 3) combinada empírica y determinista
- 4) probabilística
- 5) estocástica

Con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la implementación de algunos de estos métodos se vuelve mucho más fácil, ya que puede actuar en un entorno informático para ejecutar algunos tipos de evaluaciones y para mostrar los resultados de prácticamente todos los tipos de evaluaciones. Los métodos de superposición e índice ahora se realizan de forma rutinaria dentro de un entorno SIG. El SIG también permite evaluaciones rápidas y ajustes de los resultados, así como la integración de los resultados de otros métodos/evaluaciones para fines de calibración y validación.

La elección del modelo o enfoque a utilizar dependerá de (McMahon et al., 2001):

- Objetivos del estudio
- Nivel de precisión requerido (dependiendo de qué tan cerca esté la situación de sus umbrales de acción y la sensibilidad del receptor)
- Etapa de evaluación
- Escala de tiempo del proyecto en relación con el riesgo potencial para un receptor identificado
- Costo de construir el modelo y el costo involucrado en obtener conocimiento adicional o confianza en el comportamiento del sistema para validar/calibrar el modelo.

Las evaluaciones de vulnerabilidad siempre estarán sujetas a incertidumbres debido a:

- Falta de datos
- Errores en los datos utilizados
- Comprensión incompleta de los procesos ambientales
- Errores en la agregación de información
- Errores inherentes a las medidas estadísticas de asociación
- La inclusión o exclusión de variables en la mayoría de los enfoques a menudo es arbitraria y se basa en la opinión de expertos en cuanto a la ponderación entre los factores
- Los índices generalmente no se basan en observaciones o mediciones de la contaminación del agua subterránea e incluso cuando se utilizan modelos con base física, a menudo son propensos a errores en los supuestos del modelo o en la selección de los parámetros de entrada
- Los enfoques o modelos rara vez se validan o prueban con datos de observación
- Velocidad y solidez de las soluciones numéricas
- Falta de comprensión de los procesos de flujo preferencial
- Variabilidad espacial
- Los flujos deben ser bien investigados. Si la dirección del movimiento o flujo de agua no puede predecirse con precisión, la probabilidad de predecir con precisión las tasas o patrones de movimiento de contaminantes disminuye.

Algunas de las incertidumbres o errores se pueden medir, mientras que otras no. Solo los métodos estadísticos permiten el cálculo del grado de incertidumbre, mientras que los métodos de superposición e índice no incluyen ninguna medida de incertidumbre.

### **Métodos de superposición e índice**

Los métodos de superposición e índice se basan en la combinación de mapas de varios atributos fisiográficos (por ejemplo, geología, suelos, profundidad al nivel freático) de la región mediante la asignación de un índice numérico o puntaje a cada



atributo. Estas aplicaciones relativamente simples asignan un índice numérico o calificación a los atributos mapeados fisiográficos y antropogénicos de una región. Las calificaciones se combinan para generar una calificación compuesta de sensibilidad / vulnerabilidad. Las calificaciones se pueden considerar igualmente o ponderadas de acuerdo con la magnitud relativa de su influencia en la determinación general de la evaluación. El método de superposición e índice más popular utilizado en todo el mundo es el método DRASTIC, desarrollado por Aller et al. (1987), para evaluaciones de vulnerabilidad a escalas regionales. El enfoque DRASTIC ha llevado al desarrollo de otros métodos usando un enfoque similar, pero con diferentes parámetros de entrada. En el caso más simple de estos métodos a todos los atributos se les asignan pesos iguales, sin juzgar su importancia relativa. Existen otros métodos de superposición e índice que intentan ser más cuantitativos mediante la asignación de diferentes puntuaciones numéricas y ponderaciones a los atributos en el desarrollo de un rango de clases de vulnerabilidad, que luego se muestran en un mapa (NRC, 1993).

### **Métodos de simulación basados en procesos**

Los métodos de simulación basados en procesos requieren soluciones analíticas o numéricas para las ecuaciones matemáticas que representan los procesos acoplados que gobiernan el transporte de contaminantes. Los modelos basados en procesos para el flujo y el transporte de contaminantes en medios porosos generalmente se basan en la ecuación de Richards para flujo de agua saturado variable y la ecuación de advección –dispersión para el transporte de solutos. Los métodos en esta categoría son muchos y van desde índices basados en modelos de transporte simples hasta soluciones analíticas para el transporte unidimensional de contaminantes a través de la zona no saturada, hasta modelos acoplados, saturados no saturados, de fase múltiple, bidimensionales o tridimensionales.

Los modelos de simulación basados en procesos predicen cuánto tiempo tardará un contaminante en alcanzar una profundidad determinada y / o la cantidad de contaminante al modelar matemáticamente los procesos que influyen en el destino y transporte del contaminante. Es importante tener en cuenta que los modelos informáticos no calculan directamente la vulnerabilidad, aunque ésta se evalúa en función de lo que simula el modelo informático. La complejidad de los modelos puede variar desde simples índices de modelos de transporte hasta modelos del transporte de contaminantes multifásicos y multidimensionales a través de zonas saturadas y no saturadas.

### **Métodos estadísticos**

Los métodos estadísticos que tienen una concentración de contaminantes o una probabilidad de contaminación como variable dependiente forman la base de la tercera categoría de métodos de evaluación de la vulnerabilidad. Estos métodos incorporan datos sobre distribuciones de contaminantes en área conocidas y calculan la probabilidad de contaminación caracterizando el potencial de contaminación para el área geográfica específica utilizando datos de la distribución de contaminación conocida en el área. Los métodos requieren una buena base de datos regional

## Características de los métodos de evaluación de vulnerabilidad

Las tablas 9.3 a 9.5 enumeran las características relevantes de los métodos de evaluación de vulnerabilidad. El examen de las tablas revela algunas similitudes generales dentro de las amplias clases de métodos. Los métodos de superposición e índice tienden a aplicarse en escalas de mapas pequeños que cubren áreas de estudio grandes, típicamente mayores que 1: 50,000, mientras que la mayoría de los modelos basados en procesos se aplican a problemas en escalas de mapas mucho más grandes que cubren áreas de estudio más pequeñas (NRC, 1993). La mayoría de los métodos de superposición e índice y la mayoría de los métodos estadísticos se refieren a la zona saturada o al nivel freático como la ubicación de referencia. En contraste, la mayoría de los modelos basados en procesos tienen una ubicación de referencia flotante dependiendo de la medida en que se investiga la contaminación a través de la zona no saturada. Por ejemplo, la ubicación de referencia puede ser la parte inferior de la zona de raíces del cultivo para escenarios agrícolas. La mayoría de los métodos de superposición e índice están diseñados para evaluar la vulnerabilidad intrínseca o tienen una utilidad específica e intrínseca mixta, mientras que la mayoría de los modelos basados en procesos y métodos estadísticos están diseñados para clases específicas de contaminantes como pesticidas o nitratos. Los modelos más específicos para el destino de los compuestos orgánicos generalmente usan tres propiedades:

- 1) volatilización
- 2) coeficiente de adsorción del carbono orgánico del suelo
- 3) vida media

Se pueden adaptar modelos específicos para pesticidas y para otros compuestos orgánicos a los que se conocen las tres propiedades anteriores.

**Tabla 9.3 Métodos de superposición e índice utilizados para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación.**

Método	Escala	Referencia/ Ubicación	Característica	Disponibilidad/ Costo	Intrínseco/ Específico	Geoquímica	Referencia
DRASTIC	Variable	Agua subterránea		Auto programable	Intrínseco	Contaminante genérico	Aller et al. (1987)
AHP-DRASTIC	Variable	Agua subterránea	Matriz de comparación por pares; clasificación; suelo, zona no saturada	Auto programable	Intrínseco	Contaminante genérico	Saaty (1980)
GOD	Variable	Agua subterránea	Unidades litológicas	Auto programable	Intrínseco	Contaminante genérico	Foster and Hirata (1988)
AVI	Variable	Agua subterránea	Rocas fracturadas	Auto programable	Intrínseco	Contaminante genérico	Van Stempvoort et al. (1993)
SINTACS	Variable	Agua subterránea	Zona no saturada	Auto programable	Intrínseco	Contaminante genérico	Civita (1994)
EPIK	Variable	Agua subterránea	Zona no saturada, áreas cársticas	Auto programable	Intrínseco	Contaminante genérico	Doerfliger and Zwahlen (1997)

SEEPAGE	Variable	Agua subterránea		Auto programable	Intrínseco	Contaminante genérico	Moore (1988)
LeGrand	Pequeño	Agua subterránea	Clasificación	Intrínseco	Intrínseco	Contaminante genérico	LeGrand (1983)
Método Europeo		Agua subterránea	Áreas cársticas	Intrínseco	Intrínseco	Contaminante genérico	
WASP	Sitio Específico	Agua subterránea		Free - WRC	Intrínseco	Contaminante genérico	Parsons and Jolly (1994)

**Tabla 9.4 Modelos basados en procesos que se pueden usar para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación.**

Método	Escala	Referencia / Ubicación	Característica	Disponibilidad/ Costo	Intrínseco/ Específico	Geoquímica	Referencia
PESTAN	Regional	Suelo	Estado establecido; decaimiento; dispersión hidrodinámica	Gratis - <a href="http://www.epa.gov">www.epa.gov</a>	Específico	Pesticidas/solutos orgánicos disueltos	Enfield et al. (1982)
MOUSE	Regional	Agua Subterránea, nieve, agua superficial	Cuencas urbanas		Específico	Nutrientes	Steenhuis et al. (1987)
PRZM/ PRZM2	Regional	Suelo	Diferencias finitas; convección- no flujos aguas arriba; multicapas in zona no saturada	Comercial. EPA	Específico	Pesticidas	Carsel et al. (1985)
RF/AF	Variable	Suelo	Área homogénea		Específico		Rao et al. (1985)
GLEAMS	Regional	Suelo	1-D, erosión hidrología; erosión/sedimentación; flujo pistón	<a href="http://arsserv0.brc.tamus.edu/nrsu/glfmsfact.htm">http://arsserv0.brc.tamus.edu/nrsu/glfmsfact.htm</a>	Específico		Leonard et al. (1986)
CMLS/ CMLS94	Regional	Suelo	CMLS94 puede determinar la incertidumbre		Específico	Químicos orgánicos no polares	Nofziger and Hornsby (1986)
RITZ	Regional	Suelo	Decaimiento; volatilización, degradación; adsorción; flujo establecido, solo movimiento aguas abajo		Específico	Químicos peligrosos (aceites)	McLean et al. (1988)
BIOFT3D	Local	Suelo/agua subterránea	Elemento finito; 3D; medio poroso; 3-fases de flujo; porosidad dual		Específico	NAPL;	Draper Aden Environmental Modeling Inc. <a href="mailto:daem.info@daem.com">daem.info@daem.com</a>
SESOIL	Local	Zona no saturada; suelo	Volatilización, adsorción; intercambio catiónico; biodegradación,	Comercial	Específico		Bonazountas and Wagner (1981)

VLEACH	Variable	Suelo/agua subterránea	hidrólisis Estado establecido, adsorción del suelo; advección, adsorción, vapor-fase de difusión, 3 fases de equilibrio, decaimiento, 1D	Gratis	Específico	DOC	Ravi and Johnson (1993) EPA CSMoS
VS2DT	Puntual	Nivel freático	Intercambio iónico, 2D; suelo no uniforme, diferencias finitas	Comercial	Específico	Varios	USGS
MIKESHE	Variable	Agua subterránea/agua superficial	3D; advección-dispersión; decaimiento	Comercial	Específico		
PELMO	Sitio	Suelo	Mejora de PRZM; hidrología y transporte; evapotranspiración		Específico	Pesticidas	
HELP					Específico		Shroeder et al., (1984)
UGRPF	Variable	Nivel freático	Recarga urbana; flujo de contaminantes, empírico y analítico	Disponible	Específico	Inorgánicos, BTEX	Thomas (2001)
LEACHM	Regional	Suelo	Suite de modelos de simulación; diferencias finitas; 1D;	Disponible	Específico	Pesticidas, salinidad, trazadores, nitratos y fósforo	Hutson and Wagenet (1992)
LPI	Regional	Agua subterránea	Velocidad de poro; retardación del soluto, coeficiente de degradación de primer orden		Específico	Pesticidas, químicos no volátiles	Meeks and Dean (1990)
OPUS	Puntual	Suelo	Infiltración, escurrimiento, agua del suelo, fuentes no puntuales de contaminación, erosión, transporte		Específico	Pesticidas y nutrientes	Smith (1992)
RUSTIC	Regional	Agua subterránea			Específico e intrínseco		Dean et al. (1989)
UNSATCHEM	Puntual	Suelo/agua subterránea	Diferencias finitas	Gratis	Específico	Inorgánicos, pesticidas	
FAO-SWS	Puntual	Suelo	Diferencias finitas	Gratis	Específico	Inorgánicos mayores en suelos	Suarez et al., (2000)
HYDRUS1/2/ver5	Puntual	Suelo	Elemento finito 1D,	Gratis	Específico	Inorgánicos mayores en suelos, flujo	Vogel et al. (1996)

						de calor	
CHEMFL O	Puntual	Suelo no saturado	Diferencias finitas; ecuación convección-dispersión 1D,	www.epa.gov	Específico	Química	Nofziger et al.
VIRTUS	Puntual	Suelo	Diferencias finitas; 1D; virus adsorción, y degradación; estado transitorio		Específico	Virus	wrussell@ussl.ars.usda.gov
SWAP v. 2.0	Puntual	Suelo	Flujos de agua, calor y solutos; drenaje profundo, y lixiviado, flujo preferencial.	Disponible	Específico	Contaminantes genéricos	Van Dam et al. (1997)
SWIM v. 1.0, v. 2.0	Puntual	Suelo	Flujos de agua y solutos drenaje profundo y lixiviados	USD 545	Específico	Contaminantes genéricos	Ross et al. (1990)
MACRO	Puntual	Matriz del suelo	Ecuación de onda cinemática; flujo en macroporos	Soil Science Dept. Swedish Univ. of Agricultural Sciences	Específico	Pesticidas, contaminantes solubles, coloides	Jarvis et al. (1999)

**Tabla 9.5 Métodos combinados y estadísticos utilizados para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación.**

Método	Escala	Referencia / Ubicación	Característica	Disponibilidad / Costo	Intrínseco / Específico	Geoquímica	Referencia
Modelos basados en procesos empíricos combinados							
DRASTIC-CLMS	Regional					Pesticidas	Ehteshami et al., (1991)
DRASTIC-PRZM	Regional					Pesticidas	Banton and Villeneuve (1989)
Métodos estadísticos							
Análisis de discriminantes	Variabile	Agua subterránea			Específico	Pesticidas	Teso et al. (1988)
Análisis de Regresión	Pequeño	Agua subterránea			Específico		Chen and Druliner (1988)

## **DRASTIC**

El método DRASTIC fue desarrollado por el personal de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. USEPA (Aller et al., 1987). Permite evaluar la vulnerabilidad intrínseca de la contaminación vertical del acuífero causada por sistemas paramétricos. Se basa en la estimación de 7 parámetros en particular, el porcentaje de la recarga efectiva, el tipo de suelo y las características de las zonas saturadas y no saturadas del acuífero de las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC: D (depth - profundidad del agua freática) R (recharge - recarga neta) A (acuífero - litología del acuífero) S (soil - tipo de suelo) T (topography - topografía) I (impact - litología de la sección subsaturada) C (hydraulic conductivity - conductividad hidráulica del acuífero). Cada parámetro, dividido en un intervalo de valores significativos, se asigna mediante una calificación numérica en función de su creciente importancia en la vulnerabilidad. Estos siete parámetros se utilizan para definir las diferentes unidades hidrogeológicas, influenciadas de diversas maneras por los procesos de transporte y la atenuación de contaminantes en el suelo.

El valor numérico llamado parámetro de peso, se asigna entre 1 y 5 a cada parámetro y refleja su grado de influencia (por ejemplo, (5) para la profundidad del agua (D) y la litología de la sección no saturada (I) y el menor (1) para la topografía (T)). Cada parámetro se enumera en función de los puntajes asociados que van del 1 al 10, el puntaje más bajo representa las condiciones de la contaminación de menor vulnerabilidad (Tabla 9.6):

**Tabla 9.6 Ejemplo de valores para la estimación del Índice DRASTIC.**

<b>D.- PROFUNDIDAD DEL ACUÍFERO</b>	
RANGO (m)	VALOR
< 1.5	10
1.5-5.0	9
5.0-10.0	7
10.0-20.0	5
20.0-30.0	2
> 30.0	1

<b>R.- RECARGA NETA</b>	
RANGO (mm)	VALOR
0-50	1
50-100	3
100-180	6
180-255	8
>255	9

<b>A.- NATURALEZA DEL ACUÍFERO</b>		
DESCRIPCIÓN	RANGO (m)	VALOR
a) Arcillas, limos, margas	1-3	2
b) Rocas ígneas, metamórficas	2-5	3
c) Rocas ígneas, metamórficas alteradas	3-5	4
d) Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	5-9	6
e) Areniscas masivas	4-9	6
f) Calizas masivas	4-9	6
g) Arenas, gravas y conglomerados	4-9	8
h) Volcánico	2-10	9
i) Calizas carstificadas.	9-10	10

<b>S.- NATURALEZA DEL SUELO</b>	
TIPO DE SUELO	VALOR
Arcilla No expansiva y agregada	1
Suelo orgánico	2
Marga arcillosa	3
Marga limosa	4
Marga	5
Marga arenosa	6
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Turba	8
Arena	9
Grava	10
Delgada o ausente	10

<b>T.- TOPOGRAFÍA</b>	
RANGO (%)	VALOR
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1

<b>I.- IMPACTO DE LA ZONA VADOSA</b>		
DESCRIPCIÓN	RANGO (m)	VALOR
Arcilla, limo, marga	1-2	1
Esquitos, pizarras	2-5	3
Calizas	2-7	6
Areniscos	4-8	6
Alternancias: calizas, areniscos y arcillas	4-8	6
Arenas y gravas arcillosas	4-8	6
Rocas: ígneas, metamórficas	2-8	4
Arenas, gravas	6-9	8
Volcánica	2-10	9
Calizas carstificadas	8-10	10

<b>C.- PERMEABILIDAD</b>	
RANGO (m/día)	VALOR
< 4	1
4-12	2
12-28	4
28-40	6
40-80	8
> 80	10

Para describir el grado de vulnerabilidad de cada unidad hidrogeológica, se determina el valor numérico llamado índice de vulnerabilidad DRÁSTIC, el cual se calcula mediante la adición de los diferentes productos (puntaje × peso del parámetro correspondiente):

$$\text{Índice DRASTIC} = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r$$

Donde: D, R, A, S, T, I y C son los siete parámetros y los subíndices r y w son la calificación y los pesos correspondientes, respectivamente. El índice parcial de cada parámetro se calcula utilizando la ecuación:

$$\text{Índice parcial} = \text{peso} \times \text{calificación}$$

Por lo tanto, el índice DRASTIC se define por las puntuaciones de todos los parámetros de vulnerabilidad multiplicados por sus respectivos pesos. Los parámetros de peso DRASTIC, definidos de acuerdo con Aller et al (1987), se muestran en la Tabla 9.7:

**Tabla 9.7 Ajustes de pesos de DRASTIC.**

Símbolo	Parámetro	Peso
D	Profundidad al nivel freático	5
R	Recarga efectiva	4
A	Medio acuífero	3
S	Tipo de suelo	2
T	Topografía	1
I	Impacto de la zona vadosa	5
C	Conductividad hidráulica	3

Fuente: Aller et al., 1987.

El grado de vulnerabilidad del acuífero hidrogeológico está definido por los índices DRÁSTICOS. Estos índices se dividen en cuatro clases y varían entre los valores extremos que van de 23 a 226 (Engel et al., 1996), (Tabla 9.8):

**Tabla 9.8 Criterio de vulnerabilidad determinado mediante el método DRASTIC.**

Vulnerabilidad	Baja	Promedio	Alta	Muy alta
índice	< 101	101-140	141-200	> 200

Fuente: Engel et al., 1996.



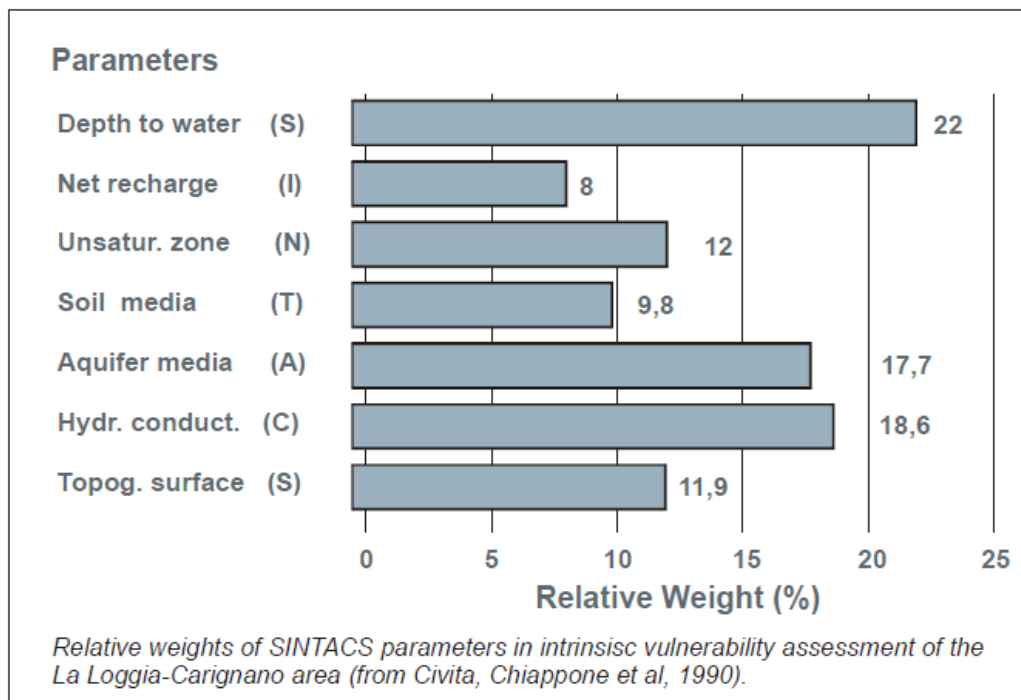
DRASTIC también considera la incidencia de las actividades agrícolas, en particular de los pesticidas. Tanto este como el resto de los métodos que aquí se mencionan, califican a la vulnerabilidad en forma cualitativa y su mayor utilidad es que permiten realizar comparaciones relativas dentro de una misma región, o entre regiones distintas.

## SINTACS

Es una derivación del DRASTIC, desarrollado por CIVITA et al (1990) para adecuarlo a las diversificadas características hidrogeológicas de Italia y al requerimiento de un mapeo de mayor detalle. El acrónimo SINTACS comprende: S (soggiacenza - profundidad del agua) I (infiltrazione - infiltración) N (non saturo - sección subsaturada) T (tipologia della copertura - tipo de suelo) A (acquifero - características hidrogeológicas del acuífero) C (conducibilità - conductividad hidráulica) S (superficie topografica - pendiente topográfica).

Este método presenta una estructura compleja, tanto para la entrada de datos como para la salida, por lo que su operación se realiza mediante un programa de cómputo. A las variables mencionadas, que influyen en la vulnerabilidad intrínseca, se les puede añadir la incidencia del agua superficial y el uso de la tierra.

En la Figura 9.2 tomada de VRBA y ZAPOROZEC (1994), se indican los pesos relativos en % de las variables intrínsecas adoptadas para la región de La Loggia - Carignano y, como puede observarse, la de mayor incidencia respecto a la vulnerabilidad es S la profundidad de la superficie freática (22) y la menor I la recarga neta (8).



**Figura 9.2 Pesos Relativos.**

## GOD

Este método se caracteriza por una evaluación rápida de la vulnerabilidad del acuífero por la contaminación; Fue desarrollado por Foster (1987) y Ferreira (2004) para estudiar la vulnerabilidad del acuífero frente a la filtración vertical de contaminantes a través de la zona no saturada, sin considerar su migración lateral en la zona saturada.

El enfoque utilizado en este modelo se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a 3 variables que son las que nominan el acrónimo:

- 1) Presencia de agua subterránea (G)
- 2) Clase general de acuífero (O)
- 3) Profundidad al nivel freático (D)

El índice GOD se calcula mediante la multiplicación de la influencia de los tres parámetros usando la siguiente ecuación:

$$\text{Índice GOD} = Cl \times Ca \times Cd$$

Donde:

- Ca tipo de acuífero
- Cl litología de la zona no saturada
- Cd profundidad a la superficie del agua

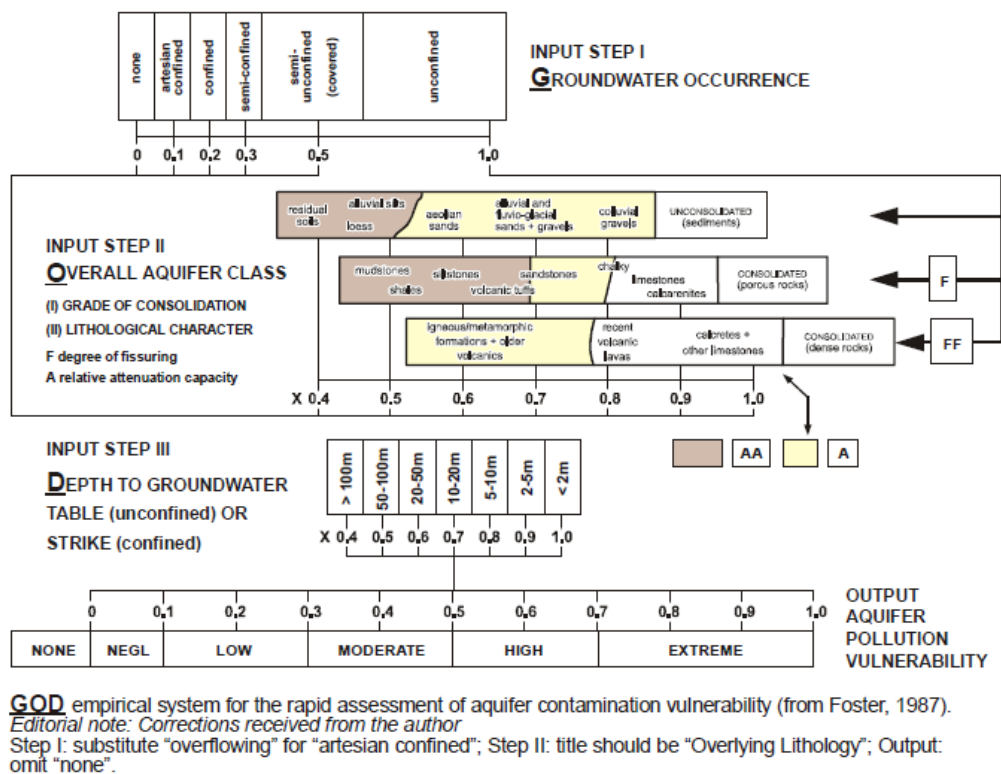
El índice GOD puede variar entre 0 y 1 y se dividen en cinco clases (Tabla 9.9).

**Tabla 9.9 Criterio de vulnerabilidad determinado mediante el método DRASTIC.**

Vulnerabilidad	Muy baja	Baja	Promedio	Alta	Muy alta
índice	0.0 - 0.1	0.1 - 0.3	0.3 - 0.5	0.5 - 0.7	0.7 - 1.0

Fuente: Murat al., 2003.

En la Figura 9.3 (FOSTER y HIRATA, 1991) se reproduce el diagrama para cualificar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación.



**Figura 9.3 Figura 3 - Vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación mediante el método GOD.**

### Método SI

El método SI (Índice de Susceptibilidad) fue desarrollado en 2000 en Portugal por Ribeiro; Se utiliza para evaluar la vulnerabilidad de la contaminación agrícola vertical generada principalmente por nitratos y secundariamente por pesticidas. Este método se basa en cinco parámetros: los primeros cuatro (D: profundidad del agua, R: recarga efectiva, A: acuífero medio, T: pendiente topográfica de la tierra) son idénticos a los utilizados en el método DRÁSTIC. El quinto parámetro (LU) representa Land. Las dimensiones de cinco parámetros y sus clases individuales correspondientes se dan en la Tabla 9.10.

**Tabla 9.10 Parámetros del método SI y su peso correspondiente.**

Símbolo	Parámetro	Peso
D	Profundidad al nivel freático	0.186
R	Recarga efectiva	0.212
A	Medio acuífero	0.259
T	Topografía	0.121
LU	Uso del suelo	0.222

Las tierras se clasifican de acuerdo con la Comunidad Europea (1993). Cada clase de tierra se asigna por un factor de uso de la tierra (LU) que varía de 0 a 100 (Tabla 9.11). Los valores asignados a los parámetros de las diferentes clases se han multiplicado por 10 para facilitar los resultados de lectura, van desde menos vulnerable a los más vulnerables. Los pesos asignados a los parámetros del SI varían de 0 a 1 dependiendo del tamaño del parámetro en vulnerabilidad. Según sus valores de índice, el método SI tiene cuatro grados de vulnerabilidad (Tabla 9.12).

**Tabla 9.11 Principales clases de ocupación del suelo y sus correspondientes valores de uso del suelo (LU).**

Clasificación del suelo	Factor de uso del suelo
Descargas industriales, tiraderos de basura	100
Campos de riego de arroz	90
Caries, astilleros, minas al aire libre	80
Áreas cubiertas artificiales, espacios verdes	75
Cultivos permanentes (viñedos, huertos, olivos, etc.)	70
Áreas urbanas discontinuas	70
Pastos y agrosilvicultura	50
Ambientes acuáticos (marismas, salinas, etc.)	50
Bosques y zonas seminaturales	0

**Tabla 9.12 Criterios para la evaluación de la vulnerabilidad en el método SI.**

Vulnerabilidad	Baja	Promedio	Alta	Muy alta
índice	< 45	45 - 64	65 - 84	85 - 100

## EPIK

Es un método paramétrico desarrollado por DOERFLIGER y ZWAHLEN (1997) para acuíferos kársticos. El acrónimo significa: Epikarst (E), Protective cover (P), Infiltration conditions (I), Karst network development (K), que son 4 caracteres trascendentes en el flujo y el transporte a través de sistemas kársticos.

El Epikarst es una zona de intensa karstificación y elevada permeabilidad, cercana a la superficie (TRIPET et al, 1997), al que se le asignan 3 valores: E1 corresponde a la red kárstica típica (dolinas, depresiones, cavidades, grutas, etc.); E2 cuando hay superficies de debilidad en la zona matricial que generan alineamientos (valles secos, alineación de dolinas, etc.) y E3 ausencia de morfología epikárstica.

El Protective cover está formado por el suelo y otros materiales de cobertura como depósitos glaciales, loess, limos aluviales, derrubios de falda, etc. A este parámetro se le asignan 4 valores (de P1 a P4), en función del espesor de la cobertura.

El parámetro Infiltration (infiltración) es el de más complicada estimación.

- I1 se aplica a regiones con vías accesibles para la infiltración directa.
- I2 e I3 se emplean para zonas con pendientes topográficas entre 0 y 25%. Contrariamente a otros métodos paramétricos, en éste la vulnerabilidad aumenta con el incremento de la pendiente, que favorece la concentración de la escorrentía en los sitios más karstificados.

Al parámetro Karst network (red kárstica) se le asigna 3 valores:

- K1 para una red kárstica bien desarrollada.
- K2 para zonas pobremente karstificadas.
- K3 para acuíferos kársticos con descarga en medios porosos, o que presentan fisuración, pero subordinada.

El método incluye 4 factores de ponderación ( $\alpha$   $\beta$   $\gamma$   $\delta$ ), aplicables a cada parámetro (EPIK), para valorar su peso relativo en el cálculo del índice de vulnerabilidad intrínseca. Este índice de vulnerabilidad, denominado también factor de protección es:

$$V_i = (\alpha \cdot E_i) + (\beta \cdot P_i) + (\gamma \cdot I_i) + (\delta \cdot K_i)$$

Donde:

- $V_i$ : índice de vulnerabilidad en el área  $i$
- $E_i, P_i, I_i, K_i$ : valores relativos de los parámetros E, P, I, K
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ : factores de ponderación correspondientes a los parámetros EPIK.

Los valores relativos para los parámetros E, P, I y K son:

E1	E2	E3	P1	P2	P3	P4	I1	I2	I3	I4	K1	K2	K3
1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

A diferencia de la mayoría de los otros métodos, el EPIK brinda vulnerabilidades crecientes a medida que disminuyen los valores relativos de los parámetros considerados. Esto, pues el método apunta a definir el factor de protección para el agua subterránea, más que la vulnerabilidad.

Para los factores de ponderación DOERFLIGER y ZWAHLEM (1997) proponen:

$$\alpha = 3 \quad \beta = 1 \quad \gamma = 3 \quad \delta = 2$$

Considerando los valores relativos y los factores de ponderación, surge que el índice de vulnerabilidad o factor de protección de un acuífero en medio kárstico puede variar entre extremos de 9 (más vulnerable) y 34 (menos vulnerable). Los mismos autores recomiendan emplear las siguientes categorías:

- vulnerabilidad alta (9 – 19)
- vulnerabilidad media (20 – 25)
- vulnerabilidad baja (26 – 34) y muy baja cuando existe una cobertura de suelo detrítico, de por los menos 8 m de espesor, con baja conductividad hidráulica.

#### **9.1.4 Ventajas y desventajas**

Se analizan sintéticamente las ventajas y desventajas de los métodos descritos.

DRASTIC es más robusto que GOD, dado que emplea mayor cantidad de variables (7), pero esto puede transformarse en un inconveniente, cuando no se dispone de los valores de algunas de ellas. También se le critica a DRASTIC la reiteración en el alcance de algunos parámetros como R y C, ambos vinculados a la renovación de agua en el acuífero, y la poca incidencia que tienen otros respecto a la vulnerabilidad como S (suelo).

SINTACS es una derivación de DRASTIC, por lo que presenta las mismas ventajas y desventajas que este, con el agregado de que para su operación se requiere el empleo del software correspondiente. Esto a su vez es de utilidad dual; por un lado simplifica el input de nueva información (oscilación de la freática), lo que permite actualizar rápidamente la cartografía resultante, especialmente si se lo emplea dentro de un programa SIG. Por el otro, la falta del software limita el uso del método.

GOD posee como mayor ventaja, lo sencillo de su operación y el escaso número de parámetros requeridos para su empleo. Esto a su vez resulta en definiciones menos claras que DRASTIC y SINTACS. Otra falencia es no considerar la incidencia del suelo, que es un factor de gran trascendencia como filtro natural para la contaminación.

EPIK presenta como atributo favorable ser el único método desarrollado específicamente para acuíferos kársticos y como mayor desventaja la indefinición de algunos parámetros como K e I.

## 9.2 Introducción

El método DRASTIC es un modelo empírico desarrollado por Aller et al (1987) para Environmental Protection Agency, EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). El método DRASTIC es el más utilizado y suele ser muy útil cuando se quiere construir mapas de vulnerabilidad con datos de profundidad de agua, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, naturaleza de la zona no saturada y conductividad hidráulica.

Es un método usado tanto para la cualificación como para la cartografía y se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad), de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC que considera las variables: i) **D**: Profundidad del agua subterránea; ii) **R**: Recarga neta; iii) **A**: Litología del acuífero; iv) **S**: Tipo de suelo; v) **T**: Topografía; vi) **I**: Naturaleza de la zona no saturada y vii) **C**: Conductividad hidráulica del acuífero.

Dentro del concepto de obra lineal, superficial o enterrada, se puede englobar a un conjunto diverso de trazados como son las carreteras, canalizaciones, colectores, gasoductos, oleoductos, trasvases, túneles y vías férreas. Sus dimensiones, además de la propia obra, contemplan otras áreas asociadas, como son áreas de servidumbre, estructuras, movimiento de tierras, plantas de tratamiento o áreas de servicio. El impacto sobre el medio de estas obras se evalúa mediante los estudios de impacto ambiental, sin embargo la afección a las aguas subterráneas se suele tratar someramente.

El impacto a las aguas subterráneas puede ser físico y químico. En el primer caso se pueden producir efectos barrera, impermeabilización de zonas de recarga o modificación de los flujos, para el segundo se producirán cambios en la calidad del agua por la propia obra y por vertidos accidentales de productos potencialmente contaminantes.

## 9.3 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación es una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo (Foster, 1987). Es una propiedad relativa, no medible y adimensional y su evaluación se realiza admitiendo que es un proceso dinámico (cambiante con la actividad realizada) e iterativo (cambiante en función de las medidas protectoras). La vulnerabilidad puede ser intrínseca (condicionada por las características hidrogeológicas del terreno) y específica (cuando se consideran factores externos como la climatología o el propio contaminante).

El grado de vulnerabilidad puede expresarse mediante un índice. Los índices más utilizados son GOD y DRASTIC, que consideran las características físicas propias del marco hidrogeológico que afectan a la potencial contaminación del agua. Si se

establece como hipótesis de partida que el riesgo de los acuíferos frente a un determinado contaminante es equivalente a la vulnerabilidad de los mismos, estos índices se podrán utilizar para evaluar el riesgo, en este caso riesgo y vulnerabilidad están estrechamente relacionados.

El método DRASTIC (Aller et al., 1987) clasifica y pondera parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio y es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos. DRASTIC valora como parámetros: D (profundidad del nivel piezométrico), R (recarga), A (litología del acuífero), S (naturaleza del suelo), T (pendiente del terreno), I (naturaleza de la zona no saturada) y C (permeabilidad).

Una limitación de estos métodos es la subjetividad al valorar los parámetros, por ello para minimizar este grado de subjetividad, deben utilizarse criterios homogéneos.

En el caso del método DRASTIC la valoración de los parámetros permite acotar los intervalos de vulnerabilidad a la contaminación y delimitar áreas de mayor riesgo frente a un contaminante potencial a lo largo del trazado. El proceso de aplicación de este método a una superficie empieza por la compartimentación de ésta en celdas homogéneas de dimensiones fijadas, por definición la superficie mínima en aplicaciones de DRASTIC es de 0,4 km<sup>2</sup> (Aller, L., en CCE-MOPTMA, 1994), por ello trasladar esta limitación a una traza lineal resulta complejo.

Para la aplicación realizada al posible trazo lineal de la vía férrea del Tren Maya a través del acuífero Xpujil (figura 9.4 ), se ha considerado una celda de 58,186 m x 10 m (0,58 km<sup>2</sup>), 0.45 veces mayor que la superficie mínima, distribuida a lo largo de algún lado del trazado de la carretera Chetumal-Escárcega, cubriendo una franja de 10 m de ancho.





Figura 9.4 Trazo del Tren Maya en el acuífero Xpujil.

#### 9.4 Aplicación del método DRASTIC

Para aplicar este método debe asumirse que el posible contaminante tiene la misma movilidad en el medio que el agua, que se introduce por la superficie del terreno y se incorpora al agua subterránea mediante la recarga (lluvia y/o retorno de riego). Se aplica a acuíferos libres y confinados, pero no a los semiconfinados, que deben valorarse de manera que puedan adaptarse a uno de los tipos definidos.

A cada uno de los siete parámetros considerados por este método se les asigna un valor en función de los diferentes tipos y rangos definidos en la tabla 9.13. Además, al valor de cada parámetro se aplica un índice de ponderación entre 1-5 que cuantifica la importancia relativa entre ellos, y que puede modificarse en función del contaminante.

El índice de vulnerabilidad obtenido es el resultado de sumar los productos de los diferentes parámetros por su índice de ponderación:

$$DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw = \text{Índice de vulnerabilidad (Ec. 9.1)}$$

Siendo “r” el valor obtenido para cada parámetro y “w” el índice de ponderación.

El rango posible de valores del índice DRASTIC está comprendido entre 23-226 siendo más frecuentes valores entre 50-200. Los intervalos de vulnerabilidad o riesgo se definen en función de la aplicación. En el trabajo realizado en este estudio, se han establecido los siguientes grados:

**Tabla 9.13 Rango de valores del índice DRASTIC e intervalos de Vulnerabilidad.**

Rango de valores	Intervalos de vulnerabilidad
<100	Vulnerabilidad insignificante
101-119	Vulnerabilidad muy baja
120-139	Vulnerabilidad baja
140-159	Vulnerabilidad moderada
160-179	Vulnerabilidad alta
180-199	Vulnerabilidad muy alta
>200	Vulnerabilidad extrema

## 9.5 Metodología

En la aplicación de este método a una obra lineal se realiza:

- La representación de la obra en la figura 9.4.
- El análisis de la información disponible y generada en el presente estudio para la caracterización hidrogeológica del medio por el que discurre el trazado y establecer tramos.
- La valoración de los parámetros en gabinete, utilizando información existente, geológica e hidrogeológica.
- Reconocimiento de campo (inventario de aprovechamientos, observaciones litológicas, etc.).
- Cálculo del índice de vulnerabilidad aplicando los índices de ponderación (Tabla 9.14).

**Tabla 9.14 Índices de ponderación**

(D) PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO		(R) RECARGA NETA	
RANGO (m)	VALOR	RANGO(mm)	VALOR
< 1,5	10	0-50	1
1,5-5	9	50-100	3
5-10	7	100-180	6
10-20	5	180-255	8
20-30	2	> 255	9
>30	1		

(A) NATURALEZA DEL ACUÍFERO			(S) NATURALEZA DEL SUELO	
DESCRIPCIÓN	RANGO	VALOR	TIPO DE SUELO	VALOR
A-Arcillas, margas, limos	1-3	2	Arcilla no expansiva y agregada	1
B-Igneas/metamórficas	2-5	3	Suelo orgánico	2
C-Igneas/metamórficas alteradas	3-5	4	Marga arcillosa	3
D-Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	5-9	6	Marga limosa	4
E-Areniscas masivas	4-9	6	Marga	5
F-Calizas masivas	4-9	6	Marga arenosa	6
G-Arenas, gravas y conglomerados	4-9	8	Arcilla expansiva y/o agregada	7
H-Volcánicas	2-10	9	Turba	8
I-Calizas carstificadas	9-10	10	Arena	9
			Grava	10
			Delgado o ausente	10

(T) TOPOGRAFÍA		(C) PERMEABILIDAD	
RANGO %	VALOR	RANGO (m/día)	VALOR
0- 2	10	<4	1
2- 6	9	4-12	2
6-12	5	12-28	4
12-18	3	28-40	6
> 18	1	40-80	8
		>80	10

(I) IMPACTO DE LA ZONA NO SATURADA		
DESCRIPCIÓN	RANGO	VALOR
A-Arcilla, limo, margas	1-2	1
B-Esquistos, pizarras	2-5	3
C-Calizas	2-7	6
D-Areniscas	4-8	6
E-Alternancia de calizas, areniscas y arcillas	4-8	6
F-Arenas y gravas con contenido en arcilla	4-8	6
G-Metamórficas, ígneas	2-8	4
H-Arenas y gravas	6-9	8
I-Volcánicas	2-10	9
J-Calizas carstificadas	8-10	10

**Tabla 1.** Rangos y valores de los parámetros (modificado de Aller et Al., 1987 en CCE-MOPTMA, 1994).

PARÁMETROS	ÍNDICE DE PONDERACIÓN (w)
D - Profundidad del nivel de agua	5
R - Recarga	4
A - Naturaleza del acuífero	3
S - Tipo de suelo	2
T - Topografía	1
I - Impacto de la zona no saturada	5
C - Permeabilidad	3

**Tabla 9.15 Factores de ponderación del método DRASTIC.**

$D_w$	$R_w$	$A_w$	$S_w$	$T_w$	$I_w$	$C_w$
5	4	3	2	1	5	3

## 9.6 Valoración de los parámetros para la obra lineal del Tren Maya

La valoración de los parámetros involucrados se lleva a cabo mediante interpolaciones y/o estimaciones en las proximidades de la obra:

### 9.6.1 Parámetro D (profundidad al nivel estático)

Este parámetro considera la profundidad al nivel estático en la zona donde transitara el Tren Maya, en el acuífero Xpujil, considerado como del tipo libre y en donde la vulnerabilidad disminuye con la profundidad. De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático (figura 9.5), en la zona de la carretera Chetumal-Escárcega que cruza al acuífero Xpujil no se tienen pozos, por lo que extrapolando hacia los extremos del límite del acuífero, se estima fluctúa entre 90 y 50 m, teniendo un valor promedio de 70 m., De la tabla 9.1 índices de ponderación, el valor del parámetro D se clasifica en el rango mayor que 30, con un valor  $D_r$  de 1.

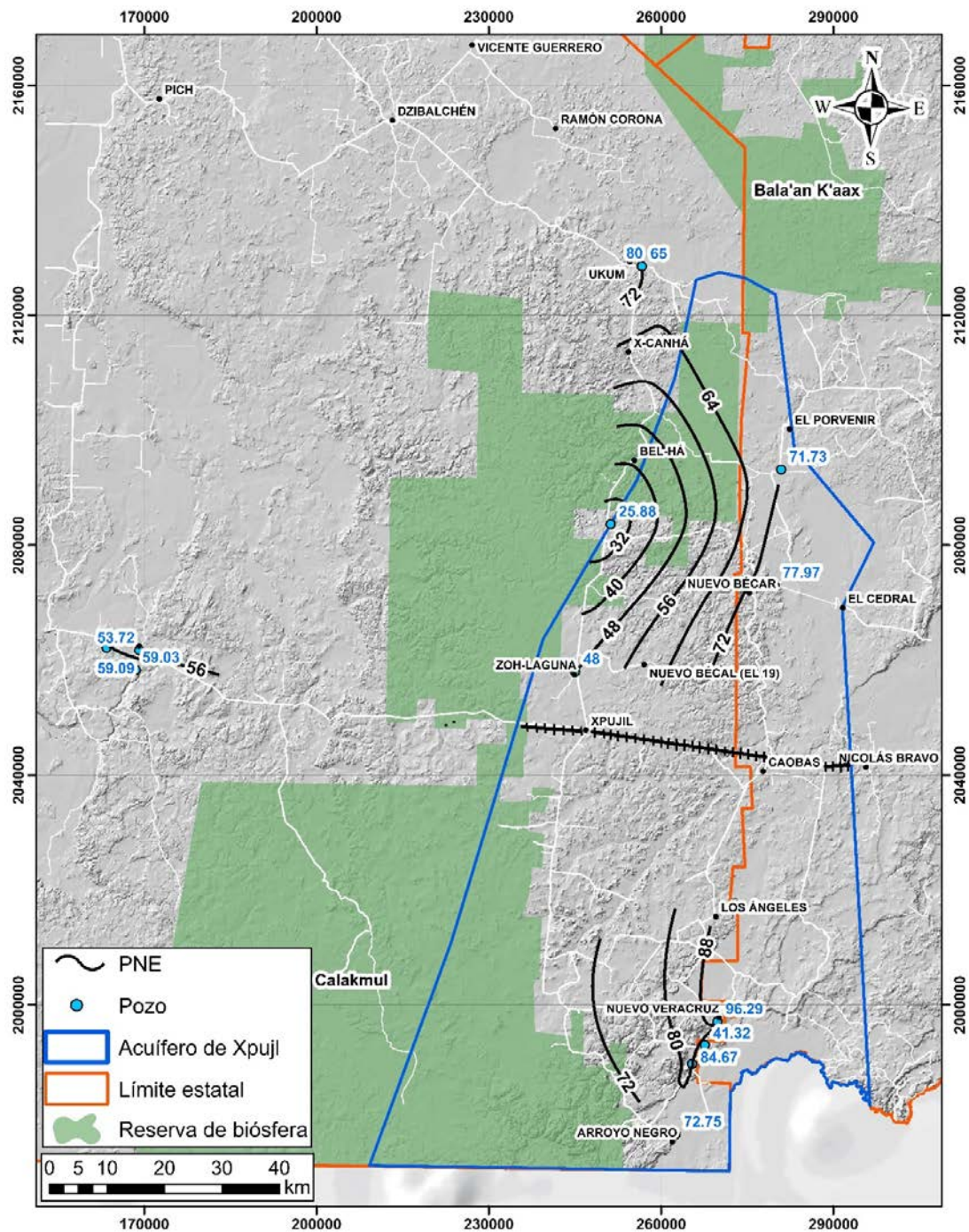
### 9.6.2 Parámetro R (recarga)

Entre más directa sea la recarga, más fácil es la renovación del agua subterránea y se tienen mayores posibilidades de diluir al agente contaminante, de manera que una recarga de zonas muy alejadas tardará mucho tiempo en manifestarse en la zona contaminada y en el caso extremo de que esta sea nula, quedan posibilidades para diluir o renovar, el impacto del agente contaminante.

En el caso de la península de Yucatán, la recarga proviene en su totalidad de la infiltración directa de la precipitación pluvial.

El volumen estimado de precipitación es de 14,044.02 M m<sup>3</sup>/año y la temperatura promedio es de 26°C, por lo que mediante la aplicación del método de Turk se tiene una evapotranspiración de 11,944.58 Mm<sup>3</sup>/año y un Volumen de Infiltración de 2,099.43 Mm<sup>3</sup>/año.

La recarga total media anual corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural, más la recarga inducida. . En este caso, es la suma de la recarga vertical y las entradas horizontales. De esta manera la Recarga Total en el acuífero Xpujil es de 2,099.4 Mm<sup>3</sup>/año (CONAGUA, 2015). De acuerdo con estos valores se tiene que el valor de la recarga es de 189.8 mm/año. De la tabla 9.1 índices de ponderación, el valor de la recarga se clasifica en el rango entre 180-255, con valor  $R_r$  de 8.



**Figura 9.5 Profundidad al nivel estático de mayo-junio de 2019 del acuífero Xpujil, Campeche.**

### **9.6.3 Parámetro A (litología del acuífero)**

Valora la litología que constituye el acuífero, considerándose que a mayor granulometría y fracturación, mayor permeabilidad y por tanto un grado de vulnerabilidad más elevado. Cuando existen varios acuíferos superpuestos siempre se valorará el superior.

Para su determinación se emplea la carta geológica del servicio geológico Mexicano, donde la Formación Icaiché (figura 9.3) mantiene un dominio sobre la superficie del acuífero de Xpujil, en general se presenta como lomeríos semiredondados, distribuidos irregularmente en una dirección NE-SO limitados por planicies. Estas secuencias de calizas sin deformación significativa son microcristalinas de textura mudstone, estratificadas y ocasionalmente de un aspecto masivo. Contiene raros fragmentos de sílice, así como cambios de facies limo-arcillosos, con depósitos de yesos y en ciertas partes nódulos de pedernal negro. Las estructuras principales en esta unidad son mayormente poljes y en menor proporción dolinas, estos rasgos cársticos fueron probablemente ocasionados por la actividad geotectónica del Neógeno. La Formación Icaiché es un acuífero regional de tipo libre (figura 9.5), la intensa carstificación presente propicia zonas de gran permeabilidad, la alta solubilidad de su matriz ha desarrollado fracturas y canales de disolución, siendo entonces, un acuífero cárstico maduro, por donde los flujos subterráneos circulan preferentemente. También, cubriendo indistintamente a las unidades mencionadas se encuentran depósitos no consolidados de aluvión, el cuál es principalmente constituido por limos y arcillas aflorando con mayor abundancia en la porción suroeste del área de estudio, estas adoptan una morfología de acuerdo a las rocas subyacentes, sin embargo, estas ocasionalmente muestran inundaciones temporales. De la tabla 9.14 índices de ponderación, el valor del parámetro A correspondiente a calizas carstificadas se clasifica en el rango entre 9-10, con valor Ar de 10.

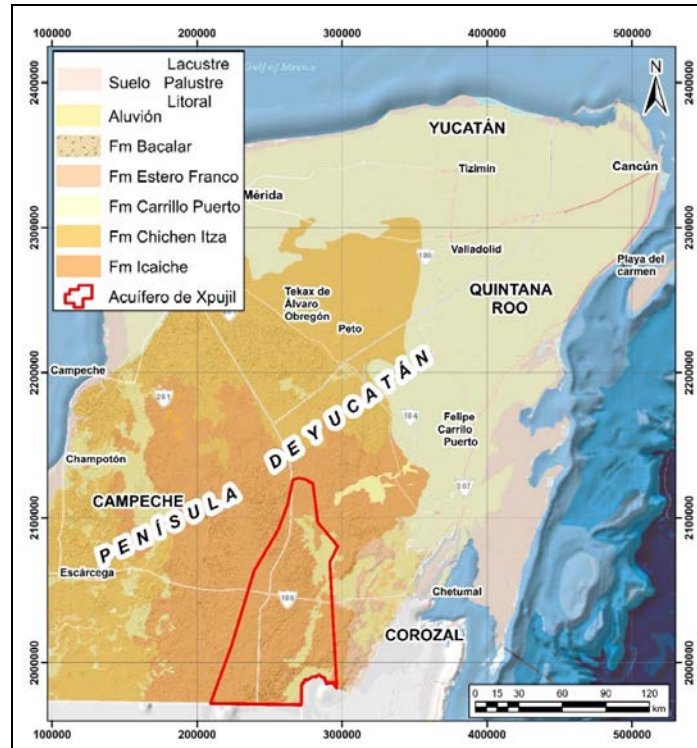


Figura 9.6 Mapa geológico de la Península de Yucatán, (cartografía tomada del SGM).

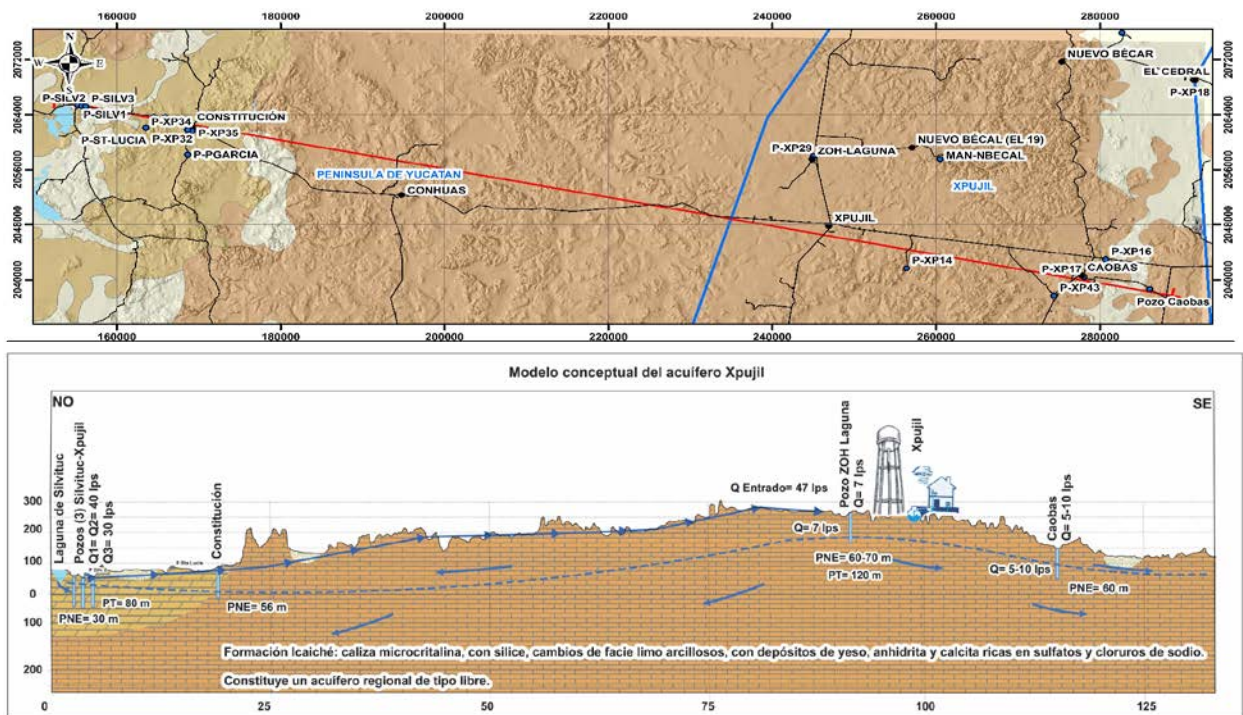


Figura 9.7 Modelo conceptual del acuífero Xpujil, Campeche.



#### **9.6.4 Parámetro S (naturaleza del suelo)**

El suelo influye en el desplazamiento vertical del contaminante hacia el acuífero. Para este parámetro se considera la porción alterada del suelo que soporta la actividad biológica.

Este parámetro se valorará de forma distinta si la obra es superficial o enterrada, ya que para el segundo caso, y dependiendo de la profundidad a la que se halle, se debe considerar suelo delgado o ausente, ya que queda excluido todo efecto de atenuación de la vulnerabilidad por parte de éste. La naturaleza del suelo en las obras lineales puede obtenerse de las calicatas realizadas en los levantamientos geotécnicos, de la cartografía geológica o de la bibliografía existente.

En la zona de interés existen suelos (Holoceno), cubriendo indistintamente o parcialmente a todas de las unidades litológicas ya mencionadas y estos se encuentran como depósitos aluviales constituidos esencialmente por limos y arcillas; depósitos lacustres constituidos principalmente por una gran cantidad de restos vegetales mezclados con limos y arcillas; y por depósitos palustres los cuales son formados por arcillas y limos con gran aporte de materia orgánica, en una mezcla con tallos y raíces. De la tabla 9.1 índices de ponderación, el valor del parámetro S clasificado como un tipo de suelo delgado o ausente, le corresponde un valor  $S_r$  de 10.

#### **9.6.5 Parámetro T (topografía, % de pendiente máxima)**

En las obras lineales se realizan cartografías de detalle, con el correspondiente levantamiento topográfico, que pueden emplearse para la estimación de las pendientes correspondientes.

La topografía de la zona tiene una tendencia a formar franjas alineadas sensiblemente orientadas al noroeste-sureste las que caracterizan la zona poniente del área y franjas alineadas en dirección noreste-suroeste que se presentan en la porción oriental.

La geomorfología del acuífero de Xpujil queda comprendido como parte de la provincia geomorfológica de “Colinas y Valles”, la cual presenta un relieve con mayores estructuras cársticas subterráneas, superficiales y domos asociados al desarrollo de suelos limo-arcillosos encontradas en estructuras de tipo poljes. Es característica por la ausencia de cenotes y dolinas. Por otra parte, Lugo-Hubp et al., (1992), de acuerdo a la morfología superficial de la Península y de la altitud media del mar elaboró un mapa morfológico, donde argumenta que las porciones de menor altitud y planares son de edades relativamente más jóvenes, mientras que las de mayor contraste de altitud corresponden a las antiguas.

Dentro de este mapa, el acuífero de Xpujil quedaría comprendido en las regiones denominadas “planicies de lomeríos” y “lomeríos”. La primera consiste de crestas paralelas, de 100 hasta 200 m de altitud como máximo, separadas por un valle. Las

formas cársticas están limitadas a numerosas cavernas. Son comunes las cuevas de desarrollo horizontal, y las entradas se han formado por el colapso de sus galerías. Por otra parte, los lomeríos están constituidos por numerosas colinas redondeadas, de 100 a 300 m de altura y valles rellenos de hasta 5 km de ancho. Las formas cársticas comunes son poljes, producidos por la disolución sobre un plano de falla (Lugo-Hubp et al., 1992). De la tabla 9.1 índices de ponderación, considerando que la topografía del terreno por donde transita la carretera Chetumal-Escarcega tiene un valor entre el rango de 6-12, le corresponde un valor de Tr de 5.

### **9.6.6 Parámetro I (zona no saturada)**

La zona no saturada influye en los procesos de atenuación en la trayectoria del agua hacia la zona saturada.

El acuífero Xpujil es considerado como un acuífero del tipo libre constituido por rocas calizas de la Formación Icaiché, las cuales se encuentran karstificadas. El espesor de la zona no saturada en la zona de interés por donde transitará el Tren maya es de aproximadamente 70 m (figura 9.4). De la tabla 9.1 índices de ponderación, el valor I de la zona no saturada está constituido mayormente por calizas karstificadas, con valor Ir de 10.

### **9.6.7 Parámetro C (permeabilidad)**

La valoración de este parámetro es compleja si no se dispone de ensayos de bombeo que hayan determinado parámetros hidráulicos, por ello se pueden emplear los valores teóricos relativos estimados para las diferentes litologías, estableciendo rangos en función de la propia litología, número de captaciones existentes, caudal explotado y otras observaciones realizadas en el campo.

Los resultados de las pruebas de bombeo y recuperación realizados en cinco pozos del acuífero Xpujil reportan los valores de conductividad hidráulica que fluctúan entre  $7.05 \times 10^{-2}$  m/seg y  $8.16 \times 10^{-4}$  m/seg, y que de acuerdo con la literatura especializada (Freeze & Cherry, 1979), la clasificación de estos valores de acuerdo con el modelo conceptual corresponden a rocas calizas kársticas.

Los resultados de la conductividad hidráulica son representativos, ya que los pozos están perforados en la Formación Icaiché, la cual se encuentra formada por calizas compactas de micro a macro cristalinas, generalmente dolomitizadas, a veces silicificadas o bien simplemente recristalizadas. Los valores de conductividad hidráulica en m/día fluctúan entre 70.50 y 6,091 m/día. Considerando un valor promedio de la conductividad hidráulica calculada mediante las pruebas de bombeo, se considera 35 m/día que de la tabla 9.1 índices de ponderación, le corresponde un valor Cr de 6.

## 9.7 Resultados de la evaluación de la Vulnerabilidad

Con la aplicación del método DRASTIC (Aller et al., 1987), que es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos, ya que clasifica y pondera los parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio como: la profundidad al nivel estático y/o piezométrico (D), la recarga (R), la litología del acuífero (A), la naturaleza del suelo (S), la pendiente del terreno (T), naturaleza de la zona no saturada (I) y la conductividad hidráulica (C). dadas las condiciones del acuífero Xpujil, se asignaron los valores determinados a cada uno de los siete parámetros en la ecuación 9.1, así como los índices de ponderación, se procede a calcular el índice de vulnerabilidad sumando los productos de los diferentes parámetros por su índice de ponderación (tabla 9.4):

**Tabla 9.16 Valor de los parámetros, índice de ponderación y valor del índice de vulnerabilidad obtenido mediante el método DRASTIC.**

D		R		A		S		T		I		C		Índice vulnerabilidad
Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	
1	5	8	4	10	3	10	2	5	1	10	5	8	3	166

En esta aplicación se ha determinado un valor del índice de vulnerabilidad de 166 que de acuerdo con el método DRASTIC corresponde a una “Vulnerabilidad alta”.

La aplicación del método DRASTIC es una aproximación al riesgo de afectación al acuífero de Xpujil por la obra lineal de la vía férrea del Tren Maya, obtenida a partir de la estimación de su vulnerabilidad mediante métodos paramétricos, como es el DRASTIC, por considerar que la afectación vendrá dada por un determinado tipo de actividad y que el riesgo dependerá del grado de protección (vulnerabilidad) del medio.

La valoración de los parámetros empleados se realizó con toda la información disponible y los conocimientos hidrogeológicos adquiridos del medio durante el estudio hidrogeológico llevado a cabo este año, teniendo en cuenta que la vulnerabilidad es un proceso dinámico e iterativo estrechamente relacionado con la actividad susceptible de producir una afectación y el riesgo dependerá de la propia acción y de las medidas preventivas a tomar.

En este caso la obtención de índices se ha realizado para toda la longitud de la vía a través del acuífero Xpujil (58,186 m x 10 m) y se han definido siete categorías que se identifican como categorías de vulnerabilidad insignificante, muy baja, baja, moderada, alta, muy alta y extrema.

Aunque la estimación de la vulnerabilidad mediante índices es un método más o menos objetivo, la atribución de valores dentro de unos rangos está condicionada por

la subjetividad del técnico hidrogeólogo que realiza su estimación y de su conocimiento del medio.

Esta aplicación del método DRASTIC se propone como metodología para la caracterización hidrogeológica y estimación de la vulnerabilidad de acuíferos a lo largo del trazado de obras lineales a tener en cuenta en los estudios de impacto ambiental.

## **10 ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS E ISOTÓPICOS Y ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS EXISTENTES Y PROTOTIPO**

### **10.1 Colecta de muestras de agua subterránea**

La toma de muestras de agua se realizó bajo condiciones de recolección, que permitieron asegurar la representatividad fisicoquímica y composición de la isotopía del agua (isótopos estables de H y O y contenido de tritio ambiental), bajo las condiciones a las que está sometida en el medio físico. Especialmente, evitando el contacto del agua con la atmósfera, lo cual ocasiona la recombinación de iones, precipitación de minerales, aumento del pH y cambios en el potencial redox, debido al escape hacia la fase gaseosa de componentes disueltos en el agua, como dióxido de carbono y en algunos casos de ácido sulfhídrico (Hutton, L.G., 1983). Lo cual puede generar resultados analíticos alterados de las muestras analizadas y, por lo tanto, orientar la interpretación hidrogeoquímica de manera incorrecta (Claassen, 1982).

El muestreo comprendió la recolección de volúmenes convenientes de agua para análisis de metales y metaloides, aniones, isótopos estables de hidrógeno y oxígeno, contenido de tritio ambiental y alcalinidad total por la técnica de Gran, en aprovechamientos de agua subterránea localizados en la zona del acuífero Xpujil, estado de Campeche. La localización de los pozos muestreados con determinación de parámetros de campo se ilustra en la Tabla 10.1. Estos aprovechamientos se seleccionaron sobre la base del análisis conjunto de toda la información disponible y generada.

El total de sitios muestreados con medición de parámetros de campo comprendió 10 aprovechamientos: 7 pozos de abastecimiento público, 2 pozos de uso agrícola, y un manantial. Los aprovechamientos son identificados en los anexos I, II y III, en la forma siguiente:

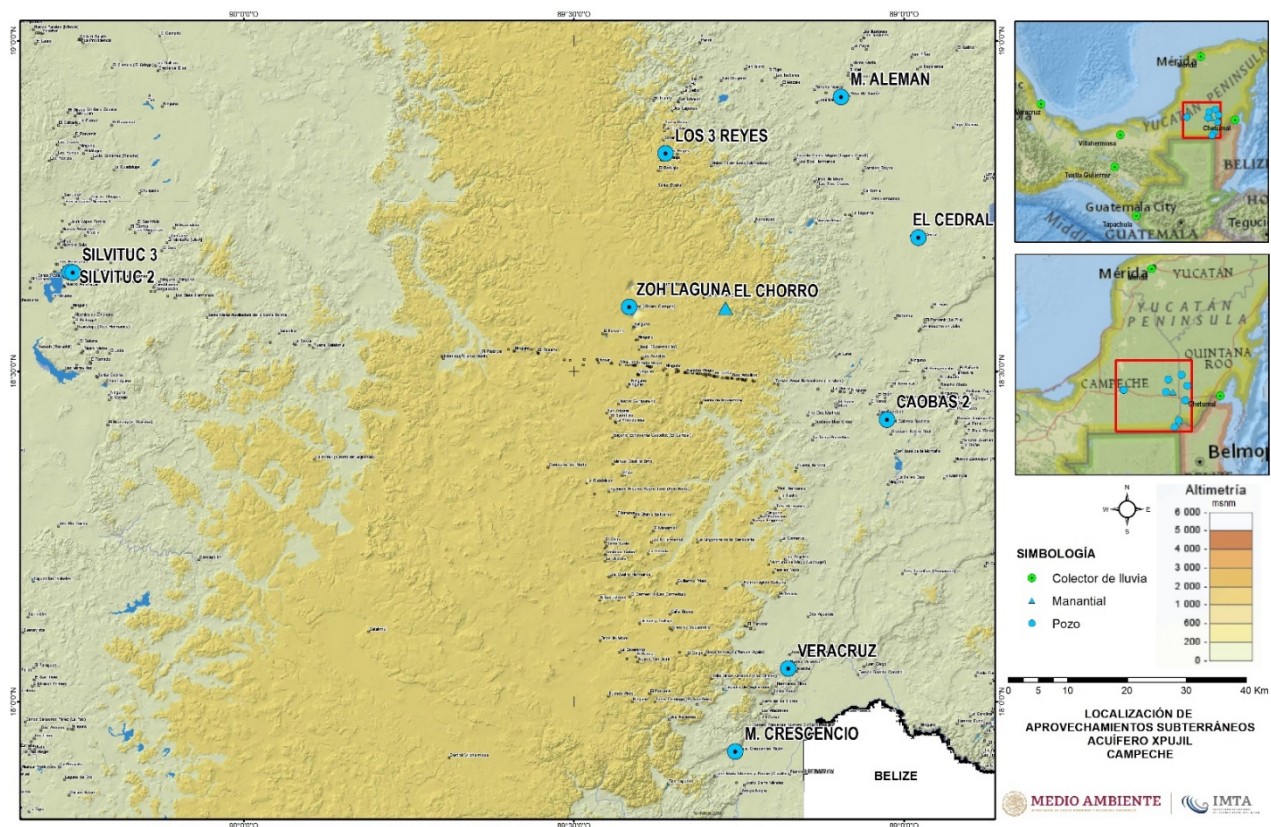
La medición de especies químicas disueltas se realizó en las muestras de agua de los 10 aprovechamientos, de manera acorde con los términos de referencia del estudio. La composición isotópica se midió en el total de muestras recolectadas de los 10 sitios visitados (ver anexo II: Resultados de campo y laboratorio).

Las muestras de agua subterránea para la determinación de los diferentes parámetros fueron recolectadas en el tren de descarga de los pozos. En los casos donde la instalación carecía de válvula de salida, se colectó en la tubería de descarga, asegurando que el agua muestreada no tuviera contacto con la atmósfera. Los volúmenes colectados se envasaron en botellas de polietileno de alta densidad, asegurando su hermeticidad.

Las muestras se preservaron de acuerdo con las especificaciones dadas por los laboratorios especializados de análisis contratados. Para metales se acidificaron a  $\text{pH} < 2$  con ácido nítrico de ultra alta pureza. Para análisis de isótopos estables de H y O, contenido de tritio ambiental y aniones se preservaron únicamente a  $4^\circ\text{C}$ , en forma hermética para evitar el contacto con la atmósfera.

Las muestras recolectadas para la determinación de los diferentes parámetros, se enviaron a laboratorios especializados para su análisis correspondiente, de acuerdo con la siguiente relación:

- a. Especies químicas (cationes y aniones): *Activation Laboratories LTD, Canadá*. En la medición de metales y metaloides se utilizó inducción de plasma acoplado a espectroscopía óptica (ICP/OES por sus siglas en inglés), así como espectrometría de masas (ICP/MS), los resultados de laboratorio incluyeron los siguientes parámetros: Ag, Al, As, Au, Br, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, I, In, K, La, Lu, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, Os, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Re, Ru, S, Sb, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr. La medición de aniones se determinó por cromatografía líquida de iones, de las siguientes especies: F, Cl, Br, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, SO<sub>4</sub>.
- b. Contenido de tritio ambiental: Laboratorio de Hidrología Isotópica del IMTA. La medición se realiza por enriquecimiento electrolítico de las muestras de agua natural recolectadas. Los procesos incluyen destilación primaria, enriquecimiento electrolítico, neutralización, post-destilación de muestras enriquecidas y medición por centelleo líquido de la emisión beta del tritio, mediante un contador de centelleo líquido de alta sensibilidad y ultra bajo nivel de actividad Perkin Elmer Quantulus GCT6220. En el procedimiento se utilizan estándares certificados del National Institute of Standards and Technology (NIST).
- c. Composición de isótopos estables de H y O de las muestras de agua natural: Laboratorio de Hidrología Isotópica del IMTA, se realiza mediante un analizador láser Cavity Ringdown Spectrometer L2110-i Isotopic H<sub>2</sub>O, Picarro, con vaporizador de alta precisión A0211. El método es instrumental y permite determinar las abundancias relativas versus el estándar VSMOW.



**Figura 10.1 Localización de aprovechamientos muestreados con medición de parámetros de campo en el acuífero Xpujil, estado de Campeche.**

## 10.2 Medición de parámetros de campo

En los aprovechamientos subterráneos del acuífero Xpujil se determinaron los parámetros de campo: T, conductividad eléctrica y pH. Los aprovechamientos medidos junto con sus respectivos valores de campo se muestran en la Tabla 10.1.

**Tabla 10.1 Resultados de campo de aprovechamientos de agua subterránea del acuífero Xpujil, estado de Campeche.**

Identificación	Fecha	Coordenadas			Temperatura (°C)	pH	CE (µS/cm)
		X	Y	Altitud			
MANANTIAL EL CHORRO	07/08/2019	260483.2	2057552.3	208	28.4	6.70	2359
EL CEDRAL	08/08/2019	291434.1	2069065.4	100	29.7	6.90	1868
P2 SILVITUC	08/08/2019	788745.0	2064313.3	69	28.4	7.03	1005
MIGUEL ALEMAN	08/08/2019	279352.9	2092750.3	95	29.2	6.72	2234
P3 SILVITUC	08/08/2019	789236.8	2064252.7	67	28.6	7.23	437
MANUEL CRESENCIO	09/08/2019	261109.2	1983276.7	82	28.9	6.95	986
NUEVO VERACRUZ	09/08/2019	269801.4	1997078.5	131	30.2	6.88	834
CAOBAS NUEVO 2	09/08/2019	286097.1	2038615.0	132	29.5	6.50	1082
ZOH LAGUNA	10/08/2019	245038.8	2057961.9	299	28.4	7.07	1440
RANCHO 3 REYES	10/08/2019	251214.6	2083629.2	243	29.0	6.63	2807
MÉRIDA		224233.0	2318522.5	12			
CHETUMAL		359856.9	2046065.6	19			
VILLAHERMOSA		508328.1	1988078.6	5			
VERACRUZ		803877.4	2119144.9	14			
TAPACHULA		575705.5	1645968.0	128			
TUXTLA GUTIÉRIZ		484289.6	1853334.0	577			

La importancia y descripción de cada parámetro de campo medido, se anotan a continuación:

- a. La temperatura es un factor abiótico que puede afectar las propiedades físicas y químicas en un ecosistema e impactar en otros factores como la solubilidad de gases, pH, potencial redox. Por otro lado, y de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013 que hace referencia al análisis de agua, medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas; la medición de la temperatura es útil como indicador en la determinación o no, de la presencia de compuestos y/o contaminantes en el agua. La temperatura elevada en el agua puede indicar diversas situaciones, ya sea actividad biológica, química o física, además de tiempos de residencia de la misma. Además, tiene un rol muy importante en los ecosistemas al regular o no aspectos como la solubilidad de nutrientes, solubilidad de gases, pH, Eh, entre otros.
- b. El potencial de hidrógeno (pH) constituye un parámetro importante de medición, permite observar la tendencia a lo básico o ácido de la muestra en cuestión. El pH de una solución acuosa es una medida del número de iones hidrógeno o protones presentes. Por definición el pH es el logaritmo negativo de la actividad del ion hidrógeno. Va de un rango de 0 (más ácido) a 14 (más básico) a una temperatura de 25°C, un pH de 7 significa que la muestra de agua es neutra. Los valores encontrados mayores a 7 muestran una tendencia básica y tendrá una cantidad más grande de iones OH<sup>-</sup>; por el contrario, aquellos con valores inferiores muestran una tendencia ácida, con predominio de iones H<sup>+</sup>. Valores extremos pudieran ser indicadores de la existencia de contaminación debido a distintos factores, ya sea antropogénicos o naturales. Además, existen distintos factores que hacen variar los valores de pH en los cuerpos de agua, como la temperatura, presión parcial del CO<sub>2</sub>, precipitación ácida, entre otros. El pH de una solución es especialmente sensible a la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto, y muestra un efecto sobre las proporciones de las especies iónicas en el agua formadas a partir de CO<sub>2</sub>, en valores de pH menores a 6 prevalece el CO<sub>2</sub>, la aparición de



HCO<sub>3</sub> se hace evidente entre 7 y 9, finalmente para valores superiores a 9 la especie iónica dominante es el CO<sub>3</sub>.

- c. La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución para conducir electricidad, a medida que la concentración iónica aumenta, aumenta también la conductividad. Generalmente cuanto mayor sea la cantidad de sólidos disueltos, mayor será la conductividad eléctrica. La medición de este parámetro será un indicativo de la concentración del ion que varía de acuerdo a su carga, tamaño y en la manera en la que interactúe con el solvente, se mide en (µS/cm). La CE y la temperatura están relacionadas ya que, un aumento en la temperatura hace que la viscosidad disminuya, por lo que los iones se mueven más rápido y conducen más electricidad. El agua pura tiene un valor bajo de conductividad eléctrica de pocos micro Siemens por centímetro a 25°C, aunque este valor es únicamente teórico, ya que el agua pura es difícil de producir. La presencia de especies iónicas cargadas en solución hace la solución conductiva. A medida que la concentración del ion aumente, la conductancia de la solución aumenta; por lo tanto la medición de la conductividad indica la concentración del ion.
- d. La alcalinidad total es la capacidad del agua para neutralizar ácidos y representa la suma de las bases que pueden ser tituladas. Dado que la alcalinidad del agua está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas y se determina por titulación con una solución estándar de un ácido mineral fuerte a los puntos sucesivos de equivalencia del bicarbonato y el ácido carbónico (pH ≈ 4.5 - 4.3). Una vez tomada la muestra de agua, es factible que la alcalinidad se modifique al paso del tiempo; por lo cual, se recomienda que este parámetro sea medido directamente en campo. Para ello, se utiliza la técnica estándar de titulación con ácido sulfúrico en alícuotas de agua del aprovechamiento muestreado (pozo o río) de 50 mL y el método potenciométrico de Gran. Este método consiste en agregar a la alícuota un volumen determinado de ácido mediante un titulador digital, y medir inmediatamente el pH de la muestra con un potenciómetro calibrado, repitiendo este proceso de manera sucesiva hasta lograr un pH menor del valor 4.3.

### **10.3 Medición de parámetros en laboratorio**

Los parámetros fisicoquímicos de laboratorio se determinaron mediante técnicas analíticas instrumentales que reportan datos cuantitativos en todos los casos, independientemente de la concentración que presenten las especies disueltas en el agua subterránea.

El análisis de metales y metaloides, dependiendo de su concentración se analizaron por inducción de plasma acoplado a espectrometría de masas (ICP/MS) y por inducción de plasma acoplado a espectroscopia óptica (ICP/OES).

Las especies químicas e isótopos ambientales medidos, se indican a continuación:

- Metales y metaloides (ICP/MS e ICP/OES): Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, In, K, La, Lu, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Sb, Sc, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr
- Aniones (Cromatografía de líquidos): F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>=</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>.
- Oxígeno 18 (18O), Deuterio (2H), Tritio ambiental (3H).

La composición de isótopos estables y contenido de tritio ambiental de las muestras de agua natural se determinaron en el laboratorio de hidrología isotópica del IMTA, reconocido por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a través de ejercicios de intercomparación de resultados analíticos, promovidos por dicho organismo internacional (WICO 2016 y TRIC2018).

El análisis de la composición de isótopos estables de H y O en muestras de agua natural se realiza en un analizador láser Cavity Ringdown Spectrometer L2110-i Isotopic H<sub>2</sub>O Picarro, con vaporizador de alta precisión A0211. El método es instrumental y permite determinar las abundancias relativas versus el estándar VSMOW.

El análisis del contenido ambiental de tritio se determina por enriquecimiento electrolítico de la muestra original y por centelleo líquido de la emisión beta del tritio, mediante un contador de alta sensibilidad y ultra bajo nivel de actividad Quantulus GCT 6220. En el procedimiento se utilizan estándares certificados del National Institute of Standards and Technology (NIST).

Los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio Activation Laboratories Ltd. de Canadá (<http://www.actlabs.com>) el cual cumple con certificados de acreditación ISO 17025 e ISO 9001:2008).

#### **10.4 Interpretación hidrogeoquímica e isotópica**

La interpretación conjunta de resultados hidrogeoquímicos, isotópicos, parámetros de campo e información hidrogeológica consultada, permitió establecer la calidad del agua.

La isotopía de las aguas indica sí existen mezclas entre diferentes tipos de agua en el acuífero; así como, componentes con sello distinto al subterráneo. Ayuda a dilucidar los mecanismos de recarga e identificar las zonas donde ésta se efectúa de manera efectiva, los tiempos de residencia y la interacción agua-roca.

Los isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno, intrínsecos de la molécula de agua, son trazadores gratuitos que permiten estudiar el origen y evolución de las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas. Existen de manera natural, razón por la cual se denominan isótopos ambientales.

En la naturaleza se conocen tres isótopos del hidrógeno: dos estables y uno radiactivo:

$^1\text{H}$  o H: 99,98 % del hidrógeno total, denominado mayoritario (estable)

$^2\text{H}$  o D (Deuterio): 0,016 % (estable)

$^3\text{H}$  o T (Tritio):  $5 \cdot 10^{-6}$  % (inestable o radioactivo)

De los diferentes isótopos del oxígeno, solo tres de ellos son de interés en hidrogeología:

$^{16}\text{O}$ : 99,76 % del oxígeno total (estable)

$^{17}\text{O}$ : el 0,04 % (estable)

$^{18}\text{O}$ : el 0,20 % (estable)

El  $^{17}\text{O}$  es el isótopo menos abundante de los tres, por ello se mide con mayor incertidumbre que el  $^{16}\text{O}$  y el  $^{18}\text{O}$ . Por esta razón generalmente se usa la relación  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , que ofrece mayores contraste y facilidad de medición.

La combinación de los diferentes isótopos existentes de hidrógeno y de oxígeno permite formar hasta 18 moléculas de agua diferentes. De ellas, las más usuales en hidrología isotópica, desde un punto de vista probabilístico, son:  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$  y  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .

Las propiedades de los diferentes isótopos de un mismo elemento son muy similares, pero las pequeñas diferencias de movilidad iónica, tensión de vapor, difusividad, etc., hacen que el agua natural tenga ligeras diferencias de composición isotópica según su origen en el ciclo hidrológico. Así, el agua de mar es más pesada o enriquecida en  $\text{HD}^{16}\text{O}$  y  $\text{HD}^{18}\text{O}$  que el agua dulce, mientras que el vapor de agua de mar es más ligero o enriquecido en  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  respecto al agua de mar de la que es originario. El vapor de agua de lago o embalse es menos pesado o enriquecido en  $\text{HD}^{16}\text{O}$  y  $\text{HD}^{18}\text{O}$  que el agua de la que procede. Es decir, existe un fraccionamiento isotópico al pasar de un estado a otro, lo cual resulta útil para estudiar procesos ocurridos en el ciclo hidrológico.

El agua de lluvia constituye una de las principales fuentes de recarga de las aguas subterráneas y del agua de poro de la zona no saturada. La variación espacial y temporal del contenido isotópico de la lluvia puede usarse para estudiar tanto la zona de la recarga en los acuíferos, como la época en que ésta tiene lugar.

La aplicación de isótopos en hidrología es complementaria de los resultados derivados de otras metodologías, tales como geología, geofísica, geoquímica, hidrogeología, etc. Permiten precisar el comportamiento del agua en la naturaleza, particularmente, el funcionamiento de los acuíferos y obtener conclusiones más confiables. En casos especiales aportan información única sobre la naturaleza de las aguas subterráneas (IAEA, 2005).

La manera precisa de expresar la composición isotópica de cualquier muestra de agua, se hace mediante un patrón de agua que sirve de referencia a los distintos laboratorios, dedicados a la medición del contenido isotópico de muestras de agua. Para ello, se preparó el "Patrón Medio de Agua de Mar" conocido como *SMOW* (por sus

siglas en inglés) (Craig, H., 1961). En la actualidad este patrón ha sido sustituido por el VSMOW (por sus siglas en inglés de *Vienna Standard Mean Ocean Water*), y es reproducido de manera regular por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés).

Las variaciones isotópicas para oxígeno-18 o deuterio, con respecto al patrón VSMOW, se expresan como desviaciones delta por mil ( $\delta$  ‰), mediante la expresión:

$$\delta \text{ (‰)} = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \times 10^3$$

En donde R está definida por la expresión

$$R = \frac{\text{Núm. de moléculas del tipo } ^1\text{H } ^2\text{H } ^{16}\text{O} \text{ (ó } ^1\text{H}_2^{18}\text{O})}{\text{Núm. de moléculas del tipo } ^1\text{H}_2^{16}\text{O}}$$

El valor de la  $\delta$  puede ser positivo o negativo, dependiendo de que la muestra esté más enriquecida o empobrecida que el VSMOW. Una  $\delta$  positiva indica mayor concentración en el isótopo pesado que el VSMOW, según corresponda ( $^{18}\text{O}$  ó  $^2\text{H}$ ).

La desviación  $\delta$  en las aguas meteóricas varía entre límites amplios debido a diferentes causas. Una es el fraccionamiento producido durante los cambios de fase, el cual es motivado por la diferencia de presión de vapor de las tres especies moleculares. Si designamos por P a esta presión de vapor, se cumple:

$$P(^1\text{H}_2^{16}\text{O}) > P(^1\text{H}_2^{18}\text{O}) > P(^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O})$$

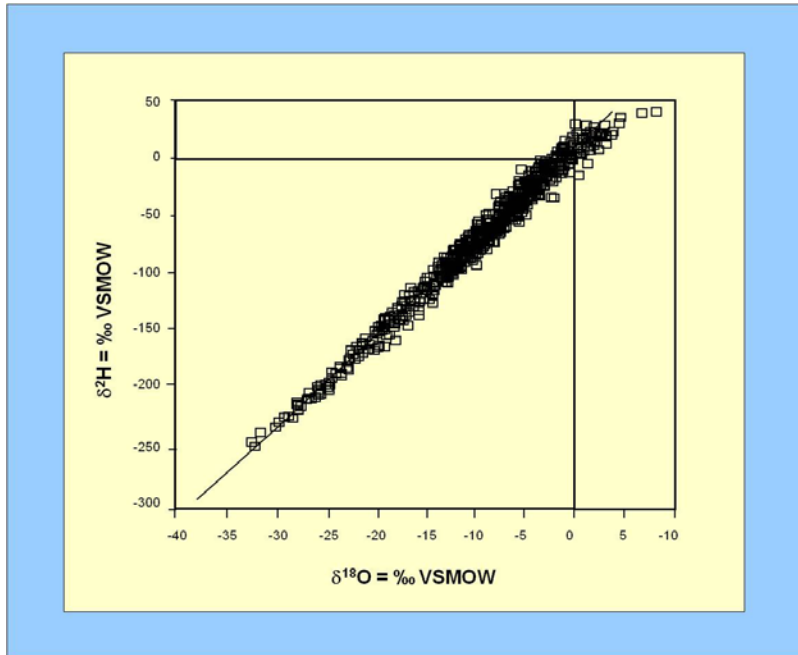
La presión de vapor determina la velocidad de evaporación o de condensación del agua. Por tanto las moléculas ligeras ( $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ) que tienen mayor presión de vapor, se evaporan más rápido y se condensan más lentamente que las moléculas pesadas, es decir, presentan una tendencia mayor a permanecer en la fase de vapor durante el cambio de fase (Clark y Fritz, 1997).

La lluvia a nivel global presenta una composición isotópica lineal que se ajusta a la ecuación:

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

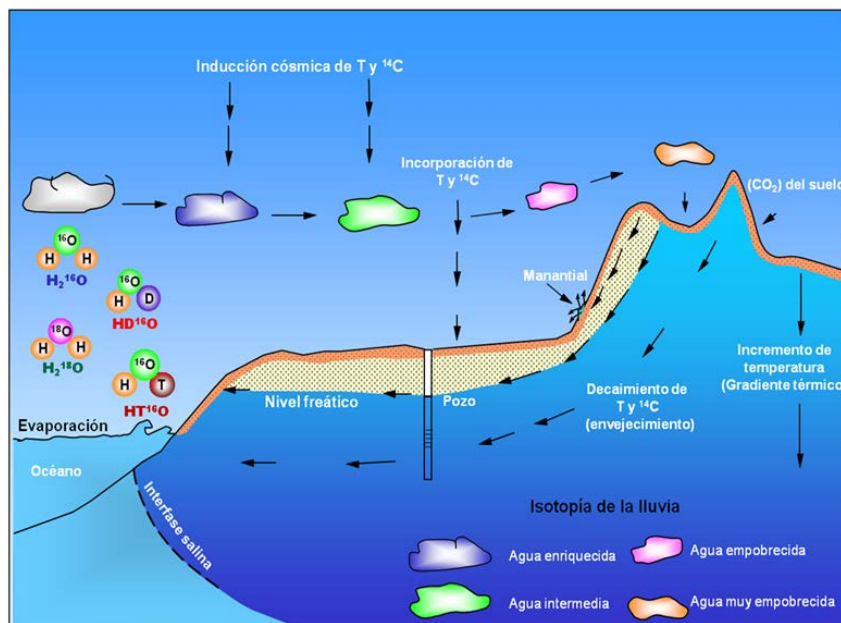
Esta ecuación es válida para todas las aguas meteóricas que se precipitan sobre la superficie de la tierra y describe a la denominada Línea Meteórica Global (GMWL por sus siglas en inglés). La ordenada al origen de valor 10 se denomina exceso de deuterio. La pendiente y el exceso de deuterio pueden variar para cada región debido a las condiciones climatológicas locales. En algunos casos se cuenta con líneas meteóricas

locales que permiten la interpretación de los resultados isotópicos estables (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



**Figura 10.2 Distribución de la composición isotópica estable de las aguas meteóricas a nivel global. Los valores  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  se ajustan a una recta de pendiente ocho y ordenada al origen 10, denominada Línea Meteórica Global**

La composición isotópica de la lluvia depende de la génesis que experimenta, desde el momento de salir del mar en forma de vapor hasta que se incorpora en forma líquida en cualquiera de los componentes del ciclo hidrológico. A medida que la nube avanza, va perdiendo agua por condensaciones sucesivas hasta que el frente nuboso pierde su actividad. Debido a que las moléculas pesadas  $^1H^2H^{16}O$  y  $^1H_2^{18}O$  condensan de forma preferente, la nube se va empobreciendo en estas dos especies moleculares (Clark, y Fritz, 1997). Esto hace que las precipitaciones tengan valores más negativos a medida que se alejan de la fuente de producción de vapor, se denomina efecto continental; es decir, se produce un empobrecimiento de isótopos pesados de la lluvia en función de la distancia (Figura 10.3).



**Figura 10.3 Evolución isotópica de las aguas superficiales y subterráneas en el ciclo hidrológico.**

Otro factor muy importante que influye en la composición isotópica de las precipitaciones pluviales de zonas montañosas, es el llamado efecto de altitud, derivado de la mayor velocidad de difusión de las moléculas ligeras en la atmósfera. Durante el desarrollo vertical de las nubes, hay un aumento de la condensación del vapor de agua a medida que disminuye la temperatura. Debido a que las moléculas pesadas condensan de manera preferencial con respecto a las ligeras, se tiene como resultado que las precipitaciones de cotas más elevadas sean más negativas o estén más empobrecidas en isótopos pesados (Figura 10.3). Por este efecto, la  $\delta^{18}\text{O}$  varía entre  $-0.15$  y  $-0.5\text{‰}$  y la  $\delta^2\text{H}$  entre  $-1$  y  $-4\text{‰}$  por cada 100 metros de diferencia de altitud.

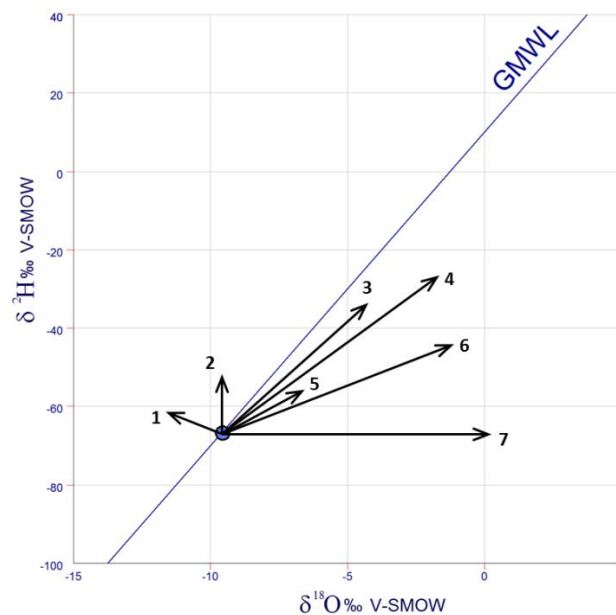
Otro fenómeno que cambia la composición isotópica original de un tipo de agua, es el denominado efecto de evaporación. Cuando el agua experimenta procesos de evaporación intensa sus deltas de deuterio y oxígeno-18 evolucionan a lo largo de una línea de evaporación de coeficiente angular menor al de la línea meteórica mundial (GMWL por sus siglas en inglés), coeficiente que depende fuertemente de la humedad relativa. Típicamente, esta situación se presenta cuando el agua es almacenada en una presa, cuando fluye a través de un canal o cauce natural, o cuando se aplica mediante riego en agricultura. Al estar sometida a evaporación intensa, el agua registra un fraccionamiento isotópico de su composición original. Al haber recarga proveniente de un embalse, de un río, o por infiltración de retornos de riego, en el acuífero se genera una mezcla de agua con un sello característico de este proceso (Mazor, 1991).

Existen otros procesos que causan fraccionamiento isotópico del tipo de agua original, entre los cuales destaca la reducción del sulfato. En condiciones anaeróbicas del agua subterránea y alta concentración de sulfato, la acción bacteriana es la responsable de

la oxidación de la materia orgánica. Durante este proceso, las bacterias transforman el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) y posteriormente en sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Las bacterias preferentemente utilizan el  $^{16}\text{O}$  durante la reducción del ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) a ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), por lo cual el sulfito se enriquece en  $^{18}\text{O}$ . Diversos estudios (Fritz, et al., 1989) han mostrado que cuando el sulfito es creado, rápidamente intercambia  $^{18}\text{O}$  con el agua subterránea buscando un equilibrio isotópico. Debido a este intercambio, el agua subterránea se enriquece en  $^{18}\text{O}$ . Como resultado de este proceso, el agua subterránea original evoluciona isotópicamente a lo largo de una recta de pendiente con coeficiente angular menor al de la GMWL (Figura 10.4) (Horita, 2005).

El registro de los efectos antes mencionados permite establecer el origen y la dinámica del agua subterránea, particularmente identificar las zonas de recarga efectiva y los procesos de mezcla de los flujos subterráneos.

EVOLUCIÓN ISOTÓPICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA



**Figura 10.4 Evolución isotópica del agua subterránea en cuencas sedimentarias: 1. Hidratación de silicatos, 2. Intercambio con  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$  e hidrocarburos, 3. Reducción de sulfatos, oxidación de compuestos orgánicos e hidrógeno molecular, 4. Evaporación de agua dulce.**

## 10.5 Discusión de resultados

La caracterización isotópica estable y geoquímica de las aguas subterráneas de la zona de estudio, se realizó mediante el análisis conjunto de los resultados de campo y laboratorio. Los resultados integrados de campo y laboratorio aparecen en el Anexo 1, los resultados analíticos de laboratorio en el Anexo 2.

### 10.5.1 Isotopía estable

Los resultados de isótopos estables de H y O, especies químicas disueltas, mediciones de campo y contenido de tritio ambiental graficados en diagramas de dispersión X Vs. Y, así como en diagramas químicos, permiten simplificar y explicar el funcionamiento y evolución de los flujos subterráneos que alimentan los aprovechamientos subterráneos, existentes en la zona de estudio. Los resultados de isótopos estables considerados en el análisis aparecen en el Anexo 2 y los correspondientes a los parámetros medidos en campo y laboratorio, aparecen en su totalidad en los Anexo 1

Para definir la fuente de recarga de los flujos que alimentan los aprovechamientos subterráneos de la zona estudiada, se consideró la información generada por la red nacional de monitoreo de la composición isotópica de la precipitación pluvial (RENIP) operada por el IMTA, para establecer la Línea Meteórica Local (LML). La cual es característica de las condiciones climatológicas, orográficas y ambientales de la zona.

Las estaciones de la RENIP consideradas en el presente estudio, son: Mérida, Chetumal, Villa Hermosa, Veracruz, Tapachula y Tuxtla Gutierrez. Los valores  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  graficados de estas estaciones corresponden al promedio ponderado de la composición isotópica estable del volumen de lluvia acumulado mensual.

La composición isotópica de la lluvia que precipita en la zona de recarga efectiva del acuífero Xpujil; en consecuencia, queda definida por el conjunto de datos que se ajustan a la recta denominada línea meteórica local (LML), definida por los contenidos isotópicos de los aprovechamientos muestreados y los correspondientes a las estaciones consideradas de la RENIP. Los valores isotópicos se ajustan en una recta que se denomina Línea Meteórica Local, definida por la siguiente ecuación:

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$$

La figura 10.5 muestra la distribución de los datos isotópicos de los aprovechamientos subterráneos, junto con los datos de las estaciones de la RENIP, los cuales se ajusta a la Línea Meteórica Local (LML), la cual en este caso coincide con la Línea Meteórica Mundial, definida por las estaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (IAEA 2005).

La distribución de los datos indica claramente que los flujos que recargan el acuífero provienen de la lluvia local. De acuerdo con el efecto de altitud mencionado en párrafos precedentes y debido a las altitudes de las estaciones de la RENIP y de los aprovechamientos muestreados (Tabla 1), se observa que la zona de recarga efectiva se ubica en los lomeríos de la formación Icaiché de la subprovincia denominada Karst y Lomeríos de Campeche, cuyas altitudes alcanzan los 300 metros sobre el nivel del mar.

Las  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de los flujos del acuífero Xpujil se agrupan entre las correspondientes a la lluvia de las estaciones Tuxtla Gutiérrez ubicada a 577 msnmm y la estación Villa Hermosa ubicada a cinco msnm.

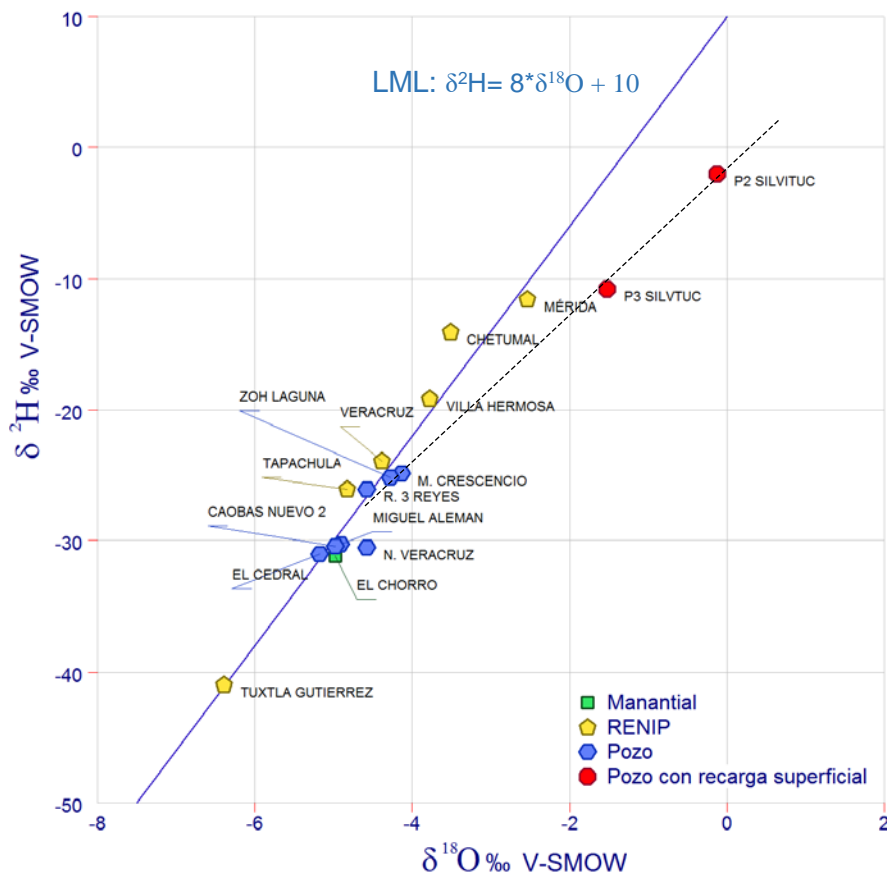


Los pozos Silvituc 2 y Silvituc 3 presentan composiciones isotópicas muy enriquecidas con  $\delta^{18}\text{O} = -0.1$ ,  $\delta^2\text{H} = -2.0$  y  $\delta^{18}\text{O} = -1.5$ ,  $\delta^2\text{H} = -10.8$  respectivamente, las cuales evolucionan en una recta de evaporación, indicando que son recargados con agua que ha experimentado fraccionamiento isotópico por procesos de evaporación intensa. La proximidad de ambos pozos con el lago Silvituc favorece la captación de agua proveniente de dicho cuerpo de agua superficial (Figura 10.1).

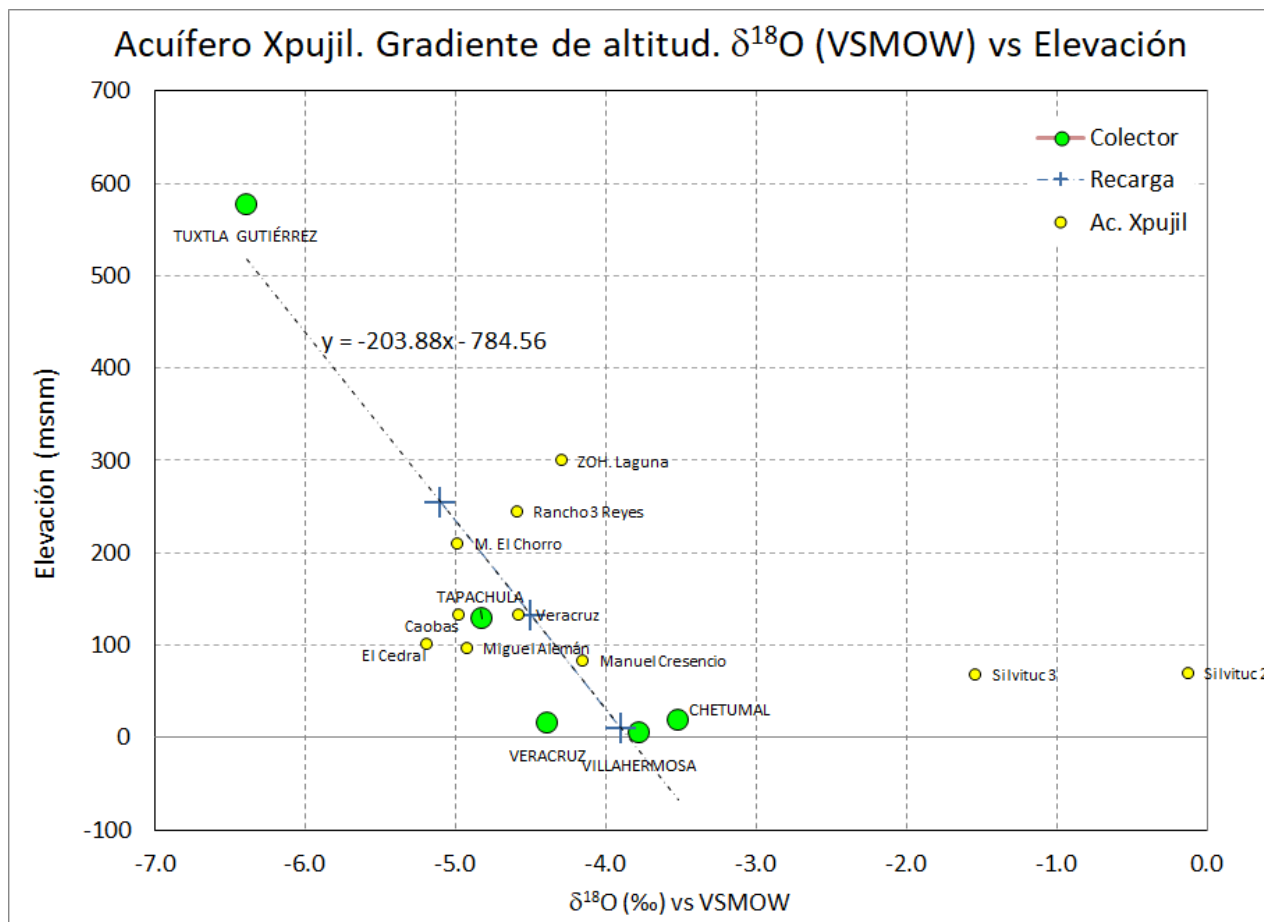
Los valores isotópicos de la lluvia captada en las estaciones de la RENIP, utilizados para determinar el gradiente de altitud de la  $\delta^{18}\text{O}$  indica que ésta varía en 0.5 ‰ por cada 100 metros de diferencia en la elevación. La figura 10.6 muestra que la zona de recarga efectiva de los aprovechamientos se localiza entre los 70 y 300 m de altitud sobre el nivel del mar.

La cantidad de sólidos disueltos en el agua subterránea la determina la conductividad eléctrica de las muestras recolectadas. La figura 10.7 muestra que este parámetro varía de entre 834 y 2807  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en apenas 1‰ en la  $\delta^{18}\text{O}$ , con excepción de los pozos Silvituc 2 y Silvituc 3, los cuales varían alrededor de 4‰ en la  $\delta^{18}\text{O}$ . Ello indica que el agua subterránea del acuífero Xpujil se mineraliza por disolución de las rocas carbonatadas de las formaciones geológicas en las que se encuentra. Los valores de los pozos Silvituc 2 y Silvituc 3 indican que el contenido de sólidos disueltos es modificado por aportaciones de agua superficial evaporada, la cual modifica la concentración de sales disueltas de las extracciones de los pozos con variaciones en el contenido de isótopos estables menos empobrecidos, con respecto al resto de los aprovechamientos.

### ACUÍFERO XPUJIL, EDO. DE CAMPECHE

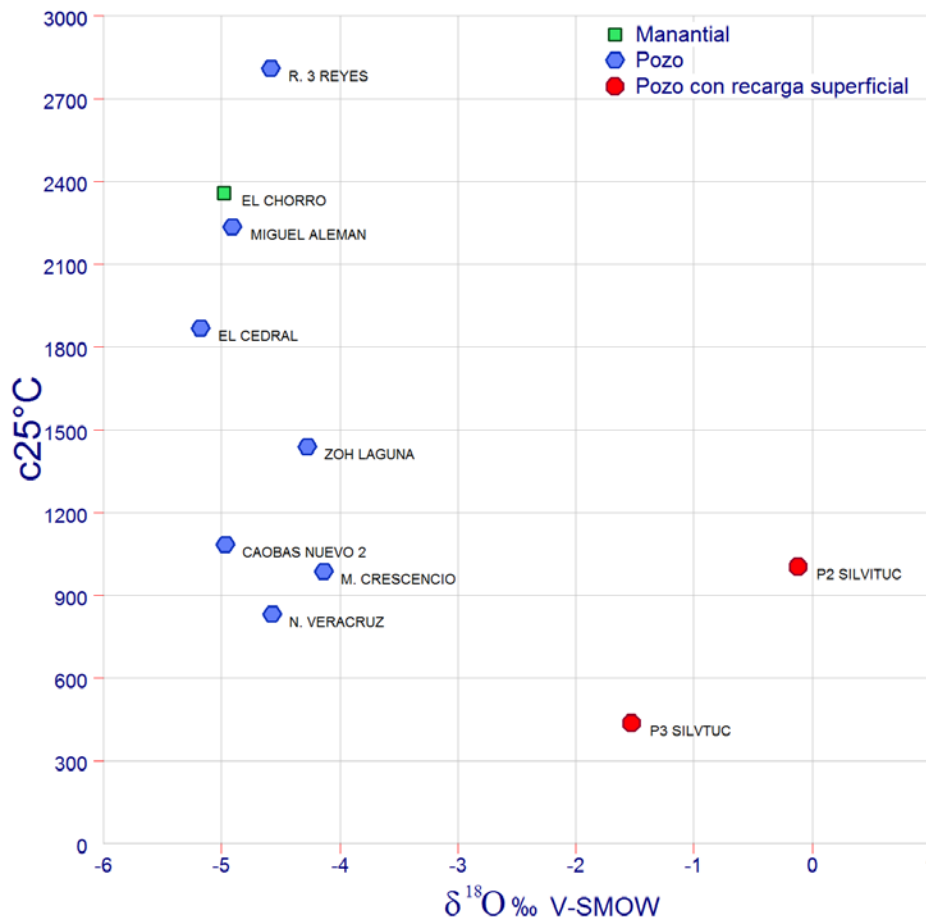


**Figura 10.5 Composición de isótopos estables de los aprovechamientos muestreados del acuífero Xpujil, y de las estaciones de lluvia de la RENIP ubicadas en provincias de precipitación pluvial y fisiográfica cercanas a la zona de estudio**



**Figura 10.6 El gradiente de altitud de la composición isotópica de la lluvia determinado con estaciones de la RENIP es de 0.5‰ en la  $\delta^{18}\text{O}$  por cada 100 metros de elevación sobre el nivel del mar.**

### ACUÍFERO XPUJIL, GRAFICA: CE Vs. 18O



**Figura 10.7 La variación de la conductividad eléctrica de las muestras de agua subterránea varía de 834 a 2807 μS/cm en apenas 1 ‰ en la δ18O con excepción de los pozos Silvituc 2 y Silvituc 3**

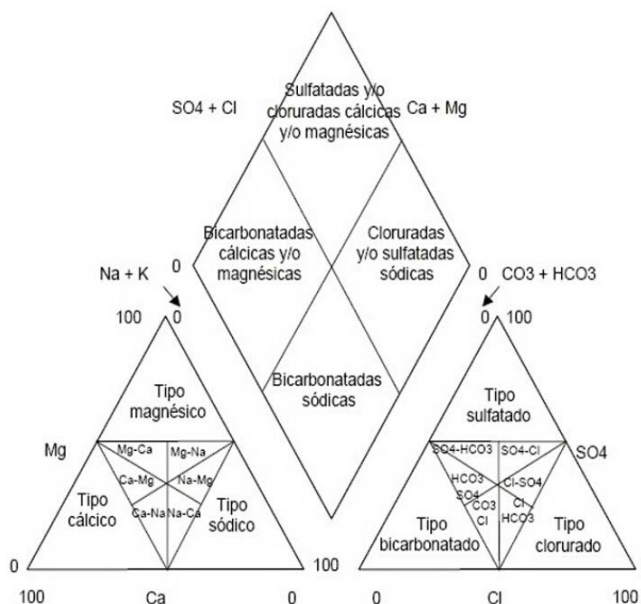
#### 10.5.2 Hidroquímica

Los diagramas hidroquímicos son representaciones gráficas que facilitan la visualización de las características químicas del agua para su clasificación en tipos y familias de agua. El tipo de agua se define por los constituyentes químicos disueltos que contribuyen desde el punto de vista aniónico y catiónico, que permiten establecer las principales familias de agua presentes en la zona de estudio, y comprender su contexto hidrogeoquímico.

Con el diagrama de Piper se obtiene el tipo o familia química de agua a la que pertenecen las muestras de agua analizadas. Los cationes y aniones se representan en un gráfico compuesto por tres partes, dos triángulos y un rombo (Figura 10.8). El diagrama se construye expresando las concentraciones de los parámetros químicos

mayoritarios en miliequivalentes por litro (meq/L) y posteriormente se convierten en porcentajes. Los triángulos únicamente indican las proporciones de los cationes y aniones presentes en la muestra de agua, no su concentración.

En los vértices del triángulo izquierdo del diagrama se grafican los cationes principales,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , y en los vértices del triángulo de la derecha, los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ , a cada vértice le corresponde el 100% del anión o catión. Los valores de los cationes y aniones graficados en cada triángulo, son proyectados en el rombo de la parte central del diagrama, para obtener la clasificación de la familia o tipo de agua. Se define al agua mixta como aquella que se grafica al centro de cada triángulo por no existir ion predominante.

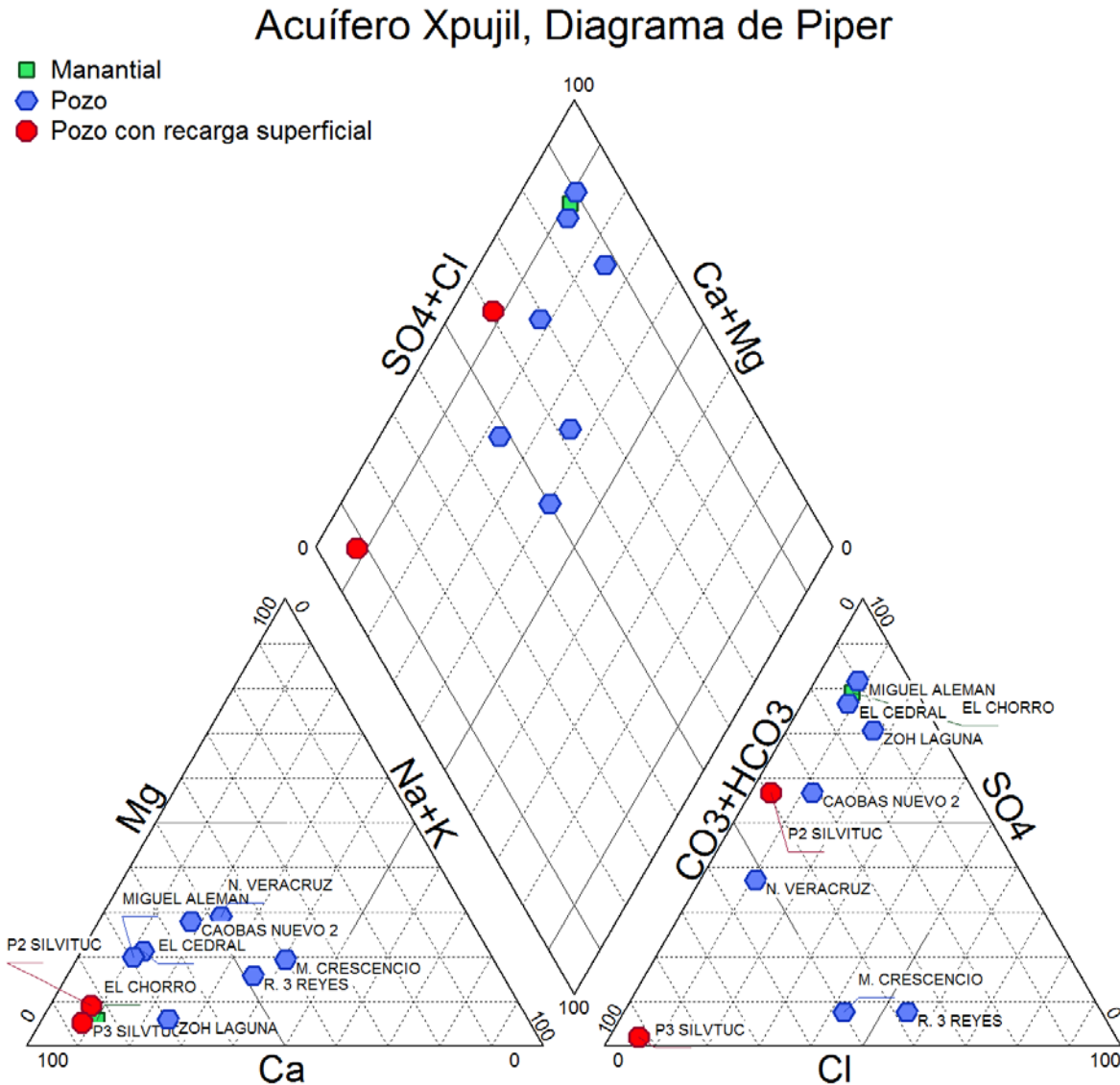


**Figura 10.8 Diagrama de Piper con la clasificación de las familias o tipos de agua**

Adicionalmente, se utilizó el diagrama de Stiff, que es otro tipo de representación gráfica para los datos químicos, donde la proporción de concentraciones de los cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) y los aniones ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) de la muestra de agua, se presentan mediante vértices que se extienden horizontalmente indicando la cantidad existente de cada uno de los iones expresados, de la misma manera que en el diagrama de Piper, en meq/L. Hacia el lado izquierdo de la figura se presentan los cationes y hacia el derecho los aniones. La forma del polígono resultante permite visualizar diferentes tipos de agua o la mineralización de la misma. Este tipo de diagrama fue elaborado también para todas las muestras analizadas.

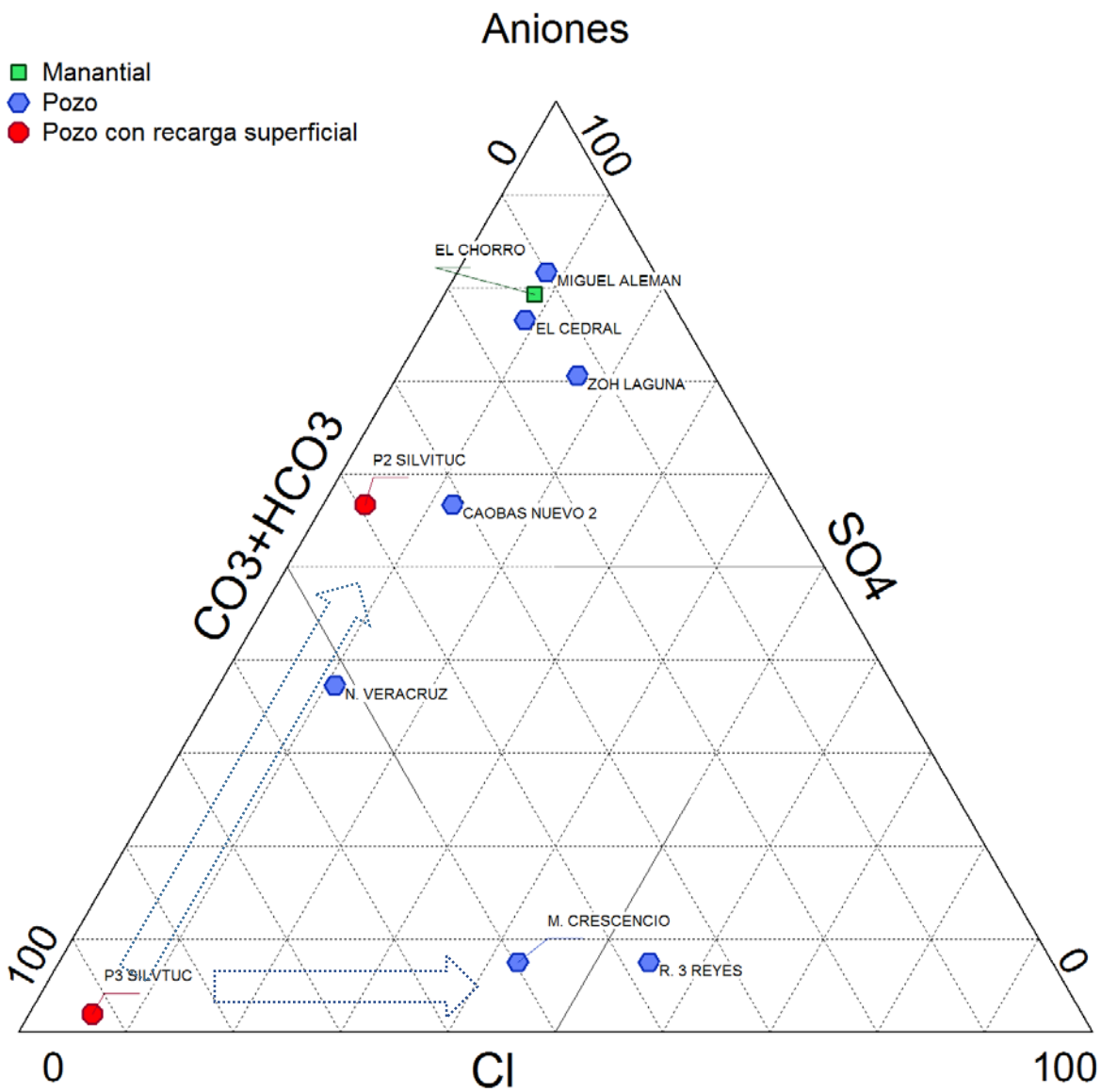
De acuerdo con el diagrama de Piper la clasificación de las familias o tipos de agua predominan las Sulfatadas-Calcicas y Magnésicas, en menor número las Bicarbonatadas-Cálcicas y Magnésicas y Cloruradas-Cálcicas (Figura 10.9). En la primera familia se ubican los pozos Miguel Alemán, El Cedral, Zoh Laguna, P2 Silvituc y Caobas Nuevo 2, así como el manantial El Chorro. En la segunda familia, los pozos

Nuevo Veracruz, P3 Silvituc y en la tercera familia los pozos M. Crescencio y Rancho 3 Reyes.



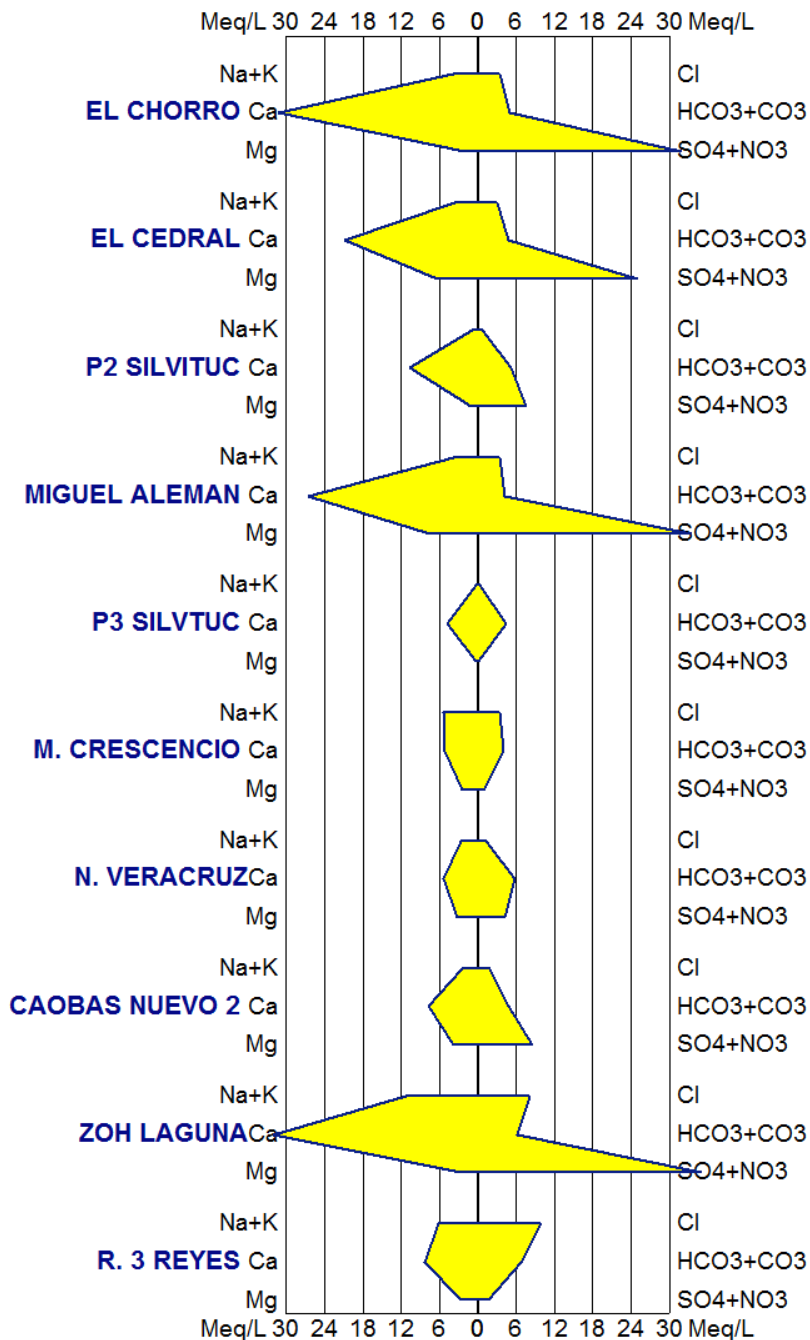
**Figura 10.9 Diagrama de Piper para la clasificación geoquímica de las familias de agua del acuífero Xpujil.**

Las familias geoquímicas que han evolucionado por mayores recorridos en el medio físico y tiempos de residencia de más de 10 años, son las Sulfatadas Cálcicas y Magnésicas que presentan los pozos: Miguel Alemán, El Cedral, Zoh Laguna, P2 Silvituc y Caobas Nuevo 2, así como el manantial El Chorro. La evolución en el medio subterráneo va de la familia o agua de tipo Bicarbonatada-Cálcica y Magnésica representada por el pozo P3 Silvituc a las familias Sulfatada-Cálcica y Magnésica, y Clorurada-Cálcica (Figura 10.10).



**Figura 10.10 Evolución del agua en el medio subterráneo agua Bicarbonatada-Cálcica y Magnésica a Sulfatada-Cálcica y Magnésica, y Clorurada-Cálcica.**

## Acuífero Xpujil, Diagrama de Stiff



**Figura 10.11 Representaciones de iones predominantes en las muestras de pozos del acuífero Xpujil, mediante diagramas de Stiff**



La mineralización del agua subterránea o disolución de sólidos se debe al tipo de roca acuífera formada por yesos de origen marino, altamente solubles, compuestos de sulfatos de calcio y magnesio.

En la clasificación de las aguas ayuda mucho la representación geoquímica mediante diagramas de *Stiff*, con los cuales se visualizan claramente los iones predominantes, mismos que están representados en mili equivalentes por litro (Meq/L). Adicionalmente se han incluido diagramas de *Stabler*, los cuales representan las concentraciones relativas de los aniones y cationes mayoritarios mediante barras horizontales, permitiendo observar los iones predominantes en la muestra de agua. Ambos diagramas de *Stiff* y *Stabler* se presentan para los aprovechamientos de los 10 aprovechamientos muestreados del acuífero Xpujil (Figuras 10.11 y 10.12).

## Acuífero Xpujil, Edo de Campeche

### Stabler



**Figura 10.12 Representación mediante diagramas de Stabler de las concentraciones relativas de aniones y cationes mayoritarios del agua de los aprovechamientos, para determinar el tipo de agua geoquímico al que pertenecen.**

Los procesos químicos de disolución por interacción del agua subterránea con la roca, que incrementa en diferentes proporciones las especies químicas mayoritarias de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , en los diferentes aprovechamiento, depende de diversos factores, tales como el tiempo de residencia, composición mineralógica de la roca, solubilidad de los minerales, factores ambientales, etc.

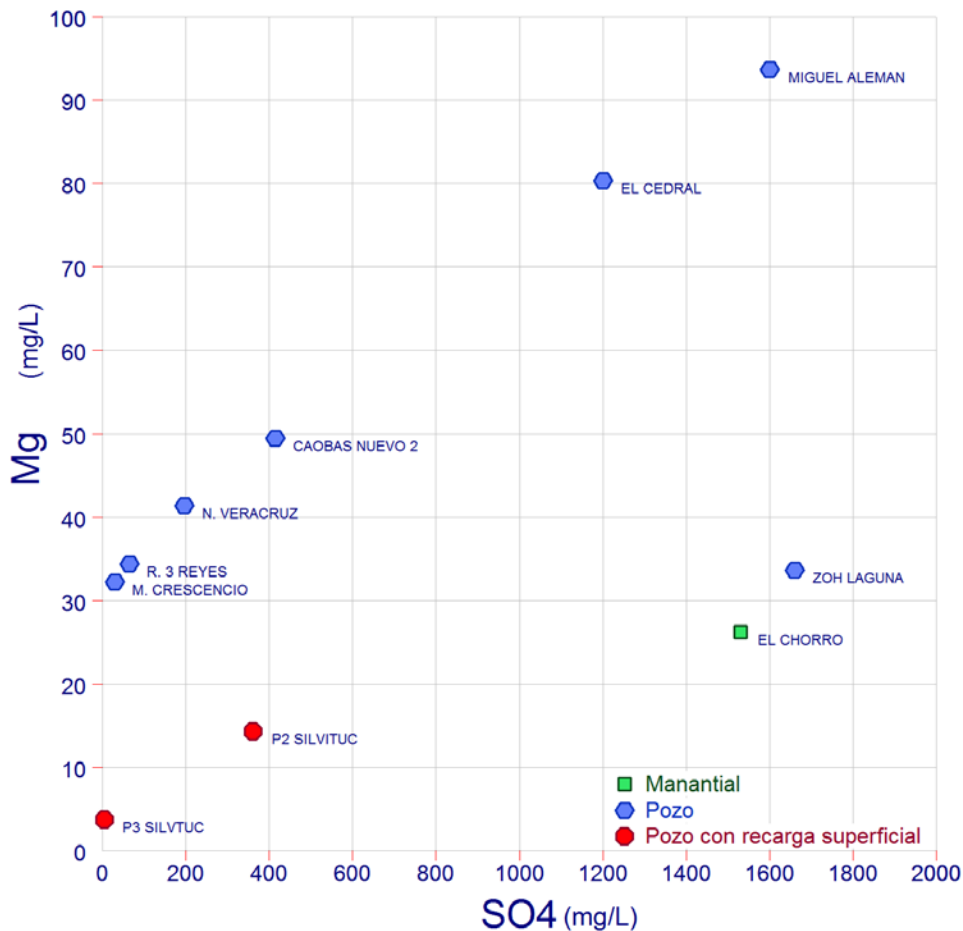
En el caso del acuífero Xpujil la mineralización del agua subterránea es por disolución de los yesos, compuestos principalmente de sulfatos de calcio y carbonatos de calcio y magnesio (Figuras 10.13 y 10.14). Las concentraciones elevadas de sulfato se deben al contacto del flujo con rocas evaporitas, las cuales contienen materiales detríticos formados principalmente por calcita, dolomita, halita y yesos.

Acuífero Xpujil, Gráfica  $\text{SO}_4$  Vs. Ca



**Figura 10.13** Incremente del  $\text{Ca}^{++}$  correlaciona con el  $\text{SO}_4^-$ , indicando que ambas especies se agregan mayoritariamente al agua subterránea.

### Acuífero Xpujil, Gráfica SO<sub>4</sub> Vs. Mg



**Figura 10.14** Incremente del Mg<sup>++</sup> correlaciona con el SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, indicando que ambas especies se agregan al agua subterránea. La concentración del Mg<sup>++</sup> es menor que la del Ca<sup>++</sup> debido a la composición de la roca.

#### 10.5.3 Tiempo de residencia del agua subterránea

Los contenidos de tritio ambiental (<sup>3</sup>H) de los aprovechamientos muestreados en el presente estudio (Anexo 1), están comprendidos en el rango de 1.48 a 0.01 unidades de tritio (UT por sus siglas en inglés). Es importante destacar que el límite de medición de tritio por enriquecimiento electrolítico de la muestra es de 0.5 UT.

El contenido de tritio del agua de lluvia que recarga los flujos subterráneos determina la cantidad inicial de tritio que se incorpora en el ambiente subterráneo. A partir de la infiltración se inicia el tiempo de residencia del flujo subterráneo, el cual es determinado por el efecto de decaimiento de la cantidad inicial del tritio. El tiempo de tránsito del agua de recarga inicia desde el momento de la infiltración hasta que es

captado en algún pozo o descarga en un manantial, en algún punto de la superficie del terreno.

El contenido inicial de tritio se determinó de la información generada en la red nacional de monitoreo de la composición isotópica de la precipitación pluvial (RENIP), operada por el IMTA, en las estaciones de monitoreo ubicadas en los observatorios de Mérida, Chetumal, Villa Hermosa y Veracruz. Los contenidos de tritio varían de 1.26 a 1.98 UT e indican los valores que presenta el agua de recarga en la zona. Para estimar la edad aparente del agua subterránea se tomó el promedio de los valores registrados en las cuatro estaciones de monitoreo isotópico, correspondiendo 1.6 UT (Figura 10.15).

El análisis de los datos, se puede observar que hay cuatro grupos de aprovechamientos caracterizados con los siguientes contenidos de tritio: El pozo P2 Silvituc y el Manantial el Chorro con aproximadamente 1.0 UT (Grupo 1), un segundo grupo con valores que van de 0.58 a 0.94 unidades de tritio integrada por los pozos N. Veracruz, Zoh Laguna, El Cedral y Caobas Nuevo 2 (Grupo 2). Un tercer grupo con contenidos de tritio menores al nivel de medición, de los cuales podríamos concluir que no contienen tritio formado por los aprovechamientos R. 3 Reyes y M. Crescencio (Grupo 3). Finalmente el grupo formado por los aprovechamientos recargados con agua superficial proveniente del lago Silvituc, formado por los aprovechamientos P2 Silvituc y P3 Silvituc (Grupo 4).

De acuerdo con los contenidos de tritio de los aprovechamientos, los tiempos de residencia de los flujos subterráneos corresponden a aguas modernas, es decir infiltradas en los últimos treinta años, se pueden establecer de la siguiente manera (Figura 10.15):

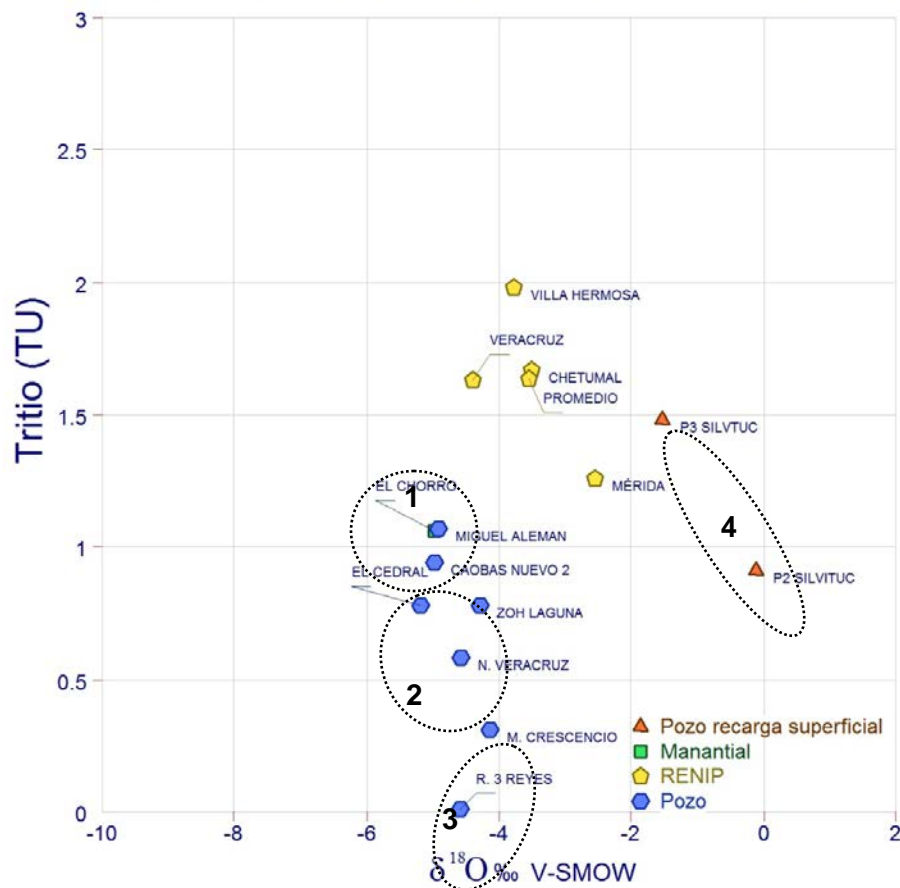
Grupo 1: Tiempos de residencia de 8 años

Grupo 2: Tiempos de residencia de 12.31 años

Grupo 3: Tiempos de residencia de más de tres décadas

Grupo 4: El Pozo 3 Silvituc capta agua superficial muy reciente, presenta contenidos de tritio similares al agua de lluvia y el Pozo 2 Silvituc, aun cuando capta agua superficial proveniente del lago Silvituc, presenta tiempos de residencia del orden de una década.

### Acuífero Xpujil, Gráfica Oxígeno 18 Vs. Tritio Ambiental



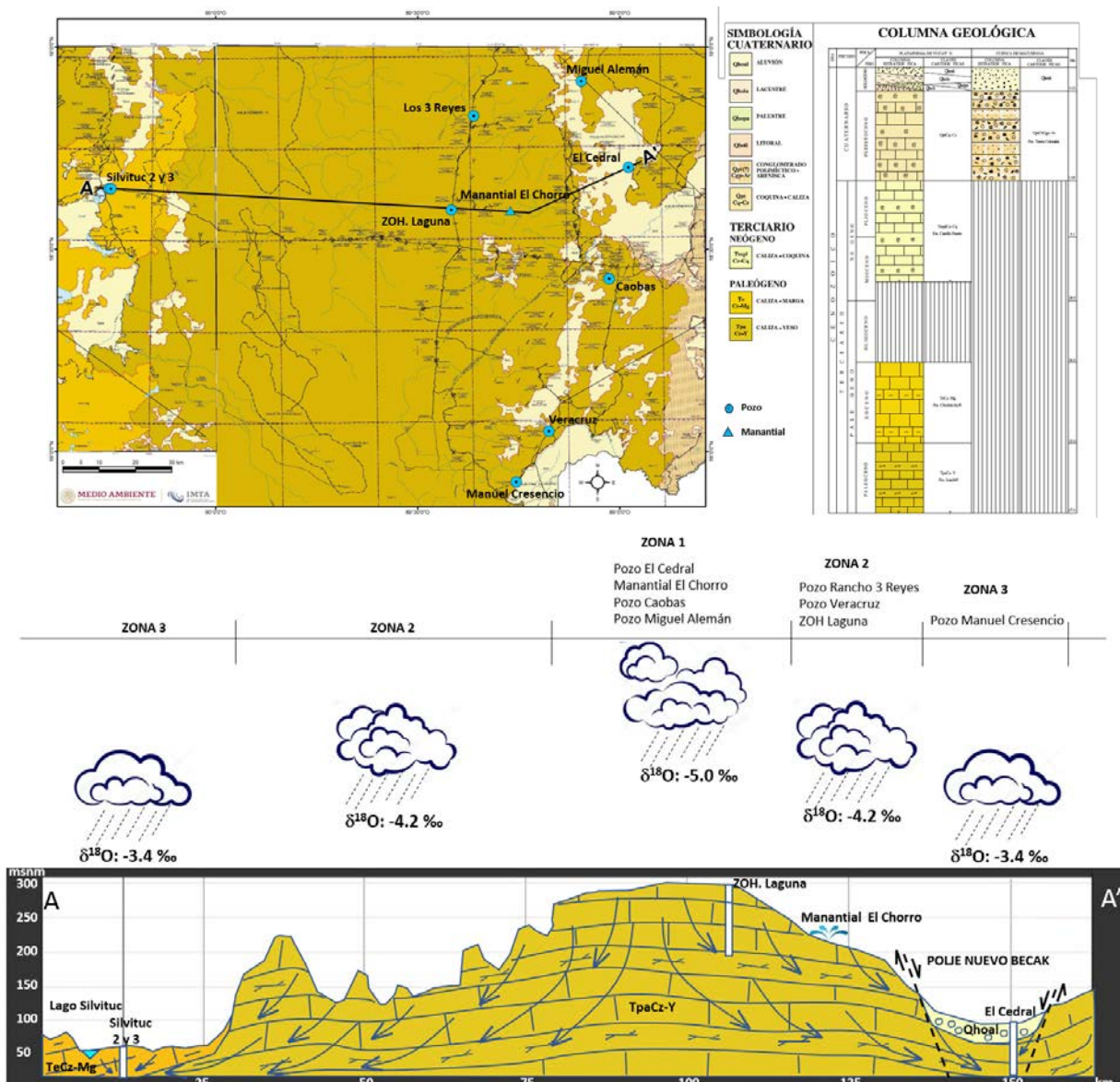
**Figura 10.15** Contenido de tritio ambiental Vs.  $\delta^{18}\text{O}$  de los aprovechamientos muestreados, junto con los valores correspondientes de cuatro estaciones de la RENIP.

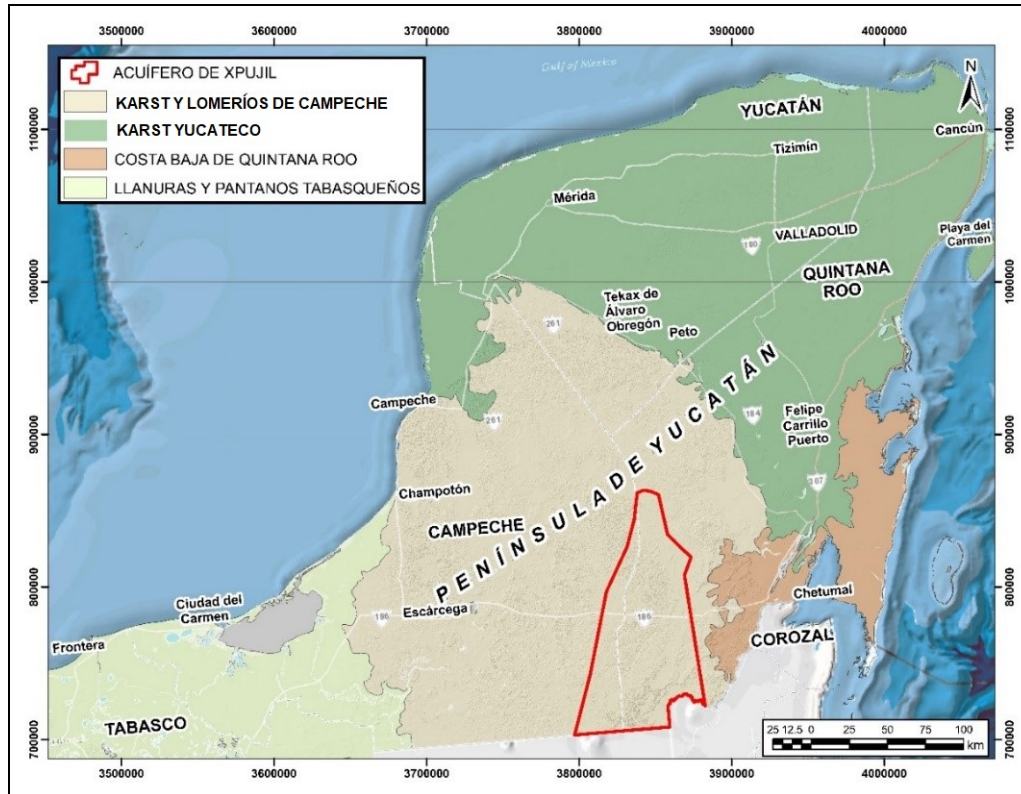
A partir de los resultados obtenidos, se propone un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del acuífero Xpujil, caracterizado por tener recarga de agua de lluvia con composiciones isotópicas con valores promedio  $\delta^{18}\text{O} = -3.9\text{‰}$  V-SMOW y  $\delta^2\text{H} = -24.2\text{‰}$  V-SMOW (Figura 10.16).

El acuífero está localizado en una plataforma de rocas calcáreas marinas en la Provincia fisiográfica Península de Yucatán, la cual se subdivide en 3 subprovincias fisiográficas: Karst y Lomeríos de Campeche, Karst Yucateco, y Costa Baja de Quintana Roo (Figura 10.17). La subprovincia Karst y Lomeríos de Campeche (Figura 10.17) está constituida por una serie de lomas que alcanzan alturas de 133 a 300 m, constituida por caliza cristalina dolomitizada y silicificada, con intercalaciones o niveles de yeso y margas, contiene también esporádicos nódulos y bandas delgadas de pedernal (Figura 10.16). La naturaleza del terreno a través del cual fluye el agua subterránea da lugar a las familias hidrogeoquímicas señaladas en el apartado de hidroquímica. La localización de las zonas de recarga efectiva del acuífero están definidas por el

contenido de isótopos estables de H y O, característicos del efecto de altitud causado por la fisiografía del terreno (Figura 10.16).

Los cortos tiempos de residencia del agua subterránea son típicos de roca altamente fracturada, con oquedades e intersticios causados por disolución de la roca, típicos de acuíferos altamente karstificados. La percolación de las aguas meteóricas facilita la disolución del carbonato de calcio y yesos, formando estructuras kársticas como dolinas altamente intercomunicadas.





**Figura 10.17 Subprovincias fisiográficas de la Península de Yucatán (datos geográficos de la dirección general de geografía, INEGI). Resaltando con línea roja el acuífero de Xpujil.**

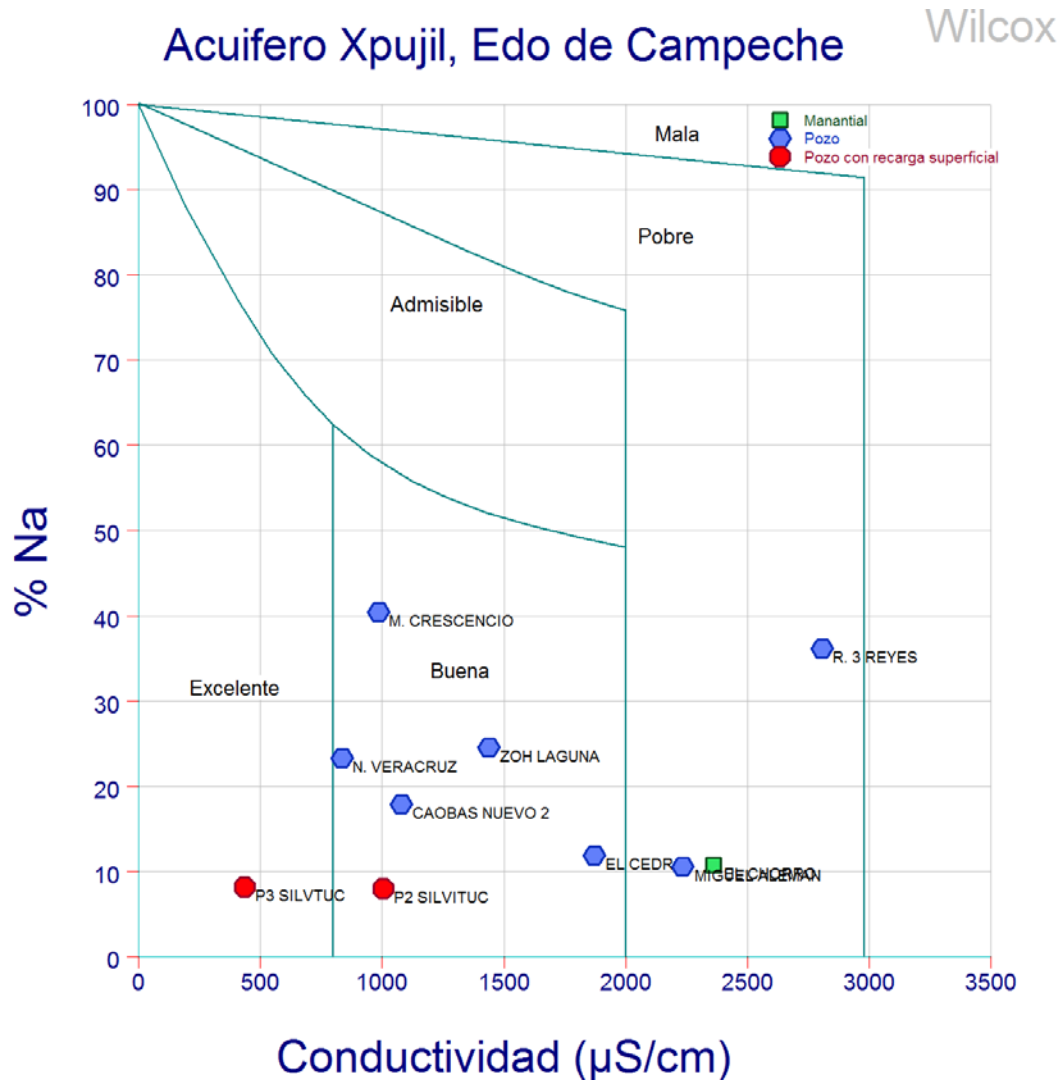
#### 10.5.4 Calidad del agua de los aprovechamientos para riego

Debido a la creciente demanda de agua para riego, se ha optado por la utilización de agua de diversa procedencia, no solamente las aguas superficiales y subterráneas, sino también en algunos casos la reutilización de aguas residuales. Por ello, la efectividad de la irrigación depende de la calidad del agua de riego. Con la finalidad de establecer la calidad agronómica de las aguas del acuífero Xpujil, en el presente informe se han aplicado diagramas químicos para determinar los riesgos de salinidad y sodicidad que podrían causar daños directos sobre los cultivos (Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1985).

Los constituyentes salinos son principalmente cationes de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^{++}$  y  $\text{K}^{+}$ ; entre los aniones más frecuentes figuran los  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , y  $\text{F}^-$ . La mayoría proceden de la disolución y alteración de rocas calizas, yesos, margas y arcillas. Estos constituyentes químicos, aun cuando presenten concentraciones bajas, pueden producir daños directos sobre los cultivos, convirtiendo al riego en fuente de sales y en la causa de salinización del suelo.

El diagrama de clasificación de Wilcox expresa la salinidad del agua como Conductividad Eléctrica (CE) a 25°C, en unidades de  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y mantiene para la alcalinidad el criterio de porcentaje de  $\text{Na}^+$  (Figura 10.18). El diagrama indica que las aguas subterráneas presentan calidades diferentes, desde excelente hasta pobre. El

agua de los pozos Rancho 3 Reyes, Miguel Alemán y el manantial El Chorro califican como agua de calidad pobre para la agricultura. Los pozos El Cedral, P2 Silvituc, M. Crescencio, N. Veracruz, Caobas Nuevo 2 y Zoh Laguna como agua de calidad buena y, únicamente el pozo P3 Silvituc presenta calidad excelente.



**Figura 10.18** Las aguas de los pozos presentan diferentes calidades para irrigación. Los pozos Rancho 3 Reyes, Miguel Alemán y el manantial El Chorro con calidad pobre; los pozos El Cedral, P2 Silvituc, M. Crescencio, N. Veracruz, Caobas Nuevo 2 y Zoh Laguna calidad buena y, únicamente el pozo P3 Silvituc calidad excelente.



## 10.6 Análisis de tecnologías existentes y prototipo

### 10.6.1 Revisión de las variables de la calidad y niveles del agua del acuífero

Para el estudio de las variables de la calidad y niveles del agua del acuífero de Xpujil (0405), se analizaron los datos del estudio del INEGI (2016) correspondientes a la temporada de estiaje del año 2016, los cuales representan la condición más desfavorable.

Las muestras provienen de pozos, cenotes, norias, manantiales y lagos; las muestras de los cuerpos de agua se obtuvieron de la parte superficial, mientras que la de pozos proviene de la profundidad de bombeo.

Las variables de calidad analizadas incluyen:

Campo: Temperatura, Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Totales Disueltos (STD) y pH.

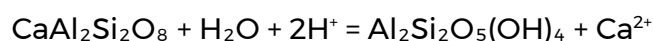
Laboratorio:  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , Dureza, Relación de Absorción de Sodio (RAS), pH, CE y STD.

Los análisis de laboratorio tienen una electroneutralidad inferior al 6% (Hem, 1985), mientras que la técnica de interpolación utilizada para en los mapas fue kriging.

#### ***1:2 Calcio***

El calcio es el más abundante de los metales terrestres alcalinos y es un componente importante de muchos minerales de rocas comunes. Es un elemento esencial para todas las formas de vida de las plantas y animales y es un componente importante de los solutos que contiene el agua natural. El calcio solo tiene un estado de oxidación "Ca". Su comportamiento en sistemas acuosos naturales está gobernado generalmente por la disponibilidad de sólidos solubles que contengan calcio y por el equilibrio solución - fase gaseosa que involucran especies de dióxido de carbono, o por la disponibilidad de azufre en forma de sulfato. El calcio también participa en reacciones de intercambio catiónico en aluminosilicatos y otras superficies minerales.

El calcio es un componente esencial de muchos minerales de rocas ígneas, especialmente de la cadena de silicatos de piroxenos y anfíboles y feldespatos. El grupo de minerales feldespato plagioclasa representa mezclas en varias proporciones de los miembros finales albita,  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  y anortita,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ . El calcio también ocurre en otros minerales de silicatos que se producen en el metamorfismo. Se espera, por lo tanto, algo de calcio en el agua que ha estado en contacto con rocas ígneas y metamórficas. La concentración generalmente es baja debido principalmente a que la tasa de descomposición de la mayoría de los minerales de roca ígnea es lenta. La descomposición de anortita puede ser representada como:



La composición normal del feldespato plagioclasa se encuentra entre las formas de sodio puro y calcio puro, y su descomposición, por lo tanto, producirá generalmente calcio y sodio y algo de sílice soluble. Bajo algunas condiciones la solución puede alcanzar la saturación con respecto al carbonato de calcio.

Las formas más comunes de calcio en rocas sedimentarias son los carbonatos  $\text{CaCO}_3$  es sus dos formas cristalinas: calcita y aragonita. El mineral dolomita se puede representar como  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . La piedra caliza se compone principalmente de calcita con mezclas de carbonato de magnesio y otras impurezas. Una roca carbonatada se denomina comúnmente "dolomita" si el magnesio está presente en cantidades próximas a la relación molar teórica 1: 1 con el calcio. Otros minerales de calcio comunes en los sedimentos incluyen a los sulfatos de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y más raramente el fluoruro, y la fluorita ( $\text{CaF}_2$ ). El calcio también es un componente de algunos tipos de zeolitas y montmorillonita.

En la arenisca y otras rocas detríticas, el carbonato de calcio está comúnmente presente como cementante entre las partículas o rellenando parcialmente los intersticios. El calcio también está presente en forma de iones adsorbidos en superficies minerales cargadas negativamente de suelos y rocas. Debido a que los iones divalentes se mantienen más fuertemente que los iones monovalentes en los sitios de carga superficial, y debido a que el calcio es generalmente el ion divalente dominante en solución, la mayoría de estos sitios están ocupados por iones de calcio en sistemas aguas subterráneas o ríos.

- a) Características químicas. Sales desde moderadamente solubles a muy solubles. Es muy fácil de precipitar como  $\text{CaCO}_3$ . Su química va muy asociada a la de los iones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  en muchas aguas naturales, pudiéndose precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial de  $\text{CO}_2$ . Puede ser afectado por cambio de bases.
- b) Concentraciones. Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a 600 ppm en aguas con selenio. El agua del mar contiene alrededor de 400 ppm. Excepcionalmente se puede tener 50 000 ppm en salmueras de  $\text{Cl}_2\text{Ca}$ .
- c) Nocividad y toxicidad. El mayor inconveniente va asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones.
- d) Toma de muestras. Evitar el escape de gases, llenando bien la botella y cerrándola. Evitar cambios de temperatura. Puede precipitarse fácilmente como  $\text{CaCO}_3$ . Puede estabilizarse acidulando por separado una porción de la muestra.

El calcio procede de:

- Disolución de calizas, dolomías, yeso y anhidrita.
- Ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos.
- Disolución de cemento calcáreo de muchas rocas.

- Concentración del agua de lluvia.

Está frecuentemente en estado de saturación y su estabilidad en solución depende del equilibrio  $\text{CO}_2$ -  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{CO}_3^{2-}$ .

Puede precipitarse con facilidad y es muy afectado por el cambio iónico.

Los valores de calcio en el agua subterránea están fuertemente relacionados con las abundantes rocas carbonatadas en toda la Península de Yucatán y se observan zonas con altas concentraciones en la zona del acuífero de Xpujil (Figura 10.19), las cuales se incrementan durante la época de lluvia por la disolución de los carbonatos (INEGI, 2016). La normativa mexicana no establece un límite para uso y consumo humano.



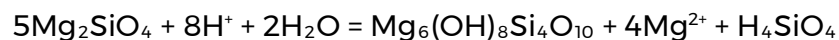
**Figura 10.19 Concentraciones de Calcio en mg/L (INEGI, 2016).**

### **1.3 Magnesio**

El magnesio es un metal alcalinotérreo y solo tiene un estado de oxidación de importancia en la química del agua:  $Mg^{2+}$ . Es un elemento común y es esencial en la nutrición de animales y vegetales.

En algunos aspectos de la química del agua, se puede considerar que el calcio y el magnesio tienen efectos similares, como por ejemplo sus contribuciones a la dureza. Sin embargo, el comportamiento geoquímico del magnesio es sustancialmente diferente al del calcio. Los iones de magnesio son más pequeños que los del sodio o calcio y pueden acomodarse en el espacio central de seis moléculas de agua coordinadas octaédricamente. La capa de hidratación del ion de magnesio no es tan fuerte como la del aluminio, pero el efecto de la hidratación es mucho mayor para el magnesio que para los iones más grandes de calcio y sodio. La tendencia de los compuestos de magnesio cristalino precipitados a contener agua o hidróxido probablemente esté relacionada con esta tendencia a la hidratación.

En las rocas ígneas, el magnesio es típicamente un componente principal de los minerales ferromagnesianos de color oscuro. Estos incluyen a la olivina, los piroxenos, los anfíboles y las micas de color oscuro, junto con varias especies menos comunes. En rocas alteradas, se producen especies minerales de magnesio como el clorito y la serpentina. Las formas sedimentarias de magnesio incluyen carbonatos como la magnesita e hidromagnesita, el hidróxido de brucita y las mezclas de magnesio con carbonato de calcio. La dolomita tiene una estructura cristalina definida en la que los iones de calcio y magnesio están presentes en cantidades iguales. La alteración de la olivina magnesiánica (forsterita) a serpentinita puede escribirse de la siguiente forma:



Esto es algo análogo a las reacciones de meteorización del feldespato y como producto de la alteración del sólido, se obtiene la serpentinita. La reacción, como la alteración de otros silicatos, no es reversible y no puede tratarse como un equilibrio químico. Sin embargo, se puede esperar que los productos liberados participen en reacciones adicionales.

- a) Características químicas. Propiedades similares a las del ion calcio, pero más soluble y algo más difícil de precipitar.
- b) Concentraciones. Entre 1 y 100 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a veces a algunos miles de ppm en aguas salinas o salmueras. El agua del mar contiene 1200 ppm.
- c) Nocividad y toxicidad. Propiedades laxantes y da sabor amargo al agua de bebida si hay algunos centenares de ppm. Contribuye a la dureza del agua y además a pH elevado puede dar  $Mg(OH)_2$  incrustante.

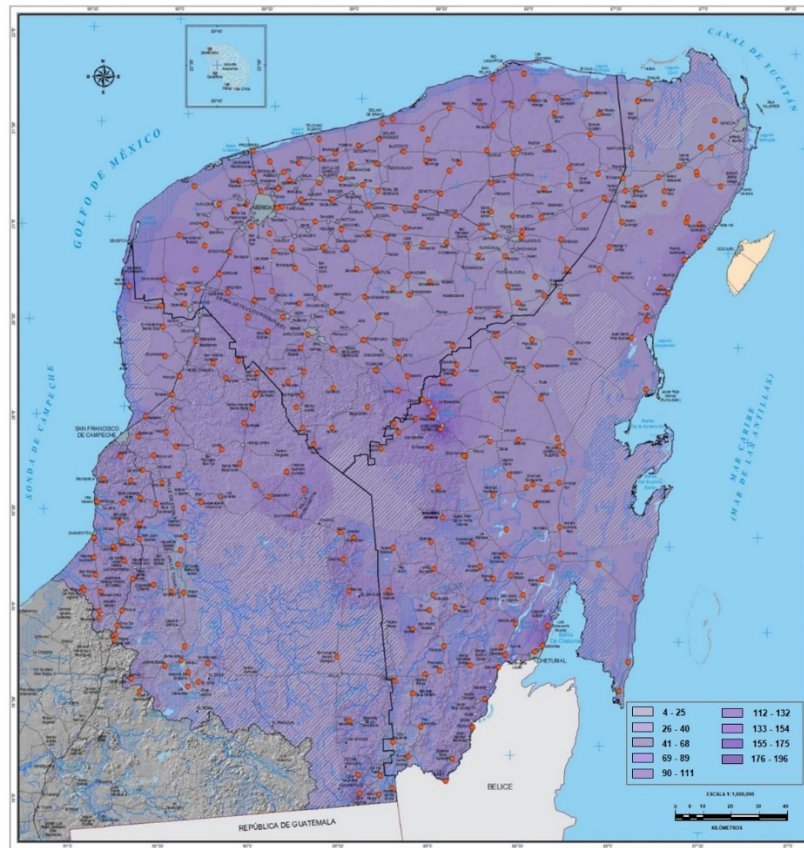
- e) Toma de muestras. En principio las mismas precauciones indicadas para el  $\text{Ca}^{++}$ , pues, aunque no suele precipitar, si se precipita  $\text{Ca}^{++}$  entre el análisis del mismo y la determinación de la dureza, se tiene un error que puede ser importante y la relación  $\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$  puede quedar notablemente aumentada, desvirtuando las consideraciones geoquímicas que se realicen.

El magnesio procede de:

- Disolución de dolomías y calizas dolomíticas.
- Ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos.
- Localmente del lavado de rocas evaporitas magnésicas (carnalita, kaiserita, etc.).
- Mezcla con agua del mar.
- Contaminación industrial y minera.

Aunque se disuelve más lentamente es más soluble que el Ca y tiende a permanecer en solución cuando éste se precipita. Es afectado por el cambio iónico.

Los valores de magnesio en el agua subterránea siguen un comportamiento similar al calcio ya que ambos están fuertemente relacionados con las abundantes rocas carbonatadas y evaporitas en toda la Península de Yucatán; y se observan zonas con altas concentraciones en la zona centro del acuífero de Xpujil (Figura 10.20) (INEGI, 2016). La normativa mexicana establece un límite permitido de 0.15 mg/L para uso y consumo humano



**Figura 10.20 Concentraciones de Magnesio en mg/L (INEGI, 2016).**

#### **1.4 Sodio**

El sodio es el miembro más abundante del grupo de los metales alcalinos de la tabla periódica. Los otros miembros naturales de este grupo son litio, potasio, rubidio y cesio. En las rocas ígneas, el sodio es ligeramente más abundante que el potasio, pero en los sedimentos, el sodio es mucho menos abundante. Las cantidades de sodio que contienen los sedimentos de evaporitas y en solución en el océano son una parte importante del total. Todos los metales alcalinos ocurren en el estado de oxidación  $1^+$  y no participan en procesos redox. Los iones de sodio tienen un radio algo mayor que 1 angstrom y no son muy fuertemente hidratados.

Cuando el sodio se pone solución, tiende a permanecer en ese estado. No hay reacciones importantes de precipitación que puedan mantener bajas las concentraciones de sodio en el agua, de la misma manera en que la precipitación del carbonato controla las concentraciones de calcio. El sodio es retenido por adsorción en superficies minerales, especialmente por minerales que tienen alta capacidad de intercambio catiónico como las arcillas. Sin embargo, la interacción entre los sitios de la superficie y el sodio y otros iones monovalentes en general, es mucho más débil que las interacciones con los iones divalentes. Los procesos de intercambio de cationes en el sistema de agua dulce terminan por extraer iones divalentes de la solución y reemplazarlos con iones monovalentes.

De acuerdo a Clarke (1924), alrededor del 60 por ciento de la roca ígnea presente en la corteza exterior de la Tierra consiste de minerales de feldespato. Los feldespatos son tetresilicatos, con algo de aluminio sustituido por sílice y con otros cationes que compensan la deficiencia de carga positiva que resulta. Los feldespatos comunes son la ortoclasa y la microclina, que tienen la fórmula  $KAlSi_3O_8$ , y las series de plagioclasas que varían en composición desde albita,  $NaAlSi_3O_8$ , hasta anortita,  $CaAl_2O_8$ . Puede haber algo de sodio, sustituyendo el potasio en la ortoclasa y microclina.

El feldespato potásico es resistente al ataque químico. Sin embargo, las especies que contienen sodio y calcio son más susceptibles al intemperismo; proporcionan el metal catiónico y el sílice a la solución y comúnmente forman un mineral de arcilla con el aluminio y parte de la sílice original. Feth et al. (1964) en estudios de agua en terrenos graníticos ricos en feldespato de la Sierra Nevada de California y Nevada, descubrieron que, en general, los iones de calcio y sodio eran los cationes más importantes en el agua de arroyos y manantiales lo cual era un reflejo de su abundancia en el tipo de roca y de la velocidad a la que los minerales son atacados.

En los sedimentos resistentes, el sodio puede estar presente en granos minerales inalterados, como una impureza en el material cementante, o como cristales de sales de sodio fácilmente solubles depositadas en los sedimentos o dejadas en ellos por el agua salina que ingresó en algún momento posterior. Las sales solubles se disuelven fácilmente y se eliminan con bastante rapidez de los sedimentos de grano grueso después de que los cambios ambientales, como la elevación de la superficie terrestre o la disminución del nivel del mar, imponen un régimen de lavado con agua dulce. Durante las primeras etapas del lavado, el agua que sale de la formación puede tener altas concentraciones de sodio en solución. Los últimos vestigios de sal marina o agua connada pueden persistir durante largos períodos donde la circulación del agua se ve afectada.

En los sedimentos hidrolizados, las partículas normalmente son muy pequeñas y la circulación del agua a través del material se ve afectada. Por lo tanto, el agua atrapada en el sedimento cuando se depositó se puede retener con su carga de soluto durante largos períodos. Los hidrolizados incluyen una gran proporción de minerales arcillosos que tienen grandes capacidades de intercambio catiónico. Cuando las arenas y las arcillas están intercaladas, el agua y el sodio pueden ser retenidos por más tiempo en los estratos menos permeables durante flujo o circulación del agua dulce. Cuando tales secciones intercaladas son penetradas por pozos, el agua se extraerá principalmente de las secciones más permeables al principio. Se puede esperar que los bombeos prolongados y los descensos en la capa freática alteren los patrones de circulación del agua, y se puede inducir el movimiento de las soluciones salinas desde las capas de arcilla y lutita. Cuando esto ocurre a gran escala, se producirá un aumento sustancial en la concentración de sodio del agua bombeada. Kister y Hardt (1966) observaron este efecto en los pozos de riego de la cuenca de Santa Cruz en Arizona, donde se habían producido grandes descensos en los niveles de agua subterránea.

Las actividades humanas pueden tener una influencia significativa en las concentraciones de sodio en las aguas superficiales y subterráneas. El uso de sal para

descongelar carreteras en invierno y la inyección de salmuera provenientes de pozos petroleros, por ejemplo, ha tenido efectos regionales directos y notables. Algo menos directo, la reutilización del agua para riego comúnmente deja un residuo que es mucho más alto en concentraciones de sodio que el agua original. El bombeo de agua subterránea altera los gradientes hidráulicos y puede inducir el movimiento lateral del agua de mar hacia acuíferos costeros de agua dulce.

En aguas diluidas con concentraciones de sólidos totales disueltos por debajo de 1,000 mg/L el sodio generalmente se encuentra en forma de iones de  $\text{Na}^+$ . Sin embargo, en soluciones más concentradas, es posible encontrar una gran variedad de iones complejos y pares de iones.

- a) Características químicas. Solubilidad muy elevada y muy difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases. Suele ir asociado al ion  $\text{Cl}^-$ , aunque no siempre sucede así. Las aguas naturales con elevados contenidos en  $\text{Na}^+$  suelen tener contenidos elevados en  $\text{F}^-$ .
- b) Concentraciones. Entre 1 y 150 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua del mar tiene alrededor de 10,000 ppm, las salmueras naturales pueden llegar a tener 100,000 ppm, siendo un límite que rara vez se sobrepasa el de 500 meq/l (110,000 ppm).
- c) Nocividad y toxicidad. Las aguas con concentraciones elevadas en sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la permeabilidad del suelo; son especialmente nocivas si las concentraciones de Ca y Mg son bajas. Aguas con contenidos elevados en  $\text{CO}_3\text{HNa}$  originan problemas de espumas en calderas.
- d) Toma de muestras. No se precisan precauciones especiales.

El sodio procede de:

- Ataque de feldespatos, feldespatoideos y otros silicatos.
- Lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen.
- Mezcla con agua del mar.
- Localmente de la disolución de sal o sulfato sódico natural (sales evaporitas).
- Raras veces de emanaciones y fenómenos relacionados con procesos magmáticos.
- Contaminación urbana e industrial.
- Concentración del agua de lluvia.

Es muy soluble y es el catión más abundante en el agua del mar. Es muy afectado por el cambio de bases.

Los valores de sodio en el agua subterránea se asocian con la disolución de rocas evaporíticas en toda la Península de Yucatán; se observan zonas con menores concentraciones en la zona centro - acuífero de Xpujil (Figura 10.21), debido



probablemente a la infiltración del agua de lluvia (INEGI, 2016). La normativa mexicana establece un límite permitido de 200 mg/L para uso y consumo humano.



**Figura 10.21 Concentraciones de Sodio en mg/L (INEGI, 2016).**

### **1.5 Potasio**

El potasio es ligeramente menos común que el sodio en las rocas ígneas, pero es más abundante en las rocas sedimentarias. En el océano, la concentración de potasio, aunque sustancial, es mucho menor que la del sodio. Las cifras muestran el comportamiento muy diferente de estos dos metales alcalinos en los sistemas naturales. El sodio tiende a permanecer en solución de manera bastante persistente una vez que se ha liberado de las estructuras minerales de silicatos. El potasio se libera con mayor dificultad de los minerales de silicato y exhibe una fuerte tendencia a ser reincorporado a productos sólidos del intemperismo, especialmente en ciertos minerales arcillosos.

En la mayoría de las aguas naturales, la concentración de potasio es mucho más baja que la concentración de sodio. Otro factor importante en el comportamiento hidrogeoquímico del potasio es su interacción con la biosfera, especialmente la vegetación y el suelo. El potasio es un elemento esencial tanto para plantas como para animales. El mantenimiento de una fertilidad óptima del suelo implica proporcionar un suministro adecuado de potasio. El potasio está presente en los vegetales y su

disponibilidad se reduce en el suelo agrícola por la cosecha de cultivos, así como por el flujo y el escurrimiento.

Los principales minerales de potasio de las rocas de silicato son los feldespatos ortoclasa y microclina (KAIS y OH), las micas y el feldespato leucita (KAISi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>). Los feldespatos de potasio son resistentes al ataque del agua y presumiblemente son alterados a iones de sílice, arcilla y potasio por el mismo proceso que otros feldespatos, solo que más lentamente.

En sedimentos, el potasio está presente comúnmente en feldespato inalterado, partículas de mica o en illita u otros minerales arcillosos. Las rocas de evaporíticas pueden incluir localmente capas de sales de potasio y constituir una fuente de alta concentración de potasio en salmueras. Las cenizas de madera han sido utilizadas por los humanos como fuente de potasa durante muchos siglos.

En aguas naturales diluidas en las que la suma de sodio y potasio es inferior a 10 mg/L, no es inusual que la concentración de potasio sea igual o incluso superior a la concentración de sodio. El agua de mar contiene 390 mg/L de potasio.

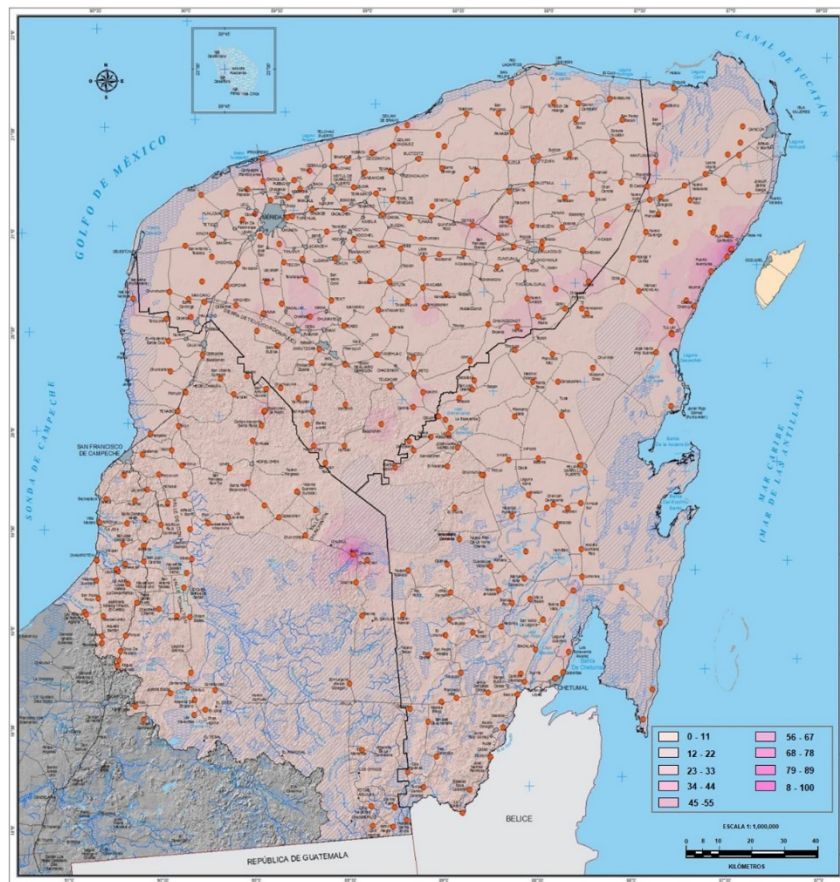
- a) Características químicas. Solubilidad muy elevada y difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases y es absorbido de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita), para formar parte de su estructura, circunstancia que lo diferencia notablemente del Na<sup>+</sup>. Por ello las aguas naturales, a pesar de la mayor abundancia de K en muchas rocas, tienen mucho menos K<sup>+</sup> que Na<sup>+</sup> excepto en las muy diluidas.
- b) Concentraciones. Entre 0,1 y 10 ppm en aguas dulces. Extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de ppm y sólo muy raramente se puede tener salmueras de hasta 100 000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 400 ppm.
- c) Nocividad y toxicidad. No presenta problemas especiales a las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas.
- d) Toma de muestras. No se precisan precauciones especiales.

El potasio procede de:

- Ataque de la ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc.).
- Localmente de la disolución de sales potásicas naturales (silvinita, carnalita, etc.).
- En pequeña cantidad de aportes del agua de lluvia.
- En ocasiones procede de contaminación industrial, minera y agrícola (abonos).

Tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas por lo que  $rK/rNa$  es mucho menor que 1, excepto en aguas muy diluidas en las que ese valor puede llegar a ser 1.

En general los valores de potasio en el agua subterránea son menores a 10mg/L aunque se presentan valores mayores en la Península de Yucatán producto del uso de abonos ricos en este componente; se observa una zona al norte de Xpujil con altas concentraciones de potasio (Figura 10.22), lo cual puede deberse a un problema local de contaminación de origen antropogénico (INEGI, 2016). La normativa mexicana no establece un límite permitido para uso y consumo humano.



**Figura 10.22 Concentraciones de Potasio en mg/L (INEGI, 2016).**

## 1.6 Dureza

El concepto de dureza como una evaluación de ciertas propiedades químicas del agua se ha arraigado profundamente en la literatura de la calidad del agua. Sin embargo, a pesar del uso generalizado, la propiedad de dureza es difícil de definir exactamente y existen varias definiciones que son de uso común.

Los términos "duro" y "blando" están contenidos en un discurso sobre la calidad del agua por Hipócrates (460-377 AC), citado de la siguiente manera por Baker (1949): "Considere las aguas que usan los habitantes, ya sean pantanosas y blandas, o duras y fluyendo de zonas elevadas y rocosas \*\*\*". El uso de los términos allí podría tener algo del significado moderno; si en las partes montañosas altas conocidas por Hipócrates

estuviera presente la roca caliza. Con los años, la propiedad de la dureza se ha asociado con los efectos observados en el uso de jabón o con las incrustaciones dejadas por algunos tipos de agua cuando se calientan. Si las reacciones con el jabón son las únicas consideradas, se podría decir que la dureza representa la capacidad de consumo de agua del jabón. Dicho efecto es el resultado de los cationes que forman compuestos insolubles con el jabón. A mediados del siglo XIX, se desarrolló un procedimiento para la valoración de la dureza con una solución de jabón estándar.

Debido a que la mayor parte del efecto observado con el jabón resulta de la presencia del calcio y el magnesio, la dureza ahora se define generalmente solo en términos de estos componentes, con algunas reservas bastante indefinidas sobre las interferencias (ASTM, 1964). Otros iones que puede precipitar el jabón incluyen al  $H^+$  y todos los cationes metálicos polivalentes, aunque sus concentraciones son insignificantes en aguas subterráneas.

Debido a que la dureza es una propiedad no atribuible a un solo elemento, es necesario utilizar alguna convención para expresar concentraciones en términos cuantitativos. Por lo general, esto consiste en informar la dureza en términos de una concentración equivalente de carbonato de calcio. En análisis de agua, la dureza se calcula multiplicando la suma de miliequivalentes por litro de calcio y magnesio por 50. El valor de la dureza resultante generalmente se denomina "dureza como  $CaCO_3$ " en los datos tabulados. La misma cantidad a veces se denomina "dureza de calcio + magnesio" o "dureza total".

Cuando se reporta la dureza de carbonatos se incluye esa parte de la dureza equivalente al bicarbonato + carbonato (o alcalinidad). Si la dureza excede la alcalinidad (en miligramos por litro de  $CaCO_3$  u otras unidades equivalentes), el exceso se denomina "dureza de no-carbonatos" y con frecuencia se reporta en los análisis de agua.

Las determinaciones de dureza tienen un valor limitado en los estudios geoquímicos. Los procedimientos analíticos modernos pueden proporcionar valores separados del calcio y el magnesio prácticamente tan fácilmente como los combinados. En la mayoría de los análisis de agua los valores de dureza se calculan a partir de las concentraciones del calcio y el magnesio.

Los adjetivos "duro" y "suave" aplicados al agua son inexactos, y algunos escritores han tratado de mejorar esta situación agregando adverbios calificados. Durfor y Becker (1964) propusieron la siguiente clasificación:

<b>Dureza (mg/L de <math>CaCO_3</math>)</b>	<b>Descripción</b>
0-60	Suave
61-120	Moderadamente dura
121-180	Dura
> 180	Muy dura

Los estándares de la dureza del agua han tendido a volverse más rigurosos con los años. Muchos sistemas de abastecimiento públicos de agua dan tratamiento de ablandamiento al agua a menos de 100 mg/L de dureza. La OMS (1971) sugirió un límite máximo de 500 mg/L.

La dureza en el agua utilizada para fines domésticos no se vuelve particularmente objetable hasta que alcanza un nivel de 100 mg/L más o menos. La dureza puede exceder en gran medida este nivel, y en muchos lugares, especialmente donde las aguas han estado en contacto con rocas caliza o yeso, es común encontrar valores de 200 o 300 mg/L o más. A estos valores la dureza se hace notable en todos los usos y se vuelve cada vez más problemática a medida que aumenta su concentración. El agua en contacto con formaciones de yeso, pueden tener 1,000 mg/L o más de dureza.

En los últimos años, algunos autores han reportado aparentes correlaciones estadísticas entre la dureza y otras propiedades de las fuentes de agua potable y las tasas de mortalidad por enfermedades cardiovasculares (Muss, 1962; Kobayashi, 1957). Otros autores respaldan la hipótesis de que el agua dura proporciona cierta protección contra las enfermedades cardíacas debido a su mayor contenido de magnesio (Neri et al., 1975).

- a) Definiciones. La dureza mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones. Las definiciones actuales la identifican con el contenido en iones alcalinotérreos, esencialmente  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ .

Dureza total (Dt) = contenido total en  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ .

Dureza permanente (Do) = contenido total en  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$  después de ebullición (se precipitan los carbonatos).

Dureza temporal o carbonatada (Dc) = total de calcio y magnesio asociados a  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{--}$ .

Por definición es  $Dt = Dc + Dp$ .

- b) Unidades. las mismas que la alcalinidad, en general ppm  $\text{CaCO}_3$ .

$D \text{ (meq/l)} = r \text{ Mg} + r \text{ Ca} ; r = \text{meq/l}$

$D \text{ (ppm } \text{CaCO}_3) = \text{Ca ppm}20 + \text{Mg ppm}12.50$

- c) Propiedades. las aguas se pueden clasificar por su dureza, pero esta clasificación varía con las localidades de acuerdo con las aguas disponibles. Aguas con menos de 50 ppm en  $\text{CaCO}_3$  se llaman blandas, hasta 100 ligeramente duras, hasta 200 moderadamente duras y por encima muy duras.

La dureza incluye el efecto del  $\text{Sr}^{++}$ , que es pequeño en general, al igual que el efecto del  $\text{Fe}^{++}$ . Al consumo de jabón también contribuyen ciertos metales pesados y ácidos libres.

- d) Valores. Generalmente entre 10 y 300 ppm  $\text{CaCO}_3$  pudiendo llegar a 1,000 y excepcionalmente a 2,000 o más. El agua del mar tiene 1,500 ppm  $\text{CaCO}_3$ .
- e) Toma de muestras. Evitar pérdida de gases.
- f) Efectos. Las aguas duras son incrustantes, producen gran consumo de jabón y dificultan la cocción de alimentos. las aguas muy blandas son agresivas y pueden no ser adecuadas para la bebida.

Los valores de la dureza en el agua subterránea representan la suma de la concentración de calcio y magnesio (Hem, 1985) con un límite máximo de 500 mg/L para uso y consumo humano; altos valores se presentan en el acuífero de Xpujil (Figura 10.23).

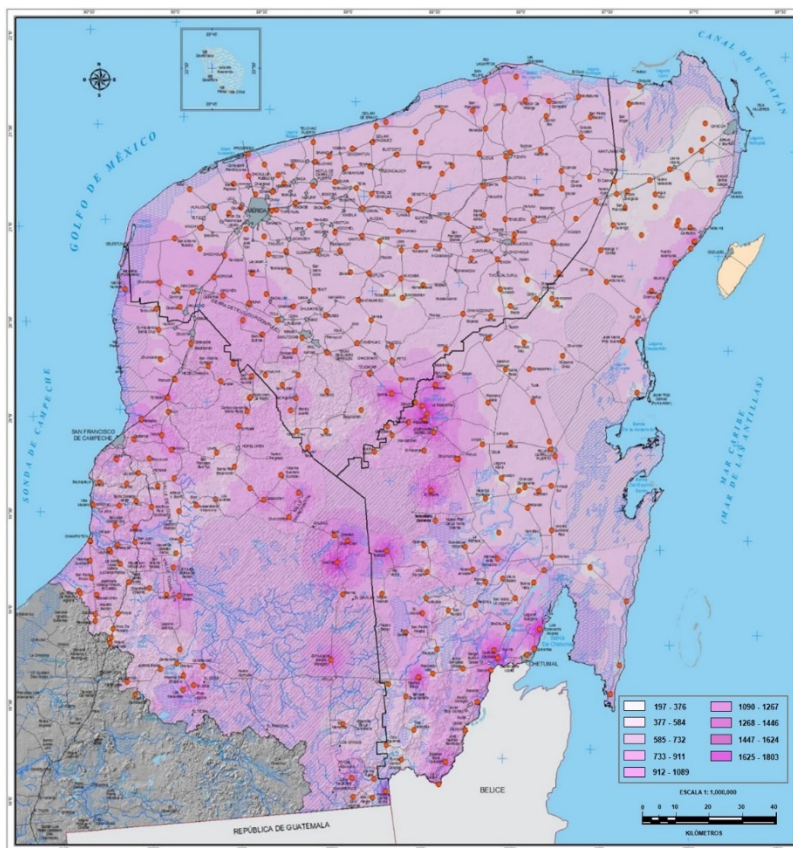


Figura 10.23 Concentraciones de Dureza en mg/L (INEGI, 2016).

### 1.7 Sulfato

Debido a que este elemento ocurre en estados de oxidación que van desde  $\text{S}^{2-}$  a  $\text{S}^{6+}$ , el comportamiento químico del azufre está fuertemente relacionado con las propiedades redox de los sistemas acuosos. El radio efectivo del ion azufre es de solo

0,20 angstrom y forma el anión  $\text{SO}_4$ , una estructura estable con cuatro oxígenos. El ion reducido,  $\text{S}^{2-}$ , forma sulfuros de baja solubilidad con la mayoría de los metales. Debido a que el hierro es común y está ampliamente distribuido, los sulfuros de hierro tienen una influencia sustancial en la geoquímica del azufre. El elemento es esencial en los procesos vitales de plantas y animales (Nriagu, 1978).

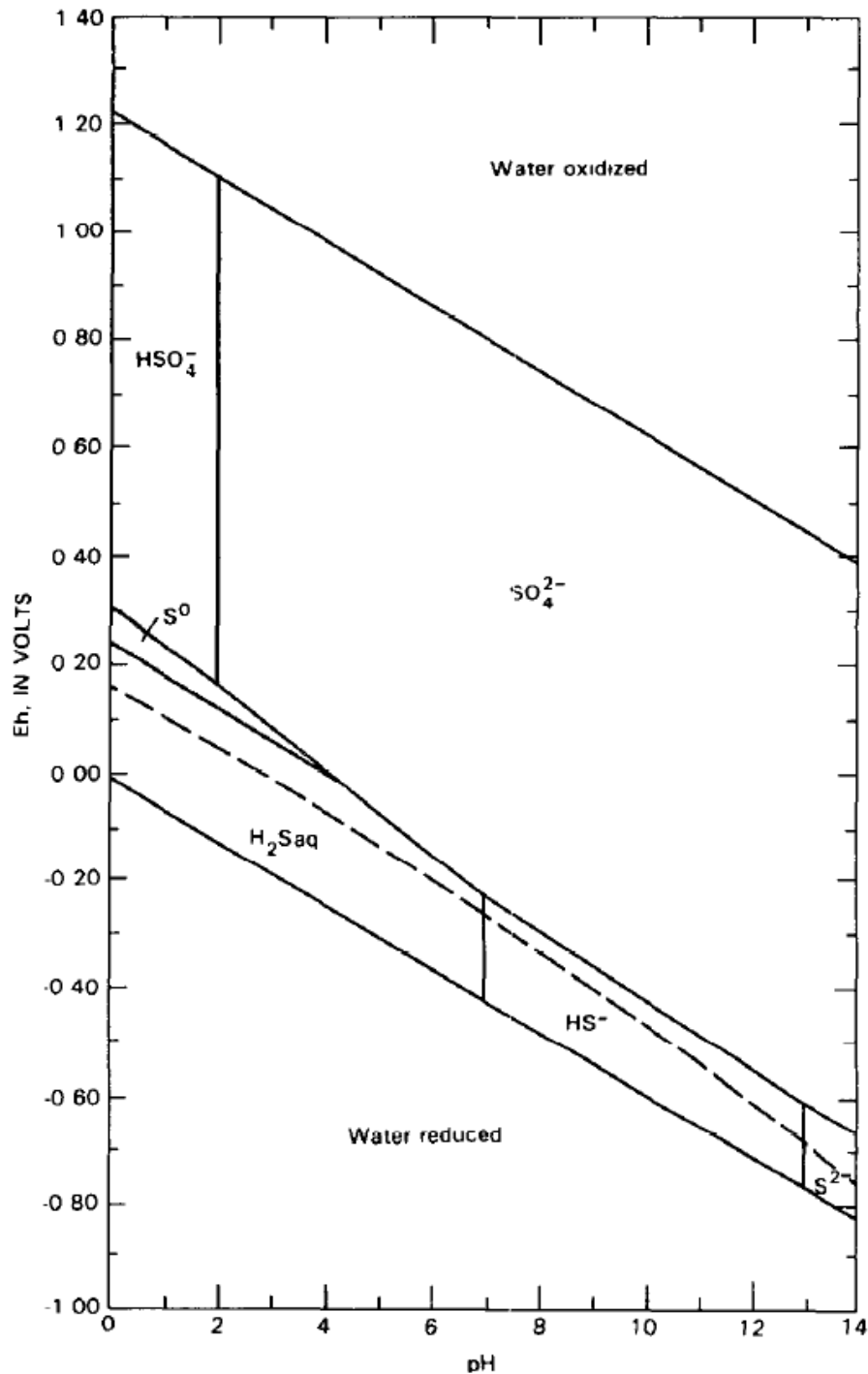


Figura 10.24 Diagrama Eh-pH del azufre.

En la Figura 10.24 se muestra las zonas de estabilidad de los iones de azufre oxidados ( $\text{HSO}_4^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), tres reducidos ( $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$ ,  $\text{HS}^-$  y  $\text{S}^{2-}$ ) y del azufre elemental.

El azufre se distribuye ampliamente en forma reducida en rocas ígneas y sedimentarias como sulfuros metálicos en concentraciones que constituyen minerales de importancia económica. Cuando los minerales de sulfuro se someten a la intemperie y en contacto con agua aireada, el azufre se oxida y produce iones de sulfato que se disuelven en el agua. Durante este proceso de oxidación se producen cantidades importantes de iones de hidrógeno. Los cristales de pirita se encuentran en muchas rocas sedimentarias y constituyen una fuente importante de hierro ferroso y sulfato para el agua subterránea. La pirita, en particular, se asocia comúnmente con depósitos biogénicos como el carbón, los cuales fueron formados en condiciones muy reductoras.

La oxidación de la pirita y otras formas de azufre también es promovida por los humanos: la combustión de combustibles y la fundición de minerales son las principales fuentes de sulfato para el agua natural. Los sulfuros orgánicos también pueden sufrir oxidación en los procesos naturales del suelo o en el tratamiento de residuos orgánicos. El azufre en forma reducida u oxidada puede volatilizarse y liberarse en grandes cantidades en regiones volcánicas y puede estar presente en el agua geotérmica, generalmente en forma oxidada. Ehrlich y Schoen (1967) estudiaron la importancia de las bacterias en la conversión de  $\text{H}_2\text{S}$  a  $\text{SO}_2$  en sistemas geotérmicos.

Sulfate occurs in certain igneous-rock minerals of the feldspathoid group, but the most extensive and important occurrences are in evaporite sediments. Calcium sulfate as gypsum,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , or as anhydrite, which contains no water of crystallization, makes up a considerable part of many evaporite-rock sequences. Barium and strontium sulfates are less soluble than calcium sulfate but are relatively rare. Sodium sulfate is formed in some closed-basin lakes, as noted in the discussion of sodium occurrence

El sulfato se produce en ciertos minerales de roca ígnea del grupo feldespatóide, pero las ocurrencias más extensas e importantes se encuentran en los sedimentos de evaporitas. El sulfato de calcio como yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , o como anhidrita, que no contiene agua de cristalización, constituye una parte considerable de muchas secuencias de rocas evaporíticas. Los sulfatos de bario y estroncio son menos solubles que el sulfato de calcio, y son relativamente raros. El sulfato de sodio se forma en algunos lagos de cuencas cerradas.

Los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) después de los bicarbonatos, son los principales aniones presentes en el agua; los cuales pueden presentarse de manera natural o como consecuencia de descargas de aguas industriales y por la utilización de fertilizantes agrícolas. Cuando los sulfatos se presentan de manera natural es posible que su origen se deba a algún depósito natural de minerales o por depositación atmosférica (www.skate.ky.us, 2002).

Las principales fuentes naturales de azufre disuelto en agua de ríos incluyen la meteorización de rocas, volcanes y los procesos biológicos o bioquímicos. Una fuente



adicional muy importante se atribuye a las actividades antropogénicas ya que contribuyen con azufre directamente al escurrimiento, y otras hacen circular azufre a la atmósfera, desde donde puede ser devuelto a la superficie de la Tierra por precipitación húmeda o seca.

La disociación del ácido sulfúrico no es completa en a pH bajos del agua natural y en algunas aguas ácidas el ion bisulfato ( $\text{HSO}_4^-$ ) constituye una parte considerable de la concentración total de sulfato. Como se muestra en la figura n,  $\text{HSO}_4^-$  es ion predominante por debajo de pH menores de 1.99. A una unidad de pH mayor, (2.99) aproximadamente el 10 por ciento del sulfato total estaría en esa forma, y a un pH de 3.99 solo el 1 %. Por lo tanto, por encima de un pH de 3.99, la contribución de  $\text{HSO}_4^-$  es insignificante.

La lluvia en áreas relativamente no contaminadas contiene bajas concentraciones de sulfato. Junge (1960) determinó el contenido promedio de sulfato en la lluvia en aproximadamente 60 puntos de muestreo en los Estados Unidos durante 1955 y 1956. Los valores obtenidos variaron desde aproximadamente 0.7 hasta más de 10 mg/L, aunque la mayor parte del país estuvieron entre 1.0 y 3.0 mg/L. En áreas urbano-industrial se observan los efectos locales de la contaminación del aire (Pearson y Fisher, 1971). Concentraciones de sulfato por debajo del nivel actual de la lluvia se presentan en aguas subterráneas que han sufrido reducción de sulfato.

Las aguas que muestran los efectos de los gases de azufre son comunes en algunas áreas geotérmicas, mientras que la oxidación de pirita u otros sulfuros metálicos es causa principal del drenaje ácido minero. Los efectos de la oxidación de la pirita en las aguas subterráneas a veces son más sutiles, ya que el hierro liberado puede precipitarse o sufrir intercambio catiónico mientras que el sulfato puede perderse por reducción a medida que el agua se mueve a través del acuífero.

Cuando un área natural que recibe poca lluvia y tiene solutos acumulados comienza a ser utilizada para el riego, el aumento del suministro de agua tiende a infiltrar los solutos por lo que aparecen en el agua de drenaje. El proceso es una aceleración de la lixiviación natural que aumenta las concentraciones y cargas de sólidos disueltos en el agua residual del área durante un período considerable. Incluso cuando el suelo está bastante libre de sales solubles, las concentraciones de sulfato y cloruro del agua residual que drena de un área irrigada son generalmente mucho más altas que en el suministro de agua original, debido al agua perdida por la evapotranspiración.

La mayoría de las personas pueden detectar el olor a huevo podrido del sulfuro de hidrógeno en aguas que tienen solo unas pocas décimas de miligramo por litro de este material en solución. Las aguas naturales sometidas a condiciones inusuales pueden alcanzar altas concentraciones de sulfuro de hidrógeno. Dichas aguas son bastante comunes en los procesos del petróleo.

- a) Características químicas. Sales moderadamente solubles a muy solubles, excepto las de Sr (60 ppm) y de Ba (2 ppm). En agua pura el  $\text{SO}_4\text{Ca}$  satura a 1500 ppm, y puede llegar hasta 7200 ppm en aguas salinas. En medios reductores con abundante materia orgánica puede sufrir una reducción

bacteriana, pero en general es estable. Es difícilmente precipitable químicamente ya que las sales solubles de Sr y Ba son muy escasas en la naturaleza, pero puede separarse de la solución por concentración si existe una evaporación importante.

- b) Concentraciones. Entre 2 y 150 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a 5000 ppm en aguas salinas si existe Ca y hasta 200000 si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras. El agua del mar contiene alrededor de 3000 ppm.
- c) Nocividad y toxicidad. Las aguas con elevado contenido en sulfato no quitan la sed y tienen sabor poco agradable y amargo. Por sí mismo o si va asociado a Mg o Na en cantidad importante puede comunicar propiedades laxantes. En cantidades elevadas puede ser perjudicial a las plantas. Más de algunos centenares de ppm perjudican a la resistencia del hormigón y cemento.
- d) Toma de muestras. No se precisan precauciones especiales.

El sulfato procede de:

- Lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o en ambiente marino.
- Oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias.
- Disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos.
- Concentración en el suelo de agua de lluvia.
- Las actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas pueden aportar cantidades importantes.
- Es afectado por la reducción de sulfatos. Puede precipitarse como  $\text{SO}_4\text{Ca}$  y más raramente en forma de  $\text{SO}_4\text{Sr}$  o  $\text{SO}_4\text{Ba}$  ya que a pesar de ser más insolubles precisan de la concurrencia de un ion que es muy escaso. La solubilidad del yeso en agua pura es de 2,095 g/l, pudiendo llegar a 7,300 si el contenido en  $\text{ClNa}$  es de 131 g/l.

Los valores del Sulfato en el agua subterránea de la Península de Yucatán se asocian con la disolución de rocas de yeso (Hem, 1985). La normativa mexicana se establece un límite permitido de 400 mg/L para uso y consumo humano. Se observan altos valores en el acuífero de Xpujil (Figura 10.25).



**Figura 10.25 Concentraciones de Sulfato en mg/L (INEGI, 2016).**

### ***1.8 Bicarbonato y carbonato***

#### **Alcalinidad**

Las propiedades de alcalinidad y acidez son características importantes de las aguas naturales y contaminadas y casi siempre se incluyen en las determinaciones químicas. Sin embargo, estas propiedades difieren de manera importante de las otras determinaciones reportadas en los análisis químicos. Ambas se definen como la capacidad de la solución para neutralizar ácidos o bases, y su propiedad es impartida por varias especies de solutos diferentes, y ambas se evalúan mediante titulación ácido-base. Los sistemas que tienen estas propiedades son comúnmente denominados por los químicos como "sistemas buffer".

La mayoría de las cantidades determinadas en los análisis químicos son funciones de "intensidad", es decir, son concentraciones reales de una especie disuelta particular en el momento del análisis. La medición del pH proporciona valores de concentraciones de  $H^+$  y  $OH^-$  en solución. Estas especies contribuyen, por supuesto, a la acidez o alcalinidad, pero dentro del rango de pH comúnmente encontrado en aguas naturales son constituyentes menores. Los principales solutos que constituyen la alcalinidad son impartidos al agua natural en cada una de las etapas del ciclo hidrológico por lo que constituyen una huella de la historia del agua.

La mayoría de las aguas naturales contienen cantidades importantes de especies de dióxido de carbono disuelto, que son la principal fuente de alcalinidad y pueden evaluarse convenientemente mediante titulación ácida. El dióxido de carbono disuelto no disociado contribuye a la acidez más que a la alcalinidad y también puede determinarse mediante titulación utilizando una solución básica.

La alcalinidad de una solución puede definirse como la capacidad de los solutos que contiene para reaccionar y neutralizar el ácido. La propiedad de la alcalinidad debe determinarse mediante titulación con un ácido fuerte.

Varias especies de solutos contribuyen a la alcalinidad del agua y la titulación con ácido no los identifica específicamente. La propiedad de alcalinidad se puede expresar en términos cuantitativos de varias maneras. La práctica más común es informarlo en términos de una cantidad equivalente de carbonato de calcio.

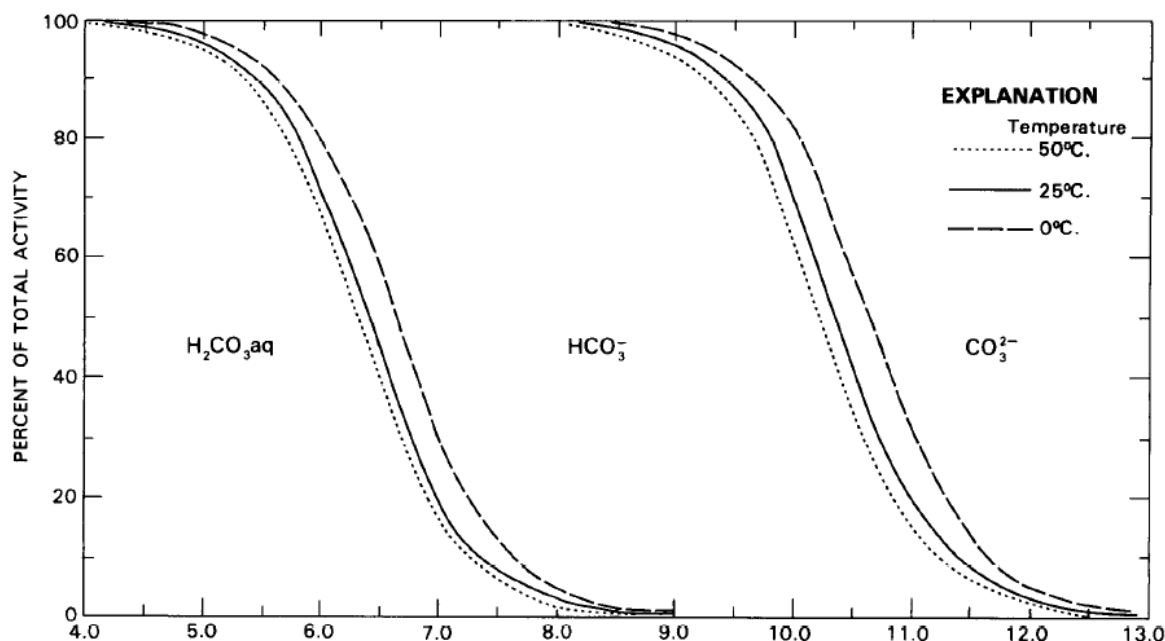
En casi todas las aguas naturales, la alcalinidad es producida por las especies disueltas de dióxido de carbono, bicarbonato y carbonato. Los análisis en la literatura geoquímica, siguen la convención de informar la alcalinidad titulada en términos de la cantidad equivalente de bicarbonato y carbonato. Los contribuyentes no carbonatos más importantes a la alcalinidad incluyen el hidróxido, silicato, borato y ligandos orgánicos, especialmente acetato y propionato.

A excepción de las aguas que tienen un pH alto (mayor de 9.50) y algunas otras que tienen una composición química inusual, especialmente el agua asociada con el petróleo y el gas natural o agua que tiene mucho carbono orgánico disuelto, la alcalinidad de las aguas naturales puede asignarse por completo al bicarbonato disuelto y carbonato sin errores graves.

#### Fuentes de alcalinidad

La principal fuente de especies de dióxido de carbono que producen alcalinidad en las aguas superficiales o subterráneas es la fracción de gas  $\text{CO}_2$  de la atmósfera, o los gases atmosféricos presentes en el suelo o en la zona no saturada. El contenido de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera es cercano al 0.03 por ciento en volumen. El aire de la zona del suelo y de la zona no saturada puede enriquecerse sustancialmente en dióxido de carbono, debido a la respiración de las plantas y la oxidación de la materia orgánica. Algunos sistemas naturales pueden tener otras fuentes de dióxido de carbono como la reducción biológica del sulfato y el metamorfismo de las rocas de carbonato.

Las especies de dióxido de carbono son participantes importantes en las reacciones que controlan el pH de las aguas naturales. Las reacciones entre las especies relacionadas con la alcalinidad,  $\text{CO}_2$  acuoso,  $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ , y las especies directamente relacionadas con el pH,  $\text{OH}^-$  y  $\text{H}^+$ , son relativamente rápidas y pueden evaluarse con modelos de equilibrio químico. Las relaciones entre las especies de dióxido de carbono disuelto y el pH se resumen en la figura 10.26 a temperaturas de 0 a  $50^\circ\text{C}$  y 1 atmósfera de presión.



**Figura 10.26. Diagrama de distribución de especies de CO<sub>2</sub>.**

La Figura 10.26 indica que las especies de dióxido de carbono contribuyen en pequeñas cantidades a la alcalinidad en pH menores de 4.0. El valor de la relación  $\text{HCO}_3^-:\text{H}_2\text{CO}_3$  cambia con la temperatura y la fuerza iónica.

### El ciclo del carbono

El patrón general de circulación del carbono a través de los diversos reservorios naturales del elemento se denomina "ciclo del carbono". En la literatura se dispone de estimaciones de las cantidades almacenadas en estos reservorios y de las tasas de intercambio, las cuales son de interés en la química del agua natural.

Los datos proporcionados por Wehmiller (1972) muestran que, con mucho, los depósitos más grandes son las rocas sedimentarias de carbonato y el carbono presente en otras formas en las rocas. Juntos, constituyen aproximadamente  $25 \times 10^{15}$  toneladas métricas de carbono. En contraste, la cantidad de carbono en solución en el océano es de aproximadamente  $0.035 \times 10^{15}$  toneladas. La atmósfera contiene aproximadamente una quinta parte de carbono que el océano, y la biosfera, materia orgánica viva y muerta, contiene aproximadamente una décima parte del océano. Las cantidades presentes en el agua dulce son mucho más pequeñas.

Muchos investigadores han estimado las tasas de intercambio de dióxido de carbono entre la atmósfera y la biosfera, aunque muchos factores siguen siendo poco conocidos. La tasa de intercambio de CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y el océano depende en parte de las tasas de mezcla, y el papel de los océanos en el control de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera no se ha cuantificado.

The impact of humans on the carbon cycle has been substantial. Mainly as a result of fossil fuel consumption, the CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere increased by 12fl ppm (by volume) during the decade of the 1970's (Hileman, 1982) and had reached a level of 335 ppm in 1980. The concentration of CO<sub>2</sub> that was present during the 19th century is less accurately known, but most scientists agree that the concentration has increased by about 10 percent during the past century or so. A continued increase in CO<sub>a</sub> concentration probably can be expected. Although there is no consensus as to the ultimate CO<sub>2</sub> concentration that will be attained, a value double the present concentration is often predicted for the 21<sup>st</sup> century. The consequences of such an increase cannot be predicted with certainty on the basis of present knowledge, but it is important to try to achieve a better understanding of the processes involved. One of the effects that is commonly predicted is a rise in average surface temperature of the Earth owing to the so-called greenhouse effect. Carbon dioxide absorbs infrared radiation from the Earth's surface and prevents the escape of some of the Sun's energy that would otherwise be lost (Hileman, 1982).

El impacto de los humanos en el ciclo del carbono ha sido sustancial. Como resultado del consumo de combustibles fósiles, la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera aumentó en 12 +/- 1 ppm (en volumen) durante la década de 1970 (Hileman, 1982) y alcanzó un nivel de 335 ppm en 1980. La concentración de CO<sub>2</sub> durante el siglo XIX se conoce con menos precisión, aunque la mayoría de los científicos están de acuerdo en que la concentración ha aumentado en aproximadamente un 10 por ciento durante el siglo pasado más o menos. Probablemente se pueda esperar un aumento continuo en la concentración de CO<sub>2</sub>. Aunque no hay consenso sobre la concentración final de CO<sub>2</sub> que se alcanzará, a menudo se predice un valor del doble de la concentración de 1982 para el siglo XXI. Las consecuencias de tal aumento no pueden predecirse con certeza sobre la base del conocimiento actual, pero es importante tratar de lograr una mejor comprensión de los procesos involucrados. Uno de los efectos que comúnmente se predice es un aumento en la temperatura promedio de la superficie de la Tierra debido al llamado efecto invernadero. El dióxido de carbono absorbe la radiación infrarroja de la superficie de la Tierra y evita el escape de parte de la energía del Sol que de otro modo se perdería (Hileman, 1982).

### **Ocurrencia del Bicarbonato y Carbonato**

Los suelos de regiones húmedas y templadas pueden agotar sus reservas de carbonato de calcio por lixiviación, y el agua subterránea somera puede tener pH bajos. Los minerales del suelo en tales zonas pueden adsorber H<sup>+</sup>, el cual podría liberarse por cambios en el entorno químico durante el paso del agua de recarga de los acuíferos. Si se asume que el pH de esta agua está controlado por el equilibrio del dióxido de carbono, se puede estimar que el agua contiene aproximadamente 160 mg/L de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, y esta sería la principal especie disuelta en el agua.

En entornos calcáreos, la circulación de agua rica en dióxido de carbono puede producir soluciones altamente sobresaturadas con respecto al CaCO<sub>3</sub> cuando se expone al aire. Tales soluciones pueden depositar grandes cantidades de carbonato de calcio como travertino cerca de los puntos de descarga.

La concentración del bicarbonato en aguas naturales generalmente se mantiene dentro de un rango moderado por los efectos del equilibrio de carbonato. La concentración en el agua de lluvia comúnmente está por debajo de 10 mg/L y algunas veces es mucho menor que 1.0 mg/L, dependiendo del pH. La mayoría de las corrientes superficiales contienen menos de 200 mg/L, pero en aguas subterráneas pueden ser mayores. Concentraciones superiores a 1,000 mg/L ocurren en algunas aguas con bajo contenido de calcio y magnesio, especialmente donde se están produciendo procesos que liberan dióxido de carbono (como la reducción de sulfato) en los acuíferos.

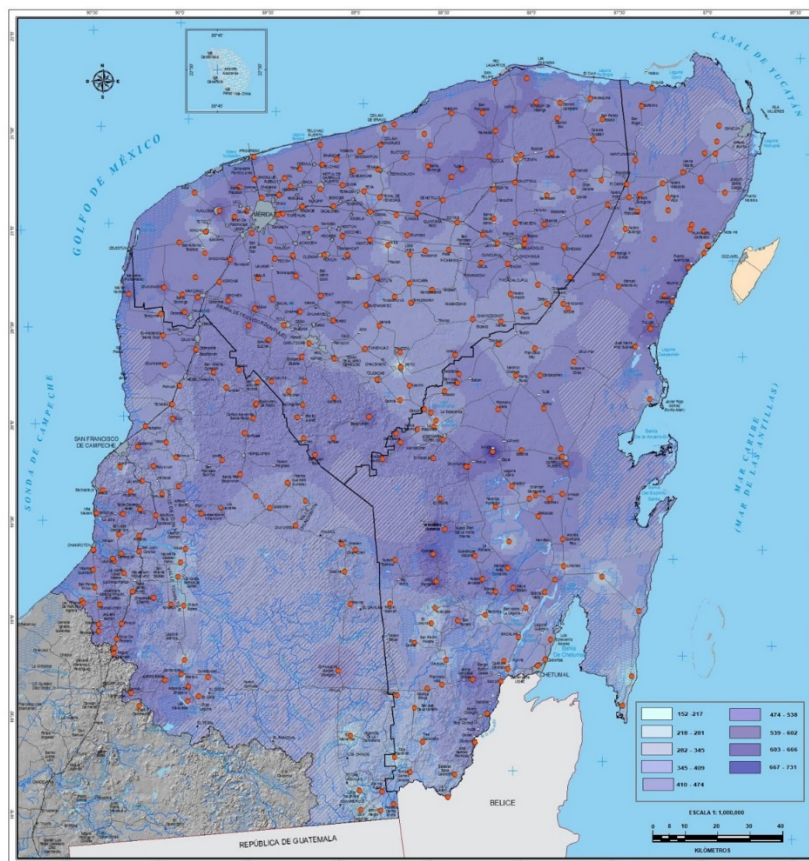
- a) Características químicas. Existe una profunda relación entre el  $\text{CO}_2$  gas,  $\text{CO}_2$  disuelto  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y pH. Estos iones comunican alcalinidad al agua en el sentido que dan capacidad de consumo de ácido al crear una solución buffer. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales. Se pueden precipitar con mucha facilidad como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .
- b) Concentraciones. El ion bicarbonato  $\text{CO}_3\text{H}^-$  varía entre 50 y 350 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a veces hasta 800 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 100 ppm. El ion carbonato  $\text{CO}_3^{=}$  está en concentraciones mucho menores que el  $\text{CO}_3\text{H}^-$  y si el  $\text{pH} < 8,3$  se le considera cero. En aguas alcalinas con  $\text{pH} > 8,3$  puede haber cantidades importantes, hasta 50 ppm en algunas aguas naturales. El agua del mar tiene menos de 1 ppm.
- c) Nocividad y toxicidad. No presenta problemas de toxicidad. Las aguas bicarbonatadas sódicas son malas para riego, debido a la fijación del Na en el terreno y creación de un medio alcalino. El equilibrio entre  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ ,  $\text{CO}_3^{=}$  y pH es determinante de la corrosividad o incrustabilidad.
- d) Análisis en laboratorio. Se determina en función de la alcalinidad del agua, con error menor del 1 ó 2%
- e) Análisis de campo. Se realiza a veces determinando la alcalinidad del agua.
- f) Toma de muestras. Debe realizarse con cuidado para evitar la pérdida de  $\text{CO}_2$ . Debe protegerse de cambios de temperatura y analizar lo antes posible. Las botellas deben ir bien cerradas y llenas a tope. En general los valores de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  medidos en laboratorio son algo menores que los reales.

Los iones bicarbonato y carbonato proceden de:

- Disolución de  $\text{CO}_2$  atmosférico o del suelo.
- Disolución de calizas y dolomías ayudada por el  $\text{CO}_2$  y/o ácidos naturales (húmicos, oxidación de sulfuros, etc.).
- Hidrólisis de silicatos ayudada por el  $\text{CO}_2$ .
- Si en el acuífero no existen aportes de  $\text{CO}_2$  (oxidación de materia orgánica y aportes magmáticos) el contenido en carbono disuelto ( $\text{CO}_2 + \text{CO}_3\text{H}^- + \text{CO}_3^{=}$ ) permanece constante y muchas veces puede suponerse que el contenido en  $\text{CO}_3\text{H}^-$  es casi constante ya que es el ion dominante. El agua del mar aporta del

orden de 100 ppm. Son fácilmente precipitables por concentración por cambio en la presión parcial de  $\text{CO}_2$  o por efecto de ion común.

Los valores del Bicarbonato en el agua subterránea de la Península de Yucatán se asocian con la disolución de rocas carbonatadas (Hem, 1985). La normativa mexicana no establece un límite permitido para uso y consumo humano. Se observan bajos valores en el acuífero de Xpujil (Figura 10.27).



**Figura 10.27 Concentraciones de Bicarbonato en mg/L (INEGI, 2016).**

### ***1.10 Cloruro***

El cloro es el elemento más abundante de los halógenos. Otros elementos en este grupo son el flúor, bromo y yodo. El comportamiento geoquímico del cloro refleja su volatilidad, así como el hecho de que los compuestos de cloro con elementos metálicos comunes, metales alcalinos y metales alcalinotérreos son muy solubles en agua.

Aunque el cloro puede ocurrir en varios estados de oxidación que van desde  $\text{Cl}^-$  hasta  $\text{Cl}^{7+}$ , el primero es el de mayor importancia en el agua expuesta a la atmósfera.



Un hecho significativo que ilustra el comportamiento geoquímico de este elemento es el hecho de que más de las tres cuartas partes de la cantidad total de cloro presente en la corteza exterior, atmósfera e hidrosfera de la Tierra, está en solución en el océano como iones de Cl. El cloruro forma pares de iones o iones complejos con algunos de los cationes presentes en las aguas naturales, pero estos complejos no son lo suficientemente fuertes como para ser significativos en la química del agua dulce. Pueden ser de mayor importancia en el agua de mar y salmueras.

El cloro gaseoso se disuelve fácilmente en el agua y tiene un efecto oxidante más fuerte y rápido que el oxígeno disuelto. El elemento se ha utilizado durante mucho tiempo como desinfectante o biocida en la purificación de fuentes abastecimiento de agua. Los solutos orgánicos también son atacados, al igual que otras especies fácilmente oxidables y la esterilidad biológica de la solución después de que se hayan completado las reacciones se puede determinar fácilmente mediante la presencia de cloro libre. Es una práctica común en la tecnología de abastecimiento de agua mantener unos pocos cientos de microgramos por litro "residual" de cloro libre en solución durante todo el sistema de distribución.

Aunque algunas de las especies de cloro oxidado son bastante estables, no se encuentran en concentraciones significativas en aguas naturales. Sin embargo, la presencia de residuos de cloro en el agua tratada puede influir en las pruebas de laboratorio para algunos otros iones.

El cloruro está presente en los diversos tipos de rocas en concentraciones inferiores a cualquiera de los otros componentes principales del agua natural. Entre los minerales de las rocas ígneas que contienen cloruro se encuentran la sodalita feldespatóide,  $\text{Na}_8[\text{Cl}_2(\text{AlSiO}_4)_6]$  y el fosfato apatita (Johns y Huang, 1967). Los minerales en los que el cloruro es un componente esencial no son muy comunes, y es más probable que el cloruro esté presente como impureza (Kuroda y Sandell, 1953; Noble et al., 1967)

En general, las rocas ígneas no producen altas concentraciones de cloruro en el agua que entra en contacto con ellas. Las fuentes más importantes están asociadas con rocas sedimentarias, particularmente las evaporitas. El cloruro puede estar presente en salmueras congénitas, materiales cementantes, y en depósitos de flujos residuales depositados en el mar o en cuencas de drenaje cerradas. Cuando las rocas porosas se sumergen en el mar en cualquier momento después de su formación, se impregnan con sales solubles en las cuales el cloruro juega un papel importante. La lutita marina de grano fino puede retener parte de este cloruro durante períodos muy largos. En todos estos tipos de rocas, el cloruro está presente principalmente como cristales de cloruro de sodio o como una solución de iones de sodio y cloruro.

El comportamiento químico del cloruro en el agua natural es manso y moderado en comparación con los otros iones principales. Los iones de cloruro no entran significativamente en reacciones de oxidación o reducción, no forman complejos de solutos importantes con otros iones a menos que la concentración de cloruro sea extremadamente alta, no formen sales de baja solubilidad, no se adsorben significativamente en superficies minerales y ni desempeñen papeles bioquímicos vitales. La circulación de los iones de cloruro en el ciclo hidrológico se da en gran parte

a través de los procesos físicos. La falta de complicaciones se ilustra mediante experimentos con trazadores en aguas subterráneas descritos por Kaufman y Orlob (1956). Estos investigadores encontraron que los iones de cloruro se movían con el agua a través de la mayoría de los suelos probados con menor retraso o pérdida que cualquiera de los otros trazadores probados, incluido el tritio incorporado a las moléculas de agua. Sin embargo, no se debe esperar este comportamiento conservador cuando el movimiento es a través de arcillas compactas o lutitas.

El cloruro está presente en todas las aguas naturales en bajas concentraciones. En la mayoría de las corrientes superficiales las concentraciones de cloruro son más bajas que la de los sulfato o bicarbonato. Algunas excepciones se producen cuando las corrientes reciben flujos de aguas subterráneas con alto contenido de cloruro, desechos industriales o se ven afectadas por las mareas oceánicas. Debido a la falta de complicaciones en su comportamiento químico, parecería que la circulación de cloruro en el agua natural podría explicarse de manera bastante completa y simple. Desafortunadamente, hay serios problemas en esta suposición. Feth (1981) preparó una excelente revisión de la información disponible sobre el comportamiento del cloruro en el agua natural.

El agua de lluvia cerca del océano contiene comúnmente de una a varias decenas de miligramos por litro de cloruro, pero las concentraciones observadas generalmente disminuyen rápidamente tierra adentro; el promedio en los EUA es de solo unas pocas décimas de miligramo por litro (Junge y Werby, 1958). Podría cuestionarse si estas cifras brindan una base confiable para calcular el flujo total de cloruro hacia la tierra adentro durante un año determinado. Las masas de aire que contienen partículas de cloruro de sodio pueden moverse hacia el interior y eliminar la sal por mecanismos distintos al lavado en la lluvia. Eriksson (1960) y otros investigadores han mencionado los efectos de la lluvia directa y la intercepción del cloruro de sodio en el aire por la vegetación. La mayoría de los geoquímicos que han discutido este tema asumen que el cloruro en el agua del río proviene de la lluvia u otras formas de precipitación y, por lo tanto, es cíclico, es decir, representa el cloruro reciclado del océano. Sin embargo, pocas investigaciones han incluido suficientes mediciones de la cantidad de cloruro introducidas en una cuenca de drenaje en la lluvia, así como la cantidad acarreadas en el flujo de la corriente para determinar qué tan cerca se puede verificar esta suposición. En todos los estudios realizados hasta la fecha en los EUA la cantidad de cloruro aportada por la lluvia parece inadecuada para explicar las cantidades presentes en el escurrimiento.

Se puede concluir que los iones de cloruro tienden a permanecer en solución a pesar de que la mayoría de los procesos que tienden a separar otros iones. Las salmueras residuales, por lo tanto, son altas en concentración de cloruro solo por esta razón. Debido a que el ion cloruro es físicamente grande en comparación con muchos de los otros iones principales en el agua, se podría esperar que el cloruro sea retenido en el agua intersticial o porosa de las arcillas y lutitas durante el flujo subterráneo.

La permeabilidad diferencial de la arcilla y el esquisto puede ser un factor importante en el comportamiento y la composición del agua subterránea salina asociada con sedimentos de grano fino. Por ejemplo, el cloruro se puede retener durante el flujo de

agua a través de una capa de arcilla hasta alcanzar altas concentraciones. El comportamiento selectivo de dicha capa también influye en la concentración residual de los cationes. Los iones más fuertemente retenidos en tal solución serían los más fuertemente atraídos por los sitios de intercambio catiónico. El calcio es comúnmente el ion preferentemente retenido.

El tipo de agua más común en el que el cloruro es el anión dominante es aquel en el que el sodio es el catión predominante.

- a) Características químicas. Sales en general muy solubles. Muy estable en disolución y muy difícilmente precipitable. No se oxida ni reduce en aguas naturales. En general va asociado al ion  $\text{Na}^+$ ; en especial en aguas muy salinas, pero el número de miliequivalentes de ambos iones no es necesariamente igual.
- b) Concentraciones. Entre 10 y 250 ppm en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de ppm. El agua del mar tiene entre 18 000 y 21 000 ppm (saturación).
- c) Nocividad y toxicidad. Más de 300 ppm comunican sabor salado al agua de bebida, pero no es perjudicial por lo menos hasta algunos miles de ppm. Es esencial para la vida. Contenidos elevados son perjudiciales para muchas plantas y comunican corrosividad al agua.
- d) Toma de muestras. No se precisan precauciones especiales.

El ion cloruro procede de:

- Lavado de terrenos de origen marino; las aguas congénitas y fósiles pueden aportar cantidades importantes.
- Agua de lluvia y su concentración en el terreno.
- Mezcla con agua marina en regiones costeras.
- Ataque de rocas, aunque en general el aporte es pequeño por ser un elemento escaso en la corteza terrestre. Muy localmente tiene interés el aporte de ion cloruro por rocas evaporitas (sal gema, etc.) y por el ataque de ciertos minerales asociados a rocas ígneas y metamórficas (sodalita, apatito, etc.).
- Más raramente puede proceder de gases y líquidos asociados a emanaciones volcánicas.
- Los vertidos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes.

En la zona centro de la Península de Yucatán se registra una anomalía que puede estar asociada a la influencia del Lago Chichancanab, dicha anomalía se desarrolla hacia el sureste, y puede ser explicada al probable lavado de las rocas evaporíticas del área, con posible salida en zona cercana a la Bahía de Chetumal.

Para la segunda etapa de muestreo, esta anomalía es seccionada debido a la incorporación de agua de lluvias con menor concentración del ion cloruro. La anomalía ubicada en el extremo poniente del área, prácticamente se mantiene igual

en las dos temporadas, con excepción de una pequeña franja que no llega a seccionar completamente el área delimitada, es probable que se encuentre influenciada por intrusión de origen marino a profundidad, que pudiera seguir el plano de falla de la Sierrita de Ticul, dado que no se encuentra mapeada en superficie después de la intersección con la falla Hecelchakán-Campeche. La normatividad mexicana establece un límite permisible de 250 mg/L, por lo que a partir de ella se realizaron las descripciones.

Los valores de Cloruro en el agua subterránea de la Península de Yucatán se asocian con anomalías relacionadas con posible presencia de agua marina, la zonificación de aguas subterráneas en contacto con rocas evaporíticas durante su infiltración y recorrido por el subsuelo, así como la posible infiltración de agua expuesta a procesos intensos de evaporación (INEGI, 2016). La normativa mexicana establece un límite permitido de 250 mg/L para uso y consumo humano. Se observan bajos valores en el acuífero de Xpujil (Figura 10.28).



**Figura 10.28 Concentraciones de Cloruro en mg/L (INEGI, 2016).**

### ***1.11 Nitrato***

El comportamiento geoquímico del nitrógeno está fuertemente influenciado por la importancia vital del elemento en la nutrición de plantas y animales. El nitrógeno está presente en la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera en estados de oxidación que cubren el rango completo de  $N^{3-}$  a  $N^{5+}$ . La mayor parte de la atmósfera de la Tierra es nitrógeno gaseoso.

Las rocas de la corteza terrestre contienen aproximadamente un cuarto del nitrógeno total presente en la corteza, atmósfera, hidrosfera y biosfera, y casi tres cuartas partes están en la atmósfera (Horn y Adams, 1966; Stevenson, 1972). Las cantidades en la hidrosfera y la biosfera son pequeñas. Una cantidad mayor puede estar presente en el manto a profundidades mayores a 16 km, aunque no se conocen con certeza, ni son significativas en el ciclo bioquímico del elemento.

Los procesos químicos y biológicos que transfieren nitrógeno hacia y desde la litosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera, representan el ciclo del nitrógeno. Se ha realizado una gran cantidad de investigación científica sobre el ciclo del nitrógeno, y la literatura relacionada es voluminosa. La importancia de estos procesos en las concentraciones, forma y comportamiento del nitrógeno en el agua es obvia, y merecen una breve consideración.

En general, los procesos por los cuales el gas  $N_2$  cambia de estado de oxidación y se convierte en compuestos químicos que contienen nitrógeno se denominan "fijación del nitrógeno". Se requiere un aporte sustancial de energía ya que los dos átomos de N en su arreglo molecular están fuertemente unidos. La fijación biológica se logra mediante algas verdeazuladas y ciertos organismos relacionados que tienen la capacidad de fotosíntesis, y por ciertas especies de bacterias que utilizan material orgánico como fuentes de energía. Este último puede suceder simbióticamente en las raíces de algunas especies de plantas superiores, especialmente las leguminosas. La fijación inorgánica ocurre naturalmente en la atmósfera, pero las cantidades producidas de esta manera son pequeñas. Los rayos producen óxidos nítricos y se pensó en algún momento que era un factor importante en la producción de nitratos en el agua de lluvia.

La influencia del hombre en el ciclo del nitrógeno incluye la producción y el uso de fertilizantes sintéticos como el amoníaco y otros compuestos. Parte de este nitrógeno fijo se escapa a la hidrosfera. La producción de nitrógeno fijo por la industria de los fertilizantes fue aproximadamente del 30 por ciento de la cantidad fijada naturalmente en 1969-70 y dicha industria continuó expandiéndose durante la década de 1970 (Wlotzka, 1972).

Las bacterias del suelo convierten el nitrógeno a sus formas reducidas u orgánicas: nitrito y nitrato. Este proceso se denomina comúnmente "nitrificación". El nitrógeno utilizado por las plantas se encuentra principalmente en forma oxidada. El nitrato en los sistemas anaeróbicos puede reducirse mediante otras cepas de bacterias a óxido

nitroso o gas nitrógeno. Los bioquímicos se refieren a este proceso como desnitrificación

El nitrógeno ocurre en el agua como aniones de nitrito o nitrato ( $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ), en forma catiónica como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), y en estados de oxidación intermedios como parte de solutos orgánicos. Algunas otras formas como el cianuro ( $\text{CN}^-$ ) pueden ocurrir en el agua afectada por la eliminación de residuos. Las diferencias en las propiedades químicas entre estas especies obviamente son sustanciales. Los cationes de amonio se absorben fuertemente en las superficies minerales. Las especies aniónicas como el nitrato se transportan fácilmente en el agua y son estables en un rango considerable de condiciones. Por encima de un pH de 9.20, la mayoría de los iones de amonio disueltos son  $\text{NH}_4\text{OH}(\text{aq})$ , una especie sin carga. El nitrito y las especies orgánicas son inestables en el agua aireada y generalmente se consideran indicadores de contaminación por descargas de aguas residuales o desechos orgánicos. La presencia de nitrato o amonio también puede ser indicativa de dicha contaminación, aunque la contaminación debe haber ocurrido en un sitio o en un momento sustancialmente alejado del punto de muestreo. Los iones de amonio y cianuro forman complejos solubles bastante fuertes con algunos iones metálicos, y ciertos tipos de efluentes de desechos industriales pueden contener tales especies.

Las concentraciones de nitrógeno se determinan y reportan de diferentes maneras en los análisis. La mayoría de los laboratorios que participan en estudios de contaminación orgánica reportan amoniaco, amino, nitrógeno orgánico y nitrito, ya sea por separado o como una cifra combinada y en términos de concentración equivalente de nitrógeno elemental. Otros laboratorios más interesados en los contenidos inorgánicos del agua determinan e informan solo el nitrato, generalmente en términos de la concentración del ion nitrato  $\text{NO}_3^-$ . El nitrito rara vez está presente en concentraciones lo suficientemente grandes como para influir en el equilibrio iónico.

Concentraciones excesivas de nitrato en el agua potable pueden causar metahemoglobinemia en niños pequeños. Concentraciones superiores a 10 mg/L como N, equivalentes a 44 mg/L de  $\text{NO}_3^-$  evidentemente presentan este peligro (NAS-NAE, 1972, p. 73). La presencia de nitrato y nitrito en el agua se ha estudiado de forma bastante extensa debido a sus efectos en la salud pública.

Las concentraciones de nitrato que se acercan o superan los 44 mg/L de  $\text{NO}_3^-$  están presentes en muchos pozos rurales de suministro de agua. Se han atribuido estas concentraciones al drenaje de corrales cercanos, tanques sépticos y letrinas. Los animales de granja producen cantidades considerables de desechos orgánicos nitrogenados que tienden a concentrarse en lugares donde están confinados una gran cantidad de animales. La ocurrencia de altas concentraciones de nitrato en aguas subterráneas poco profundas en ciertas áreas de Kansas se ha atribuido a la lixiviación de los corrales de ganado por la lluvia (Durum, en Berry, 1952). La tendencia general de limitar el espacio de los animales - corrales para alimentar el ganado vacuno - probablemente provocará más casos de este tipo, aunque su efecto podría ser solo local y no explica las altas concentraciones de nitratos en el agua subterránea de áreas extensas. Estudios cuantitativos de la humedad del suelo y las aguas subterráneas

someras del valle de South Platte en Colorado, mostraron que contribuciones sustanciales de nitrógeno y fósforo habían alcanzado el agua subterránea debajo de los campos de riego y que las contribuciones particularmente grandes se asociaron con corrales de animales (Stewart et al., 1967).

La cantidad de fertilizantes nitrogenados utilizados en tierras agrícolas de EUA ha aumentado considerablemente en las últimas décadas, y esto ha suscitado una gran preocupación en cuanto a los posibles aumentos resultantes del nitrato en ríos y aguas subterráneas. El impacto de la filtración de los fertilizantes nitrogenados al agua subterránea se desarrolla lentamente en muchas áreas debido a que el transporte de solutos a través de la zona no saturada es lento. Pratt et al., (1972) estimaron que el nitrato se movió a una distancia vertical de 30 m en la zona no saturada en un período de 1 a 49 años. Estas estimaciones fueron realizadas en huertos de cítricos de regadío en el sur de California. En algunos perfiles de suelo, una fracción sustancial del nitrato transportado se perdió por desnitrificación.

Las concentraciones de nitrato en el agua de la zona no saturada bajo los campos de riego en California (25 sitios) medidos por Pratt y Adriano (1973) oscilaron entre 53 y 540 mg/L de  $\text{NO}_3^-$ . Cuando esta solución alcanza el nivel freático, generalmente se puede esperar cierta dilución, aunque siempre existe el riesgo de encontrar altas concentraciones de nitrato en el agua subterránea.

- a) Características químicas. Sales muy solubles y por lo tanto es muy difícilmente precipitable. Aunque tiene tendencia a ser estable, aun en medios reductores, puede pasar a  $\text{N}_2$  o  $\text{NH}_4^+$  y excepcionalmente a  $\text{NO}_2^-$ . La mayoría de compuestos nitrogenados pasan a  $\text{NO}_3^-$  en medio oxidante, aunque el  $\text{NH}_4^+$  puede perderse en parte como  $\text{N}_2$ . El terreno puede fijar el  $\text{NO}_3^-$ , en especial el suelo vegetal.
- b) Concentraciones. Normalmente entre 0.1 y 10 ppm pero en aguas polucionadas puede llegar a 200 ppm y en algún caso hasta 1000 ppm. El agua del mar tiene alrededor de 1 ppm o menos.
- c) Nocividad y toxicidad. Concentraciones elevadas en agua de bebida puede producir cianosis en los niños y corrosividad (oxidaciones) al agua y producen interferencias en fermentaciones.
- d) Análisis de campo. No suele realizarse.
- e) Toma de muestras. No se precisan precauciones especiales excepto quizás en aguas que contienen  $\text{NH}_4^+$  para evitar su oxidación y que aparezca como  $\text{NO}_3^-$ . El  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{NH}_4^+$  son incompatibles en concentraciones elevadas.

El ion nitrato procede de:

- Procesos de nitrificación naturales (bacterias nitrificantes), por ejemplo, en las raíces de las leguminosas.

- Descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.
- Abonos agrícolas.
- En pequeña proporción del agua de lluvia.
- Muy raramente del lavado de ciertos minerales nitrogenados, emanaciones volcánicas o lavado de suelos antiguos.
- Muy localmente del desarrollo de pozos con explosivos.
- Su origen no es siempre claro. Es relativamente estable, pero puede ser fijado a veces por el terreno o ser reducido a  $N_2$  o  $HN_4$  en ambientes reductores. Muchas veces es un indicador de contaminación, en cuyo caso suele estar estratificado, dominando las concentraciones mayores en la parte alta del acuífero libre. Si se tiene menos de 10 ppm se considera que el contenido es bajo, aunque en aguas subterráneas no contaminadas es raro superar unas pocas ppm.

Los valores de Nitrato en el agua subterránea de la Península de Yucatán se asocian con la descomposición de la materia orgánica, el uso de estiércol y agroquímicos en la fertilización de los suelos, así como por las descargas de aguas residuales domiciliarias, especialmente en las zonas que no cuentan con drenaje para la descarga y tratamiento de sus aguas de desecho (INEGI, 2016). La normativa mexicana establece un límite permitido de 10 mg/L para uso y consumo humano. Se observan altos valores en el acuífero de Xpujil (Figura 10.29), debido probablemente a las descargas de aguas residuales de las comunidades que no cuentan con drenaje ni plantas de tratamiento de aguas residuales.





**Figura 10.29 Concentraciones de Nitrato en mg/L (INEGI, 2016).**

### **1.12 Fosfato**

El fósforo es un elemento bastante común en las rocas ígneas, También es bastante abundante en sedimentos, pero las concentraciones presentes en la solución en agua natural normalmente no son más que unas pocas décimas de miligramo por litro. Las principales características de la química del fósforo que rigen su comportamiento incluyen la baja solubilidad de la mayoría de sus compuestos inorgánicos y su uso por parte de la biota como nutriente.

El fósforo se encuentra en el mismo grupo de la tabla periódica que el nitrógeno. Puede ocurrir en estados de oxidación que varían de  $P_3^-$  a  $P_5^+$ , aunque la forma completamente oxidada (fosfato) es la única de importancia en la mayoría de los sistemas naturales de agua (McCarty et al., 1970). La forma mineral más común es la apatita, que es un fosfato de calcio con cantidades variables de  $OH^-$ ,  $Cl^-$  y  $F^-$  y varias impurezas. Algunos otros minerales de fosfato contienen aluminio o hierro. El fósforo que se libera en el agua de mar por medio de la biota marina puede precipitarse como fósforo, un fosfato de calcio impuro.

El fósforo es un componente de las aguas residuales, ya que es un elemento esencial en el metabolismo por lo que siempre está presente en los desechos metabólicos de

los animales. Durante las décadas de 1950 y 1960, el uso de fosfato de sodio para aumentar el poder de limpieza de los detergentes domésticos resultó en un aumento de fosfato en las plantas de aguas residuales. Durante la década de 1960, se volvió más evidente el papel del fósforo como nutriente para la biota acuática y su efecto en la eutrofización de los lagos. A pesar de las medidas implementadas para limitar el uso de fosfato en los detergentes, los efluentes de aguas residuales domésticas e industriales siguen aportando cantidades importantes de fósforo a las aguas superficiales. Las formas reducidas de fósforo están presentes en algunos químicos orgánicos sintéticos, incluidos algunos utilizados en los insecticidas. Estos compuestos son inestables en el agua aireada, aunque pueden persistir en ambientes reductores. Las especies de fosfatos orgánicos sintetizados por plantas y animales constituyen una fracción significativa del fósforo disuelto y particulado de muchas aguas naturales.

El ion ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) es el producto final de disociación del ácido fosfórico,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , la cual ocurre en pasos, y produce cuatro posibles especies de solutos:  $\text{H}_3\text{PO}_4(\text{aq})$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ .

Las especies de ortofosfato son las formas  $\text{P}_5^+$  más termodinámicamente estables que pueden presentarse en el agua natural, y los procedimientos analíticos más utilizados tienen como objetivo convertir todo el fósforo presente a esta forma. Los resultados finales se informan como fósforo total, sin indicar las especies. Las formas condensadas de fosfato, incluido el pirofosfato y varias especies de polifosfatos, son agentes complejos fuertes para algunos iones metálicos.

Los principales controles de solubilidad del fósforo están relacionados con la coprecipitación y la adsorción, así como con la absorción por la biota. El uso de fósforo por la vegetación acuática y tal vez la adsorción de los iones de fosfato por los óxidos metálicos, especialmente los oxihidróxidos férricos y de manganeso, pueden limitar que se tengan concentraciones mayores a unas pocas décimas o centésimas de miligramo por litro en la mayoría de las aguas.

- a) Características químicas. Aunque presente sales solubles, la mayoría lo son muy pocas y en general se precipita como  $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$ . Se hidroliza con facilidad y contribuye a la alcalinidad del agua. La presencia de Ca limita su contenido y el  $\text{CO}_2$  disuelto lo favorece.
- b) Concentraciones. En general entre 0.01 y 1 ppm pudiendo llegar a 10 ppm y excepcionalmente a 50.
- c) Nocividad y toxicidad. En las concentraciones usuales, no origina problemas. Es esencial en el ciclo vital de los seres vivos, pero lo adquieren por otros medios.
- d) Análisis. No es frecuente determinarlo. Se determina colorimétricamente, con buena precisión.

Los valores de Fosfato en el agua subterránea de la Península de Yucatán se encuentran muy bien definidas y asociadas con las zonas de cría de ganado bovino

(INEGI, 2016). La normativa mexicana establece un límite permitido de 0.1 mg/L, en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, emitidos por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Se observan bajos valores en el acuífero de Xpujil (Figura 10.30).



**Figura 10.30 Concentraciones de Fosfato en mg/L (INEGI, 2016).**

### ***1.1 Sólidos Totales Disueltos (STD)***

Los sólidos totales disueltos (STD, o TDS por sus siglas en inglés: Total Dissolved Solids) son el número de miligramos del residuo que queda después de evaporar una muestra de agua previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con abertura de 1,5 micras. El agua se evapora y el residuo se lleva hasta 180°C. El resultado se reporta en mg/L.

Los STD incluyen las sales, los minerales, los metales y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico menor a 1,5 micras o que se disuelve en el agua.

En ocasiones, los STD se confunden con los sólidos totales (ST), que son el residuo que queda después de evaporar la misma muestra de agua pero sin filtrarse.

Los sólidos suspendidos totales (SST) son los que quedan en el filtro de fibra de vidrio con abertura de 1.5 micras. Por lo tanto, los ST son la suma de los SST y de los STD.

La reducción de los STD se logra mediante procesos como ósmosis inversa, electrodeionización, desmineralización o destilación.

El contenido de STD de un agua puede estimarse midiendo la conductividad eléctrica (CE) de la misma, ya que aquellos sólidos que se ionizan, aumentan la CE. El agua pura tiene una CE prácticamente de cero. Existen equipos que, mediante la CE, estiman los STD, pero hay que tener en cuenta que no consideran aquellos sólidos que no se ionizan al disolverse en el agua. El valor de los STD en mg/L es de entre 0,5 y 1,0 veces el valor de la CE en micro Siemens/cm (dependiendo de la temperatura y del nivel de concentración de STD).

Los valores de STD identificadas en el aguas subterránea de la Península de Yucatán están fuertemente influenciadas por la presencia de rocas evaporíticas que afloran en la porción centro sur de la península. La normativa mexicana establece un límite permitido de 1,000 mg/L para uso y consumo humano. Hacia la zona centro sur se observan menores valores producto de la infiltración de agua de reciente precipitación e infiltración por ser la zona de recarga del acuífero (Figura 10.31).



**Figura 10.31 Valores de STD en mg/L (INEGI, 2016).**

### 1.13 Niveles del agua en el acuífero - Direcciones del flujo subterráneos

Parte de la precipitación pluvial que cae sobre la Península de Yucatán se evapotranspira y el resto se infiltra al manto subterráneo gracias a su elevada permeabilidad, a través de fracturas, oquedades y conductos cársticos de las calizas almacenando grandes volúmenes de agua lo que favorece su recarga. Debido al origen, la conformación fisiográfica y a la estructura litológica de la Península, la dirección general del flujo subterráneo es radial partiendo de las elevaciones topográficas más prominentes que se localizan en la parte centrosur de la Península (Figuras 10.32 y 10.33). Este acuífero se encuentra sobre una interfase de agua salada, con grandes espesores de agua dulce en el sur, que disminuye hasta tener capas delgadas en la línea de costa (CONAGUA, 2008; IMTA, 2011).

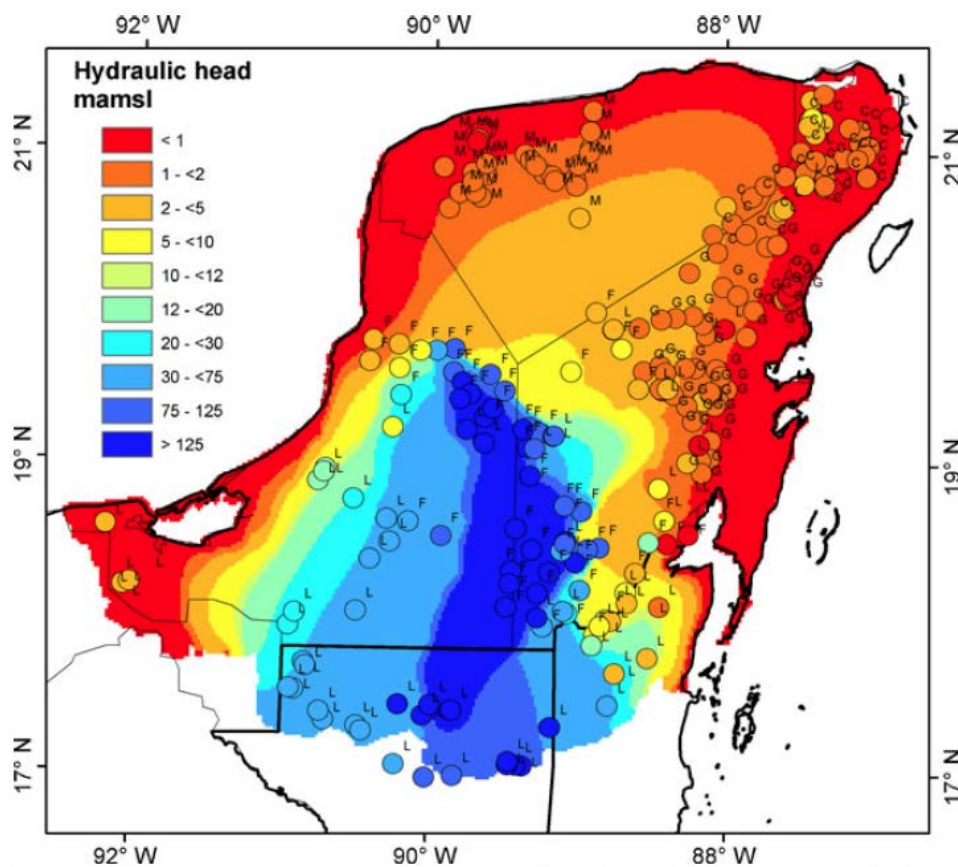
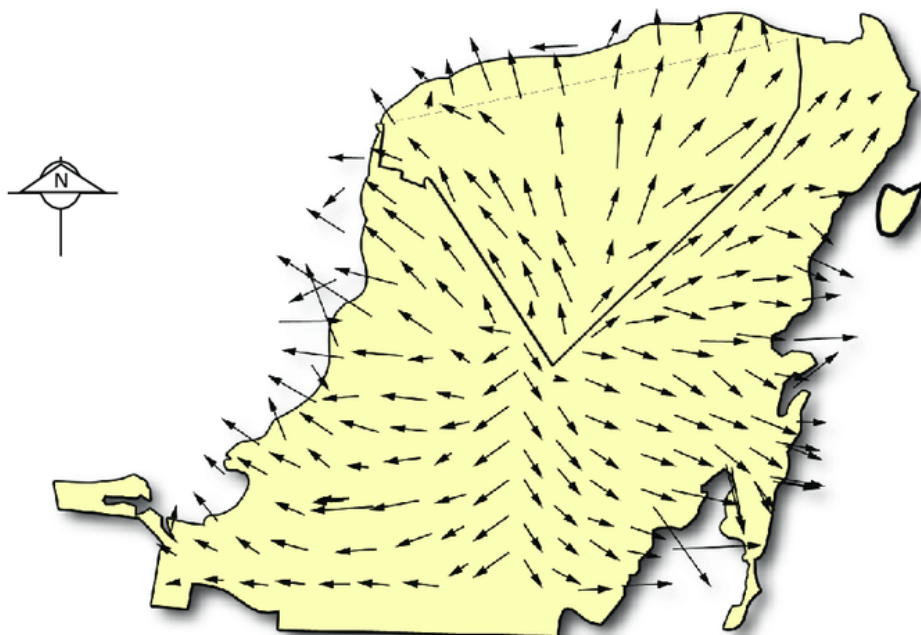
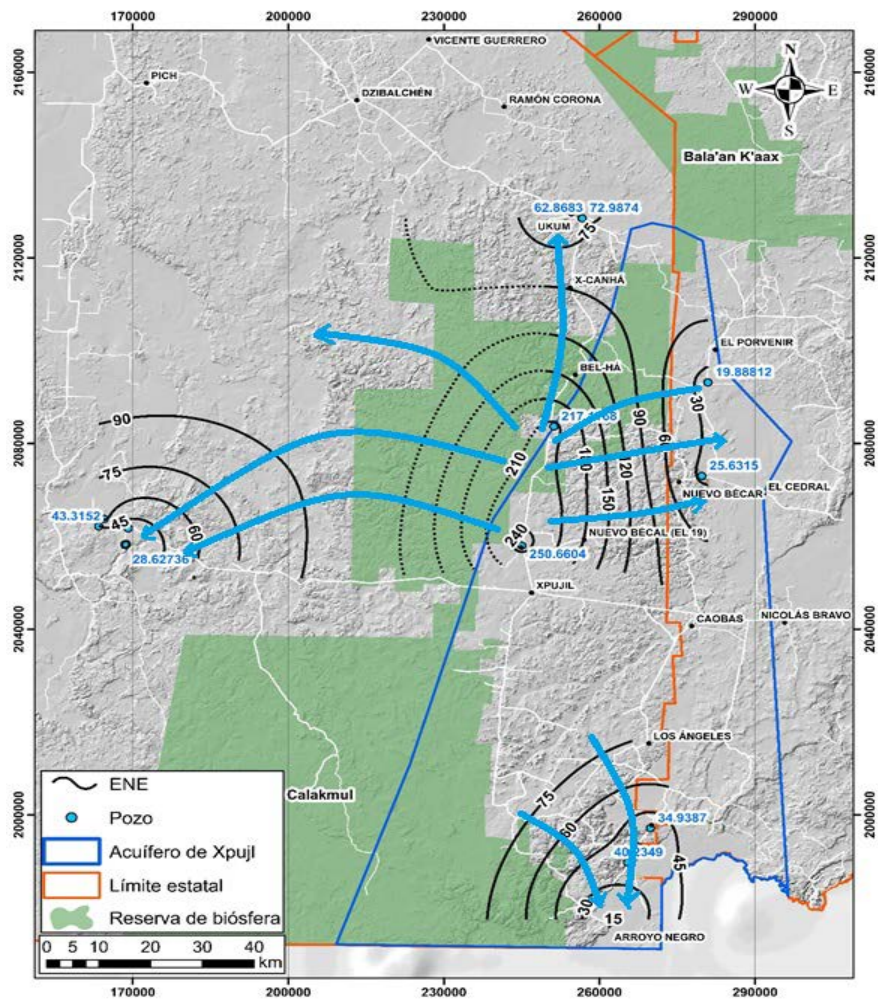


Figura 10.32 Elevación del nivel freático- Península de Yucatán (Bauer-Gottwein et al., 2011).



**Figura 10.33** Dirección de flujo del agua subterránea en la Península de Yucatán (CONAGUA, 2008).

En el caso del acuífero Xpujil se presenta un parteaguas (aproximadamente a 290 msnm) donde el flujo del agua subterránea se divide siguiendo direcciones hacia el oriente y poniente principalmente. En la porción sur del acuífero la dirección del flujo subterráneo es principalmente de norte a sur (Figura 10.34).



**Figura 10.34 Dirección del flujo en el acuífero Xpujil.**

### 10.6.2 Selección de los sitios y puntos de medición propuestos

Con base en la información descrita en el punto anterior, se definieron los sitios y puntos de medición propuestos, los cuales tienen el objetivo de complementar los puntos de medición de temperatura, conductividad eléctrica y niveles de agua subterránea, parámetros útiles en la definición a detalle de la dirección del flujo subterráneo. En la siguiente Figura n se muestra la ubicación de los sitios.

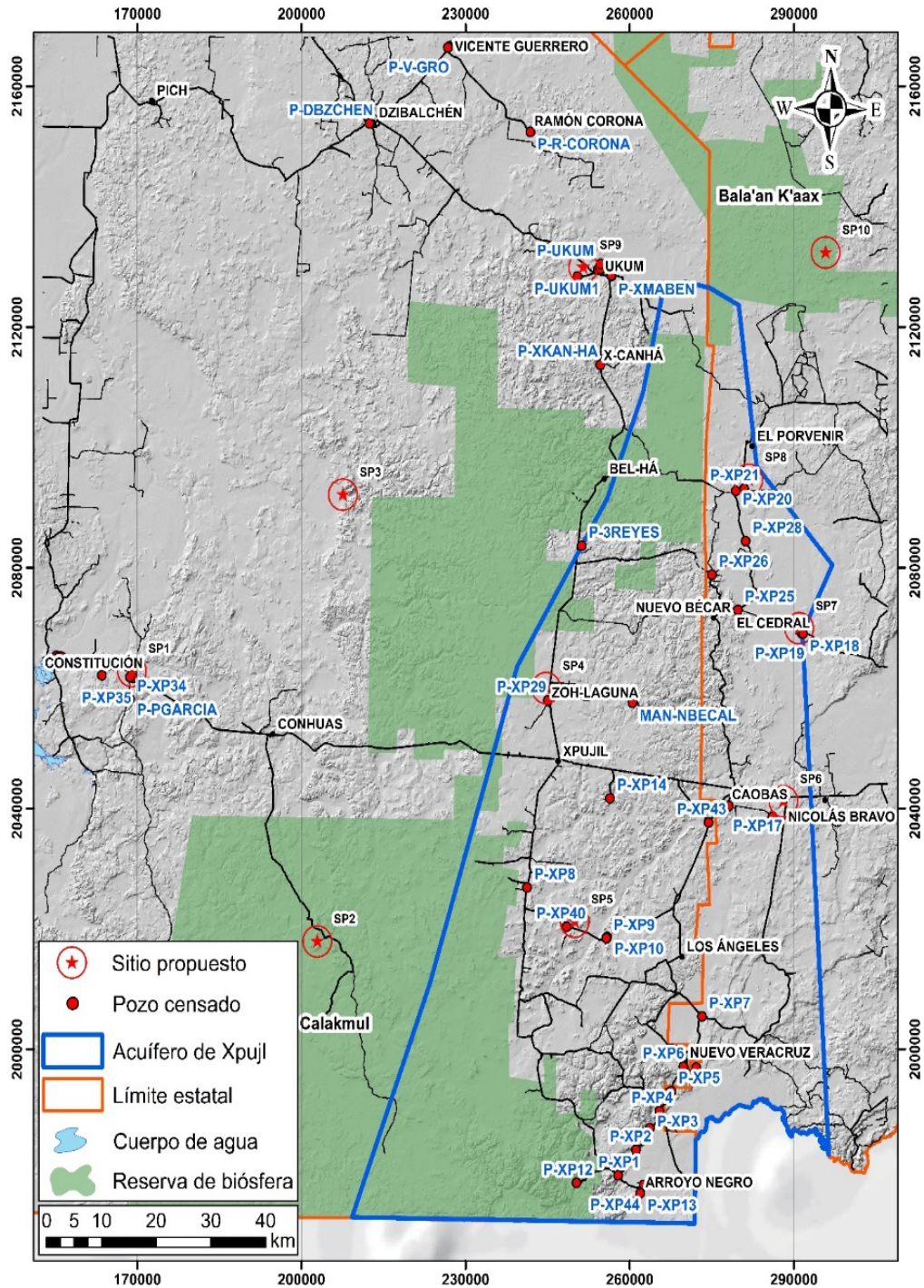


Figura 10.35 Ubicación de los sitios de medición propuestos en el acuífero Xpujil.

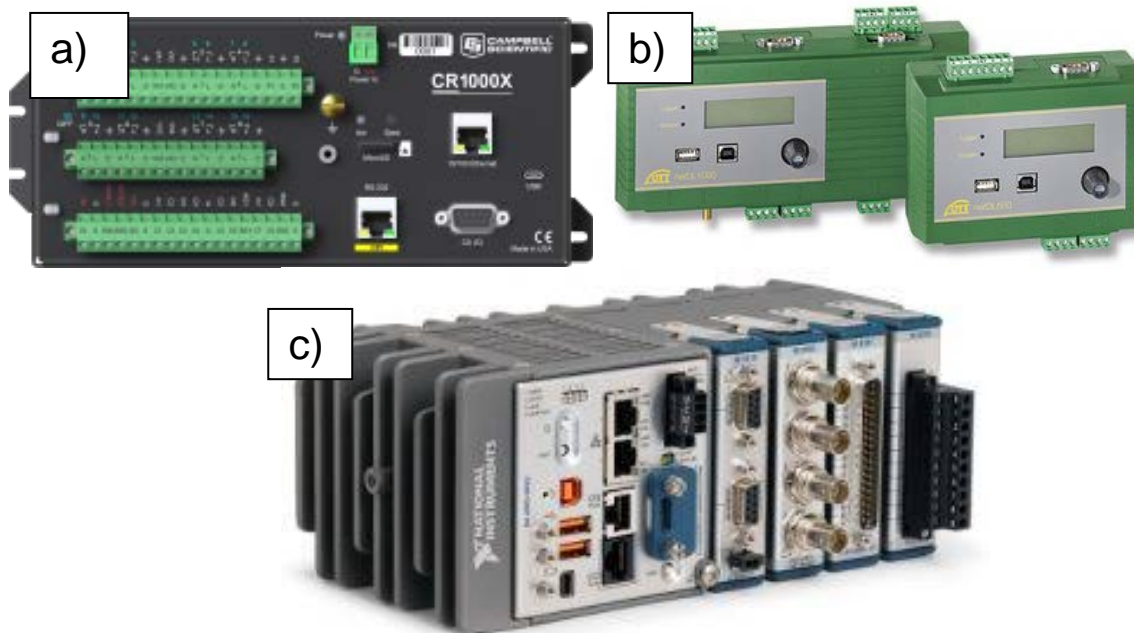


### 10.6.3 Análisis de tecnologías existentes y prototipos

Diseño de prototipo para la medición de nivel, temperatura y conductividad eléctrica en aguas subterráneas en el acuífero de Xpujil, Campeche.

Debido a la diversidad de las condiciones de los sitios de toda la zona de interés se analizarán tecnologías que permitan garantizar la operación y la obtención de datos a pesar de la diversidad de condiciones de los sitios a medir.

Para el caso de equipos de medición automática existen diversos dispositivos comerciales, conocidos como dataloggers, de fabricantes como Campbell Scientific, National Instruments, OTT HydroMet, entre otros, los cuales tienen como finalidad registrar la información de una variedad de sensores que sean conectados y configurados en estos equipos, almacenar los datos y transmitir a un concentrador de información aquellos valores recabados por los sensores. La cantidad de sensores puede variar dependiendo del fabricante, la programación y el protocolo de comunicación utilizado; puede ser variable la cantidad de datos que pueden ser almacenados en los ya mencionados dataloggers de uno o varios sensores. Cada fabricante propone una o varias soluciones para la transmisión de la información recopilada, ya sea a través de la red Wi-Fi, la Red Celular o, incluso, la transmisión satelital, la Figura 10.36 muestra algunos ejemplos de soluciones comerciales o dataloggers.



**Figura 10.36 Dataloggers comerciales de a) Cambell Scientific, b) OTT HydroMet y c) National Instruments**

Dentro de la gama de dispositivos que permiten la adquisición de parámetros que pueden ser utilizados por estos dataloggers se encuentran las sondas piezométricas que incorporan los datos de Nivel y Temperatura; más recientemente, con la disminución de los costos de fabricación de componentes electrónicos, se ha incorporado a estos dispositivos la variable de Conductividad Eléctrica para aumentar la versatilidad de los sensores y la posibilidad de recabar más parámetros en el mismo procedimiento de medición. En los últimos tiempos, se ha dado un salto tecnológico mayor que ha permitido incorporar baterías y un sistema de almacenamiento de información dentro de la carcasa de la propia sonda, todo lo anterior permite tomar una gran cantidad de muestras y almacenar la información con el equipo dentro del cuerpo de agua, con el inconveniente de no poder enviar las muestras recolectadas a un concentrador de información.

Además de lo anteriormente expuesto, una de las características importantes con las que deben contar los equipos de medición debe ser el certificado de calibración y/o pruebas realizadas en laboratorio, lo anterior garantiza que los datos medidos por dicho equipo de medición serán de confiabilidad.

Una vez hechas las consideraciones de almacenamiento y transmisión de la información, lo siguiente es considerar el consumo energético de los equipos utilizados en campo para la medición de variables atmosféricas. Para la presente propuesta de prototipo se priorizo que sean equipos de bajo consumo energético, dado que es común que en los sitios no se cuente con disponibilidad de un tomacorriente, o bien, de energía eléctrica, por lo que, se propone usar paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en sitio que permita la operación del sistema.

Para el diseño del prototipo se tomaron en cuenta estas características como un requisito indispensable para brindar confiabilidad en el sistema de medición. Uno de los equipos propuestos para la medición de los parámetros de nivel, temperatura y conductividad eléctrica que cumple con su certificado de pruebas en laboratorio es la sonda PLS-C del fabricante OTT Hydromet, en la Figura 10.37 presenta una imagen de la sonda físicamente y la Figura 3 se muestra el certificado de laboratorio que avala su calibración. Una de las grandes ventajas de esta sonda multiparamétrica de medición es el material con el que su cuerpo o carcasa es construida, dado que, al ser de acero inoxidable, permite que la vida útil de los sensores y electrónica contenida sea mayor.



**Figura 10.37**      **Fotografía de la sonda PLS-C de OTT**

**FAT OTT PLS**

**Drucksensor**      **Pressure level sensor**

Artikel-Nr.,      63.037.001.9.0  
Manufacturer's part no.  
Bearbeiter, Agent      Fröhlich Arthur  
Datum, Date      26.11.2018

Abnahmeprüfzeugnis 3.1      **Factory Acceptance Test 3.1**  
DIN EN 10204:2004      **DIN EN 10204:2004**

Unterschrift, Signature      *[Signature]*

---

<b>Serien-Nr.</b>	<b>Serial no.</b>	<b>PS-451863</b>
Variante	Version	150-4-3-5-M
Systemlänge [m]	System length [m]	150.00
Ausgang	Output	SDI-12 über/via RS-485
Kabelabschluss	Cable ends	Feuchteabsorber / Humidity absorber FAD5
Messbereich [m]	Measuring range [m]	40
Einheit - Messwert	Unit - Measured value	m
Einheit - Temperatur	Unit - Temperature	°C
Mechanik-Stand	Mechanics status	4
Temperaturkalibrierung	Temperature calibration	<input type="checkbox"/>
<b>Leiterplatte</b>	<b>PCB</b>	<b>63.037.100.3.2 - a/1 - 00341 - 1290</b>
Bootloader	Bootloader	1.06.006
Firmware	Firmware	1.03.4
<b>Einstellungen (4-20 mA)</b>	<b>Settings (4-20 mA)</b>	
Min.-Wert [m]	Min.-value [m]	-/-
Max.-Wert [m]	Max.-value [m]	-/-

---

<b>Ruhestromaufnahme bei 12 V</b>	<b>Power consumption (sleep mode) at 12 V</b>	
Verbrauch [µA]	Consumption [µA]	(100 =<= 600)      511
<b>Sollwert</b>	<b>Target</b>	<b>Istwert / Current state</b>
4 mA	4 mA	-/-
20 mA	20 mA	-/-
<b>Funktionstest</b>	<b>Function test</b>	
SDI-12	SDI-12	<input type="checkbox"/>
SDI-12 über RS-485	SDI-12 via RS-485	<input checked="" type="checkbox"/>
Linearisierung	Linearizing	<input checked="" type="checkbox"/>

**Kennlinie bei 23.50 °C**      **Characteristic line at 23.50 °C**

Pressure [mbar]	Deviation [%]
0	0.00
800	0.00
1600	0.00
2400	0.00
3200	0.01
3600	0.01

---

<b>Sichtkontrolle</b>	<b>Visual control</b>	<input checked="" type="checkbox"/>
Serien-Nr., Messbereich	Serial no., measuring range	
<b>Zubehör</b>	<b>Accessories</b>	<input checked="" type="checkbox"/>
Betriebsanleitung	Operating instructions	

---

<b>HydroService</b>	<b>HydroService</b>	<b>Telefon, Phone</b>	<b>Fax</b>	<b>E-Mail</b>
Reparatur	Repair	+49 831 5617-430	+49 831 5617-289	HydroService@ott.com
Vertrieb	Sales	+49 831 5617-433	+49 831 5617-439	Repair@ott.com
		+49 831 5617-0	+49 831 5617-209	Sales@ott.com

**Figura 10.38**      **Imagen de la Hoja de calibración de la sonda PLS-C, conocida como FAT, de las siglas en ingles "Factory Acceptance Test"**

Partes que integran la estación prototipo para la medición de nivel, temperatura y conductividad eléctrica en aguas subterráneas:

## 1) SISTEMA DE ENERGÍA

### a) Panel solar.

Se debe contar con un panel solar que genere energía eléctrica en sitio. La energía que se genere durante el día abastecerá a todo el sistema de medición, adquisición y transmisión de la información; de igual forma, almacenará energía en la batería, para que ésta última pueda abastecer energía al sistema durante la noche. Se recomienda que al menos sea un panel de 60 W.

### b) Batería.

La estación requiere de un acumulador de energía o batería para almacenar la carga que genere el panel solar, dicha carga abastecerá al sistema de medición durante las noches o en condiciones de poca radiación solar, como lo son días nublados o lluviosos.

### c) Controlador de carga

Es necesario un sistema que permita administrar la energía para mantener en funcionamiento el prototipo para la medición de nivel y la sonda, por lo cual es necesario un controlador de carga, el cual se encargara de suministrar energía a la estación a través del panel solar cuando se genere la suficiente cantidad y, además, almacene una parte importante en la batería. Cuando la corriente del panel solar sea insuficiente, el controlador se encargará de utilizar la energía almacenada en la batería para continuar con la operación normal de la estación.

### d) Regulador de Voltaje

El voltaje nominal que se pretende utilizar en la estación es de 12[V] y debido a que el dispositivo de adquisición de datos requiere un sistema que permita bajar la tensión de 12[V] a un voltaje específico para funcionar adecuadamente, se requiere incorporar un sistema de regulación de voltaje en los elementos de la estación que permita inyectar al dispositivo de adquisición un voltaje nominal de 5[V]. El ya mencionado regulador de voltaje puede ser externo o estar incluido en el dispositivo de adquisición de datos.

## 2) SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

### a) Sonda para la medición de Nivel, Temperatura y Conductividad.

La sonda cuenta con un sistema de regulación interno, por lo cual, es posible alimentar con corriente directa entre 6 y 27 [V], nivel de tensión que esta

considerado con la batería (la cual se estima en 12 [V] y 28 [Ah]) y un panel solar de 60 [W] (lo que equivale a entregar un 12 [V] y una tensión máxima de 5[A]).

b) Adquisidor de datos.

El dispositivo que se propone para la adquisición de datos es una datalogger, el cual tiene un voltaje interno específico. Dicho dispositivo será programado para realizar las muestras periódicamente y almacenar la información en un dispositivo de almacenamiento masivo no volátil.

c) Interfaz de comunicación

Es necesario un sistema que permita realizar la transferencia de información entre la sonda y el datalogger, dicho sistema es conocido como interfaz de comunicación y permite interpretar las señales analógicas que son transmitidas por la sonda para su posterior almacenamiento en memoria no volátil del datalogger.

### 3) SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE LA INFORMACIÓN

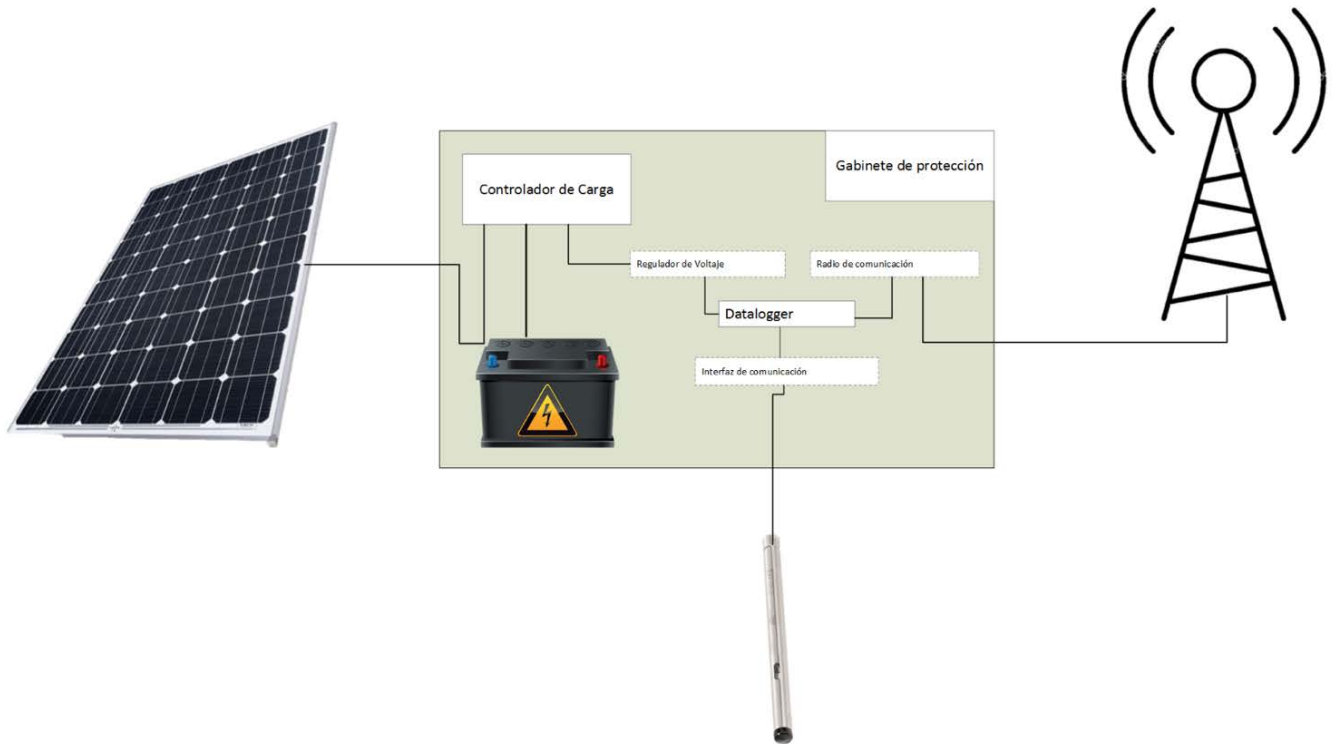
a) Transmisión digital

Para poder visualizar los datos que son generados por la sonda en el periodo en que se han programado las muestras que realiza el datalogger, es necesario contar con una radio que permita transmitir los datos almacenados a un concentrador de información, por lo cual, se incorpora un radio de transmisión digital de datos, dicho radio puede estar incluido dentro del datalogger o será un elemento adicional.

b) Antena de Transmisión

Para asegurar la transmisión correcta de la información recabada en sitio, es necesario aumentar la potencia de transmisión digital, para blindarla en contra de condiciones atmosféricas desfavorables para el envío de datos hacia el concentrador de información

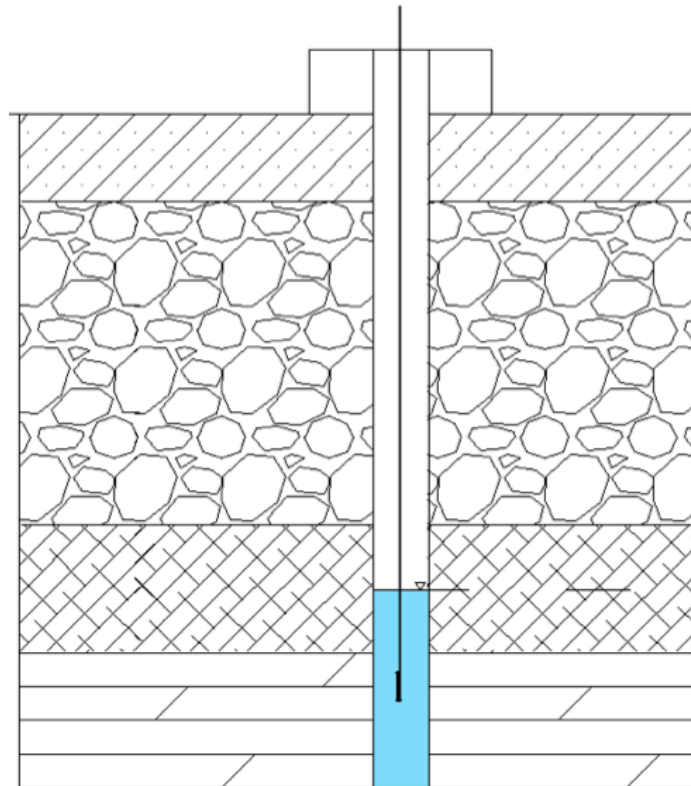
En la Figura 10.39 se muestra un diagrama general del prototipo de estación para monitoreo de nivel, temperatura y conductividad de aguas subterráneas.



**Figura 10.39** Diagrama lógico del prototipo para medición de nivel, temperatura y conductividad de aguas subterráneas



**Figura 10.40** Fotografía donde se muestra el gabinete y del panel fotovoltaico que integran propuesta de la estación de medición.



**Figura 10.41** Esquema donde se muestra la posición en la que debe estar o debe ser instalado el equipo de medición dentro del pozo.

En síntesis.

El prototipo presentado, brinda una gran versatilidad para poder ser instalado, por lo que prácticamente se puede colocar en cualquier sitio que tenga 1 m<sup>2</sup> para los elementos exteriores y el pozo para la instalación de la sonda, sus elementos importantes son:

**Sonda multiparamétrica de medición.** Se propone una sonda multiparamétrica que permita medir nivel, temperatura y conductividad eléctrica del agua; que sea un equipo que haya sido sometido a pruebas y exista un certificado avalando su buen funcionamiento.

**Almacenamiento de la información.** El datalogger permitirá almacenar toda la información generada por el equipo de medición.

**Transmisión de la información.** Dependiendo del sitio, la información puede ser transmitida por vía celular o vía satelital, lo cual involucra un costo adicional.

**Energéticamente autosuficiente.** El único requerimiento será que en el sitio exista radiación solar, (coloquialmente hablando, luz del sol) para que el panel fotovoltaico



genere la energía que la estación de medición requerirá y el sistema de energía incluyendo la batería funcione de manera óptima.

## **11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La recopilación de los **estudios previos** de la CONAGUA (2014, 2015) e IMTA (2018), así como la información generada del acuífero Xpujil permiten concluir que la zona de estudio presenta condiciones poco favorables para extraer agua subterránea y aprovecharla con fines de abastecimiento para satisfacer las necesidades de la Estación del Tren Maya y/o comunidades.

Destaca Información publicada por la CONAGUA (2015), en el documento de la determinación de la disponibilidad que el acuífero Xpujil tiene una área de 11,061 km<sup>2</sup>, la precipitación media anual de 1269 mm, temperatura media anual de 26°C, un volumen precipitado de 14, 036 Mm<sup>3</sup>/año, evapotranspiración de 11, 944 Mm<sup>3</sup>/año, volumen infiltrado de 2,099 Mm<sup>3</sup>/año y una disponibilidad media anual de 315.3 Mm<sup>3</sup>/año.

Los resultados del **censo de pozos y actualización piezométrica** en el acuífero Xpujil muestran que se registraron 53 aprovechamientos: de los cuales 46 corresponden a pozos, 3 norias y 1 olla de agua que suministran agua para el uso doméstico y servicios; se incluyen 3 pozos ubicados en el acuífero península de Yucatán, a 1 km de la laguna Silvituc que extraen agua subterránea y conducen hacia la Ciudad de Xpujil.

La profundidad de los pozos es de 80 a 200 m, los diámetros de descarga son de 1, 2 y 3", los caudales de extracción fluctúan entre 2 a 10 lps. Los 3 pozos en Silvituc tienen profundidades de 80 m, descargas de 12" y caudales de extracción de 40, 50 y 30 lps, respectivamente. Entregan 47 lps a Xpujil.

El acuífero Xpujil se explota por medio de 50 de captaciones emplazadas en las porciones norte y sur, predominando los pozos perforados en las poblaciones, los que extraen pequeños caudales ( entre 5 y 10 l/s), principalmente para usos doméstico, agrícola y abrevadero. En la zona de Xpujil no se tienen perforados pozos, por lo que captan el agua de lluvia de sus techos y los almacenan en depósitos para su uso posterior.

Los resultados del análisis de la profundidad al nivel estático (PNE), elevación del nivel estático (ENE) y dirección del flujo subterráneo muestran que: de manera general la PNE fluctúa entre los 26 (Silvituc) y 96 m (acuífero Xpujil) y se identificó que en el acuífero, en la zona de Xpujil aproximadamente a 290 msnm, se tiene un alto topográfico, originando un parteaguas donde el flujo superficial y del agua subterránea se divide, presentando direcciones de flujo hacia el oriente y poniente principalmente.

Los resultados de la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero mediante la realización de 5 pruebas bombeo cuyos datos fueron interpretados utilizando la metodología de Theis (1935) y Cooper-Jacob (1946), arrojan valores de la conductividad hidráulica entre 7.05 E-02 m/seg (6,091 m/día) y 8.16 E-04 m/seg (70.50 m/día), que de acuerdo con la literatura especializada (Freeze & Cherry, 1979) y el

modelo conceptual del acuífero Xpujil, estos valores corresponden a rocas calizas kársticas.

La exploración geofísica en 9 sitios, para investigar la conductividad eléctrica que presentan los materiales hasta una profundidad promedio de 150 m y con ello definir las características litológicas del sitio con potencial geohidrológico. Muestran que mediante los 9 sondeos realizados, se construyeron tres perfiles, donde por los valores de resistividad calculados, se clasificó como la unidad U2b que se asocia con calizas fracturadas, con desarrollo de karsticidad y posible saturación, por lo que se considera con mejor potencial geohidrológico, pero las posibles intercalaciones de margas y arcillas reducen su permeabilidad y su potencial hídrico. Lo anterior crea la incertidumbre, ya que posibles perforaciones proporcionen caudales bajos 2 a 5 lps, que pudiera no ser económicamente explotables ya que se tienen que conducir hacia la Zona urbana de Xpujil.

La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Xpujil: Con la aplicación del método DRASTIC (Aller et al., 1987), que es el más difundido para determinar la vulnerabilidad de acuíferos, ya que clasifica y pondera los parámetros intrínsecos, reflejo de las condiciones naturales del medio como: la profundidad al nivel estático y/o piezométrico (D), la recarga (R), la litología del acuífero (A), la naturaleza del suelo (S), la pendiente del terreno (T), naturaleza de la zona no saturada (I) y la conductividad hidráulica (C). Dadas las condiciones del acuífero Xpujil, se asignaron los valores determinados a cada uno de los siete parámetros en la ecuación, así como los índices de ponderación, se procede a calcular el índice de vulnerabilidad sumando los productos de los diferentes parámetros por su índice de ponderación (tabla 11.1):

**Tabla 11.1 Valor de los parámetros, índice de ponderación y valor del índice de vulnerabilidad obtenido mediante el método DRASTIC.**

D		R		A		S		T		I		C		Índice vulnerabilidad
Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	Dr	Dw	
1	5	8	4	10	3	10	2	5	1	10	5	8	3	166

En esta aplicación se ha determinado un valor del índice de vulnerabilidad de 166 que de acuerdo con el método DRASTIC corresponde a una "Vulnerabilidad alta".

La aplicación del método DRASTIC es una aproximación al riesgo de afectación al acuífero de Xpujil por la obra lineal de la vía férrea del Tren Maya, obtenida a partir de la estimación de su vulnerabilidad mediante métodos paramétricos, como es el DRASTIC, por considerar que la afectación vendrá dada por un determinado tipo de actividad y que el riesgo dependerá del grado de protección (vulnerabilidad) del medio.

Con respecto a la **determinación de los parámetros de campo** en julio de 2019, fueron determinados la temperatura, pH y conductividad eléctrica (Tabla 11.2), del análisis de los datos de temperatura medida en los 10 aprovechamientos (Figura 11.1), y que de acuerdo con los criterios mostrados en la Tabla 11.3, se identifican agua del tipo hipotermal, ya que de manera general los valores registrados fluctúan de 28.4 a 30.2°C.

Tabla 11.2 .Parámetros de campo

Identificación	Parámetros físicos de campo			Uso
	T (°C)	pH	C.E. (µs/cm)	
Pozo Miguel Alemán	29.2	6.72	2,234	Servicios
Pozo El Cedral	29.7	6.90	1,868	Servicios
Manantial El Chorro	28.4	6.70	2,359	-
Pozo Zoh Laguna	28.4	7.07	1,440	Servicios
Pozo Caobas 2 Nvo	29.5	6.50	1,082	Servicios
Pozo Rcho Los 3 Reyes	29.0	6.63	2,807	Servicios
Pozo Nuevo Veracruz	30.2	6.88	834	Servicios
Pozo Manuel Cresencio	28.9	6.95	986	Servicios
Pozo 2 Silvituc	28.4	7.03	1,005	Servicios
Pozo 3 Silvituc	28.6	7.23	437	Servicios

El pH registrado fluctúa de 6.5 a 7.23, concluyendo que las aguas muestreadas con un pH menor que 7 son ligeramente acidas y las que registran un pH mayor que 7 son ligeramente bases o alcalinas.

La conductividad eléctrica registrada muestra variaciones entre 437 y 2359 µs/cm, clasificando de acuerdo con los criterios mostrados en la tabla 11.4 que el agua subterránea de los pozos Nuevo Veracruz, Manuel Cresencio y Pozo 3 Silvituc, son potables desde este punto de vista y las aguas de los aprovechamientos restantes no cumplen con esta clasificación.

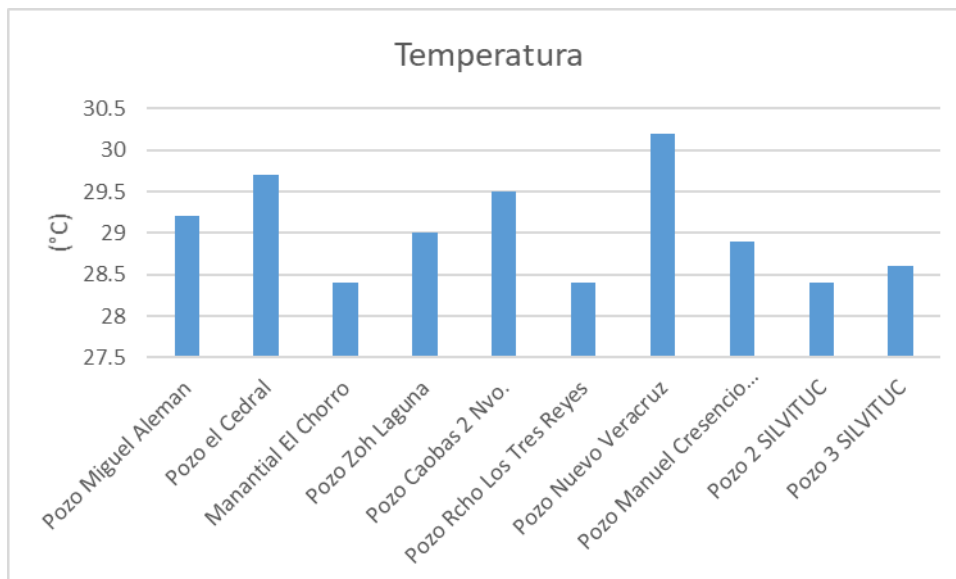


Figura 11.1 Temperatura registrada en los aprovechamientos del acuífero Xpujil.

Tabla 11.3 Clasificación de aguas termales

Hipertermales	>45°C
Mesotermiales	De 35°C a 45°C
Hipotermiales	de 21°C a 35°C
Aguas frías	<20°C

Tabla 11.4 Clasificación del agua con respecto a la conductividad eléctrica.

Clasificación	CE (µS/cm)
Pura	0.05
Destilada	0.5-5
Lluvia	5-30
Subterránea potable	30-1000
Mar	50,000

**Para los análisis fisico-químicos e isotópicos**, se recolectaron muestras de agua subterránea en julio de 2019, en 10 aprovechamientos distribuidos en el acuífero Xpujil, las especies químicas e isótopos ambientales medidos, fueron los **metales y metaloides**: Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, Hg, Ho, In, K, La, Lu, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Sb, Sc, Se, Si, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Te, Th, Ti, Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr; los **aniones**: F-, Cl-, Br-, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>=</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup> y el **Oxígeno 18** (18O), **Deuterio** (2H), **Tritio ambiental** (3H), con los siguientes resultados:

**Tabla 11.2 Análisis físico-químicos (en mg/L y meq/L), familia de agua y tiempo de residencia.**

	SDT	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Familia de agua	Tiempo residencia
Limites NOM-127	<b>1,000</b>			200		400		250		
Miguel Alemán	<b>1,676</b>	538 <b>26.85</b>	93.6 7.70	91.10 3.96	5.04 0.13	1600 <b>33.31</b>	251 4.11	120 3.38	Sulfatada cálcica	12
El Cedral	<b>1401</b>	420 <b>20.96</b>	80.4 6.62	82.8 3.60	4.89 0.12	1200 <b>24.98</b>	290 4.75	103 2.90	Sulfatada cálcica	12
Manantial El chorro	<b>1,769</b>	629 <b>31.39</b>	26.2 2.16	89.6 3.90	5.86 0.15	1530 <b>31.85</b>	305 4.99	120 3.38	Sulfatada cálcica	<b>8</b>
Zoh-Laguna	<b>1,080</b>	646 <b>32.84</b>	33.6 2.76	256.0 11.13	9.38 0.24	1660 <b>34.56</b>	377 6.18	292 8.22	Sulfatada cálcica	<b>12</b>
Caobas nuevo 2	812	159 <b>7.93</b>	49.5 4.07	57.5 2.50	4.25 0.11	415 <b>8.640</b>	290 4.75	65.6 1.85	Sulfatada cálcica	12
Los Tres Reyes	<b>2105</b>	172 <b>8.58</b>	34.4 2.83	144.0 6.26	7.25 0.19	64.6 1.345	410 6.72	348 <b>9.80</b>	Clorurada cálcica	>30
Nuevo Veracruz	626	112 <b>5.59</b>	41.4 3.41	58.6 2.55	6.74 0.17	198.0 4.122	351 <b>5.75</b>	42.5 1.20	Bicarbonatada cálcica	12
Manuel Cresencio	740	110 <b>5.49</b>	32.3 2.66	125.0 5.43	4.17 0.11	29.7 0.618	249 <b>4.08</b>	124 3.49	Bicarbonatada cálcica	>30
P2 Silvituc	754	217 <b>10.83</b>	14.4 1.18	21.7 0.94	3.58 0.09	363 <b>7.557</b>	321 5.26	19.1 0.54	Sulfatada cálcica	8
P3 Silvituc	328	101 <b>5.040</b>	3.74 0.31	9.25 0.40	2.77 0.07	4.71 0.098	271 <b>4.44</b>	10 0.28	Bicarbonatada cálcica	>10

Las sustancias disueltas en un agua pueden sumar desde unos pocos mg/L, en un manantial de montaña hasta más de 100,000. Más del 99% de estas sustancias disueltas en un agua no contaminada corresponde a los aniones (Cl, SO<sub>4</sub> y CO<sub>3</sub>H), cationes (Ma, Mg, Ca) y los no iones como el SiO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.

En el caso del acuífero Xpujil, tenemos que las muestras de los pozos Nuevo Veracruz, Manuel Cresencio y Pozo 3 Silvituc son bicarbonatadas cálcicas, con concentraciones de sulfatos menores que los establecidos como límites permisibles en la NOM-127. El tiempo de residencia estimado fluctúa entre los 8 y 12 años, clasificándose con el menor tiempo de permanencia en el subsuelo característico de la familia de agua bicarbonatada.

Las muestras del agua subterránea de los pozos Miguel Alemán, El Cedral, Manantial El Chorro, Zoh-Laguna, Caobas 2 Nuevo y pozo 2 Silvituc son sulfatadas cálcicas. Las concentraciones de sulfatos en 4 pozos con valores que fluctúan entre 1200 y 1600 mg/L, son elevadas respecto al valor de 400 mg/L, establecido como límite permisible por la NOM-127. Los pozos Los Tres Reyes y el Pozo 2 Silvituc presentan valores ligeramente arriba y debajo de valor establecido como límite con 410 y 363 mg/L, respectivamente. Los sulfatos provienen de la disolución del yeso que abunda en la región donde se tiene la formación Icaiche.

La muestra del agua subterránea del pozo Los Tres Reyes es clorurada cálcica con una concentración de cloruro de 348 mg/L, superior al valor establecido como límite para agua potable por la NOM-127. Este pozo también registra una concentración elevada de nitritos de 60.55 mg/L, ya que la NOM-127 establece como límite permisible el valor de 10 mg/L. Su presencia y alto valor se asocia a la contaminación orgánica, ya que en rancho se tiene ganado.

Las rocas más antiguas se localizan al sur del estado de Yucatán, y corresponden a rocas de la época del Paleoceno-Eoceno Indiferenciado, que se encuentran dolomitizadas, silicificadas o recristalizadas, dentro de las que se incluyen a las rocas evaporitas de la formación Icaiché, constituidas por yeso, anhidrita y halita, ricas en sulfatos y cloruro de sodio respectivamente.

## **Recomendaciones**

Captar el agua proveniente de las dos descargas de agua subterránea en Nuevo Becal (El Chorro 1 y 2), tratarlas para quitar el contenido de sulfatos y conducirla a Xpujil.

Solicitud a la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Campeche (CAPAE), para el suministro de agua proveniente de SILVITUC a Xpujil y a la posible Estación del Tren maya en Xpujil. Una segunda opción lo constituye la perforación de un 4° pozo cuyo caudal se incorpore al suministrado por los 3 pozos en Silvituc.

Promover la perforación de pozos en las zonas exploradas mediante geofísica: En Nuevo becal, Río Bec, Ramón Corona y Constitución con la limitante de extraer pocos caudales y conducirlos de distancias considerables a Xpujil.

## 12 REFERENCIAS

- Ayers, R.S. y Westcot, D. W.; 1985: La calidad del agua para la agricultura. FAO, Estudio de Riego y Drenaje No. 29, Roma.
- Bautista, F., Palacio-Aponte, G., Quintana, P., Zinck, J.A., 2011, Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico: *Geomorphology* 135, 308-321.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). the Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 507-524.
- Blair, R.W., 1986, Karst Landforms and Lakes (en línea): NASA, Geomorphology from Space, Chapter 7, <<http://disc.gsfc.nasa.gov/geomorphology/>>.
- Blum J.D., Chamberlain C.P., Hingstone M.P., Koeberl C., Marin L.E., Schuraytz B.C., Sharpton V.L., 1993, Isotopic comparison of K/T boundary impact glass with melt rock from the Chicxulub and Manson impact structures. *Nature* 364: 325-327.
- Bonet, F., Butterlin, J. 1962, Stratigraphy of the northern part of the Yucatán Peninsula, Guide Book: Field Trip to Peninsula of Yucatan: USA, New Orleans, New Orleans Geological Society, 52-57.
- Butterlin, J. (1958). Reconocimiento Geologico Preliminar del Territorio de Quintana Roo. IN SPANISH. Preliminary Geological Reconnaissance of The Quintana Roo Territory.
- Claassen, H.C. (1982). Guidelines and techniques for obtaining water samples that accurately represent the water chemistry of an aquifer, U.S. Geol. Surv. Open File Report, 82-1024, 49 p.
- Clark, I.D., and Fritz, P., 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, N.Y., U.S.A., 63-108 y 287-290.
- Craig, H., 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water, *Science*, 133: 1833-1834.
- Comisión Nacional del Agua, (2015). Subdirección General Técnica. "Actualización de la disponibilidad media anual de Agua Subterránea en el acuífero (1701) Xpujil, Campeche.
- Campa, M. F., Coney, P. J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040-1051.
- Dengo, G. 1985, Mid America; Tectonic setting for the pacific margin from southern Mexico to northwestern Colombia; in Nairn, A.E.M, Stehli, F.G.(eds.) *The oceanic Basins and Margins*, v. 7<sup>a</sup>. The Pacific Ocean: New York, Plenum Press, p. 123-180.



- Driscoll, G.F. (1986). "Groundwater and Wells. Johnson Division, St. Paul, Minn.
- Escolero, O., Marin, L.E., Steinich, B., Pacheco, J., Cabrera, A., Alcocer, J., 2002. Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: the Merida Yucatan, Mexico case study. *Water. Resour. Manage.* 16, 351-367.
- Flores, G. (1952). Geology of Northern British Honduras: GEOLOGICAL NOTES. *AAPG Bulletin*, 36(2), 404-409.
- Fritz P., Basharmal G., Drimmie R. Ibsen J. and Qureshi R., 1989. Oxygen isotope exchange between sulfate and water during bacterial reduction of sulfate. *Chem. Geol.*, 79, 99-105
- Horita, J., 2005. Isotopes in the Water Cycle, Past, Present and Future of a Developing Science, IAEA, Ed. By Pradeep K. Aggarwal, Joel R. Gat, and Klaus F.O. Fröhlich, Springer, pp 271-275
- Hutton, L.G., 1983. Field testing of water in developing countries. Unwin Brothers Limited. Great Britain. 125p.
- IAEA, 2005. Isotopes in the water cycle. Springer, Past, present and future of a developing science. Springer. The Netherlands. 381p.
- Gestenhauer, Armin, 1969, Eln Karst morphologischer Vergleich zwischen, Florida and Yucatán: *Verhandlungen der deutschen Geographentages*, v. 36, p. 332-341.
- Keppie, J. D., 2004, Terranes of Mexico revisited: 1.3 billion year odyssey: *International Geology Review*, 46, 765-794.
- Ramos, E. L. (1975). Geological summary of the Yucatan Peninsula. In *The Gulf of Mexico and the Caribbean* (pp. 257-282). Springer US.
- Lugo-Hubp, H.J., Aceves-Quesada, J.F., Espinoza-Pereña, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán: *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista*, 10(2), 143-150.
- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., & Pereira, A. (2014). Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1: 50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 31(1), 127-137.
- Metcalfe, C. D., Beddows, P. A., Bouchot, G. G., Metcalfe, T. L., Li, H., & Van Lavieren, H. (2011). Contaminants in the coastal karst aquifer system along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Environmental pollution*, 159(4), 991-997.

- Mazor, E., 1991. Applied Chemicals and isotopic groundwater hydrology. Burns & Smith Ltd., Great Britania. 271p.
- Morán-Zenteno, D. J., Cerca, M., & Keppie, J. D. (2005). La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 319-341.
- Ortega-Gutiérrez, F., Elies\_Herrera, M., Reyes-Salas, M., Macias-Romo, C., López, R., 1999, Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections: *Geology*. 27(8): p. 719-722.
- Ortega-Gutiérrez, F., Solari L.A., Ortega-Obregón C., Elías-Herrera M. Martens U., Morán-Icál S., Chiquín M., Keppie D.J., Torres de León. Y Shaaf P., 2007, The Maya Chortis Boundarie: A tectonostratigraphic approach. *International Geology Review*, v. 49, p. 1-29.
- SARH, (1990) "Sinopsis Geohidrológica del Estado de Quintana Roo", Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; Comisión Nacional del Agua; Subdirección General de Administración del Agua; Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Sapper, K. (1894). Informe sobre la geografía física y la geología de los estados de Chiapas y Tabasco. *Agricultura, Minería e Industria*, Boletín, 3, 187-211.
- Sedlock, R. L., Ortega-Cutiérrez, F., Speed, C., 1993, Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico: Boulder, Colorado, *Geological Society of America*, Special Paper, 278, 153 p.
- SGM, 2005. Carta geológico-minera E16-4-7 (Chetumal) escala 1:250 000. *Geología y Geoquímica del Servicio Geológico Mexicano*.
- Velázquez L. & Ordaz A. (1992) Provincias hidrogeológicas de México. *Ingeniería Hidráulica en México* 7(11), 36-55.
- Velázquez, L., 1986. Aplicación de principios geoquímicos en la hidrología kárstica de la península de Yucatán, *Ingeniería Hidráulica en México*, mayo-agosto de 1986, 21-29
- Weidie, A. E.: 1982, 'Lineaments of the Yucatan Peninsula and Fractures of the Central Quintana Roo Coast, in *Road Log and Supplement, Guidebook of the Geological Society America Meeting Field Trip No. 10*, New Orleans Geological Society, New Orleans, pp. 21-25.
- CNA, "Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán. 2015.
- Carta Geológico-Minera E16-4-7 escala 1:250,000 del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

- CONSTABLES.C., Parker R.L., Constable C.G., "Occam's Inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data", *Geophysics*, v 52, n3, Marzo 1987.
- Kirsch R., Sengpiel K.P. Voss W. 2003. The use of electrical conductivity mapping in the definition of an aquifer vulnerability index. *NearSurfaceGeophysics*. Vol. 1 pp.13-19
- Koefoed O. *Geosounding Principles 1. Resistivity Sounding Measurements*. Elsevier Science Publishers B.V., 1979
- Loke, M. H. and Barker, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152
- Loke, M.H. and Barker, R.D. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, 1682-1690
- WINGLINK, User's Manual, Edition 4, © Gosystemsrl, Milan, Italia, 1994.
- Haoping Huang and Wong, I.J (2000), "Conductivity and Susceptibility Mapping using Broadband Electromagnetics sensors", Geophex, Ltd.
- Wong, I.J., Keiswetter, D., Fields, G, and Sutton, L. (1996), "GEM-2 A New Multifrequency Electromagnetic Sensor", *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1, No. 2, pp 129-137.
- Martínez, m.; Delgado, p. y Fabregat, v. (1998): Aplicación del método drástico para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: Valencia*. AIH-GE.