



PROYECTO FINANCIADO  
CON RECURSOS DEL  
FIDEICOMISO NO.1490  
PARA APOYAR LOS  
PROGRAMAS, PROYECTOS  
Y ACCIONES AMBIENTALES  
DE LA MEGALÓPOLIS

## INFORME FINAL

# Reactivación de la red piezométrica y de calidad del agua del acuífero Valle del Mezquital



# **FIDEICOMISO NO.1490 FIDEICOMISO PARA APOYAR LOS PROGRAMAS, PROYECTOS Y ACCIONES AMBIENTALES DE LA MEGALÓPOLIS**

## **REACTIVACIÓN DE LA RED PIEZOMÉTRICA Y DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL**



# Índice

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>2. GENERALIDADES</b> .....	<b>15</b>
2.1. Antecedentes .....	15
2.2. Objetivos del estudio .....	15
2.3. Objetivo general .....	15
2.4. Estudios previos .....	16
2.5. Localización de la zona de estudio .....	32
2.6. Vías de comunicación .....	33
2.7. Actividades económicas .....	34
2.8. Fisiografía .....	35
2.9. Hidrología .....	36
2.10. Infraestructura hidráulica .....	39
2.11. Clima .....	40
2.12. Geología superficial .....	43
2.13. Estratigrafía .....	44
<b>3. CENSO DE APROVECHAMIENTOS</b> .....	<b>49</b>
<b>4. DETERMINACIÓN DE LOS SESENTA POZOS PARA LA REACTIVACIÓN DE LA RED PIEZOMÉTRICA Y DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL</b> .....	<b>53</b>
4.1. Criterios de Selección .....	54
4.2. Análisis piezométrico histórico .....	55
<b>5. DETERMINACIÓN DE LA RED DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL</b> .....	<b>67</b>
5.1. Análisis piezométrico histórico .....	67
5.2. Diseño de la red de calidad del agua .....	68
<b>6. NIVELACIÓN DE BROCALES</b> .....	<b>71</b>
6.1. Metodología .....	71
6.2. Brocales nivelados .....	74
<b>7. EVOLUCIÓN DE LOS DATOS HISTÓRICOS HIDROGEOQUÍMICOS</b> .....	<b>77</b>
7.1. Compilación de información .....	77
7.2. Determinación de las familias de agua .....	77
7.3. Cálculo del error .....	80
7.4. Determinación de familias de agua .....	80
7.5. Evolución de la calidad del agua de los datos históricos .....	92
7.6. Simulación hidrogeoquímica .....	114

<b>8.</b>	<b>MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA E INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA .....</b>	<b>119</b>
8.1.	Monitoreo de aprovechamientos .....	119
8.2.	Evaluación de la calidad del agua .....	121
8.3.	Análisis espacial e interpretación hidrogeoquímica .....	129
8.4.	Isótopos estables .....	140
8.5.	Isotopos de Tritio .....	145
8.6.	Resultados e impactos.....	148
8.7.	Posibles desviaciones, áreas de oportunidad y riesgos potenciales identificados.	148
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>149</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>151</b>

# Tablas

Tabla 2.1. Capacidad de los canales en el Distrito de Riego 03 .....	39
Tabla 2.2. Precipitación en las estaciones climatológicas .....	42
Tabla 3.1. Tabla censo histórico de aprovechamientos .....	50
Tabla 5.1. Selección de pozos a partir del censo del 2020 .....	69
Tabla 5.2. Selección de pozos a partir del informe Lesser, 2016 .....	70
Tabla 5.3. Selección de pozos a partir del informe IMTA, 2013 .....	70
Tabla 6.1. Red de monitoreo piezométrica y brocales nivelados .....	74
Tabla 7.1. Aprovechamientos considerados para el análisis histórico de hidrogeoquímico y calidad del agua.....	78
Tabla 7.2. Aprovechamientos considerados para el análisis de familias de agua 2022.....	79
Tabla 7.3. Tipos de agua reportados en el Valle del Mezquital de 2012 a 2019 y 2022 .....	87
Tabla 7.4. Tipos de agua reportados en el Valle del Mezquital de cada uno de los aprovechamientos .....	88
Tabla 7.5. Índices de saturación calculados en el Valle del Mezquital (monitoreo 2017) .....	115
Tabla 7.6. Índices de saturación calculados en el Valle del Mezquital (monitoreo 2018) .....	115
Tabla 7.7. Índices de saturación calculados Valle del Mezquital (monitoreo 2019).....	116
Tabla 7.8. Índices de saturación calculados en el Valle del Mezquital (monitoreo 2022 Lluvias).....	116
Tabla 8.1. Aprovechamientos considerados para la evaluación de calidad del agua 2022 (estiaje y Lluvias) .....	120
Tabla 8.1. Resultados fisicoquímicos, elementos potencialmente tóxicos y microbiológicos de los aprovechamientos muestreados en temporada de estiaje (marzo) 2022.....	125
Tabla 8.2. Resultados fisicoquímicos, elementos potencialmente tóxicos y microbiológicos de los aprovechamientos muestreados en temporada de Lluvias (octubre) 2022.....	127
Tabla 8.3. Isótopos estables estiaje .....	143
Tabla 8.4. Isótopos estables lluvia .....	144
Tabla 8.5. Isótopos de tritio en estiaje .....	146
Tabla 8.6. Isótopos de tritio en Lluvias.....	147





# Figuras

Figura 2.1.	Localización del acuífero del Valle del Mezquital. ....	32
Figura 2.2.	Municipios que extraen agua del acuífero de Valle del Mezquital .....	33
Figura 2.3.	Mapa de carreteras en la zona de estudio. ....	34
Figura 2.4.	Mapa fisiográfico. ....	36
Figura 2.5.	Región hidrológica y cuencas que comprende .....	37
Figura 2.6.	Subregiones hidrológicas .....	38
Figura 2.7.	Corrientes superficiales principales .....	39
Figura 2.8.	Mapa de unidades climáticas .....	40
Figura 2.9.	Mapa de temperatura media anual en la zona de estudio .....	41
Figura 2.10.	Mapa de precipitación media anual en la zona de estudio .....	43
Figura 2.11.	Mapa geológico de la zona de estudio .....	44
Figura 2.12.	Columna estratigráfica de la zona de estudio (elaborada por Lesser y Asociados 2013). ....	47
Figura 3.1.	Censo de aprovechamientos. ....	51
Figura 4.1.	Ubicación geográfica de los pozos en el acuífero del Valle del Mezquital (fuente: elaboración propia con información de Conagua, 2020; IMTA 2017; Lesser, 2013). ....	54
Figura 4.2.	Selección preliminar de los pozos a considerar dentro de la red piezométrica en el Valle del Mezquital considerando un radio de 12 Km de la presa Endhó (fuente: elaboración propia con información de Conagua, 2020; IMTA 2017; Lesser 2013). ....	55
Figura 4.3.	Profundidad al nivel estático (m) 2000. ....	57
Figura 4.4.	Profundidad al nivel estático (m) 2007. ....	58
Figura 4.5.	Profundidad al nivel estático (m) 2013. ....	59
Figura 4.6.	Profundidad al nivel estático (m) 2020. ....	60
Figura 4.7.	Elevación del nivel estático (msnm) 2000. ....	61
Figura 4.8.	Elevación del nivel estático (msnm) 2007. ....	62
Figura 4.9.	Elevación del nivel estático (msnm) 2013. ....	63
Figura 4.10.	Elevación del nivel estático (msnm) 2020 .....	64
Figura 4.11.	Evolución del nivel estático mediante 2000-2020 (m), Valle del Mezquital. ....	65
Figura 4.12.	Ubicación geográfica de sesenta pozos como propuesta para la reactivación de la red de piezométrica en el acuífero del Valle del Mezquital (fuente: elaboración propia con información del IMTA, 2020) .....	66
Figura 5.1.	Ubicación geográfica de treinta pozos como propuesta para la reactivación de la red de calidad del agua en el acuífero del Valle del Mezquital (fuente: elaboración propia con información del IMTA, 2017; Lesser, 2013) .....	68
Figura 3.1.	Banco de apoyo. ....	72
Figura 7.1.	Simbología del diagrama de Piper. ....	80
Figura 7.2.	Diagrama de Piper del año 2012 .....	81
Figura 7.3.	Diagrama de Piper del año 2013 .....	82

Figura 7.4.	Diagrama de Piper del año 2014 .....	82
Figura 7.5.	Diagrama de Piper del año 2015 .....	83
Figura 7.6.	Diagrama de Piper del año 2016 .....	83
Figura 7.7.	Diagrama de Piper del año 2017 .....	84
Figura 7.8.	Diagrama de Piper del año 2018 .....	84
Figura 7.9.	Diagrama de Piper del año 2019 .....	85
Figura 7.10.	Diagrama de Piper del año 2022 (estiaje) .....	85
Figura 7.11.	Diagrama de Piper del año 2022 (lluvias).....	86
Figura 7.12.	Concentración de pH en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	93
Figura 7.13.	Concentración de SDT en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022 ....	94
Figura 7.14.a	Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2012, 2013 y 2014).....	95
Figura 7.14.b.	Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2015, 2016 y 2017).....	96
Figura 7.14.c.	Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2018, 2019 y 2022).....	97
Figura 7.15.	Concentración de Nitratos en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	98
Figura 7.16.a.	Distribución espacial de las concentraciones de Nitratos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2012, 2013 y 2014) .....	99
Figura 7.16.b.	Distribución espacial de las concentraciones de Nitratos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2015, 2016 y 2017).....	100
Figura 7.16.c.	Distribución espacial de las concentraciones de Nitratos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2018, 2019 y 2022).....	101
Figura 7.17.	Concentración de nitritos en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	102
Figura 7.18.	Concentración de Sulfatos en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	103
Figura 7.19.a	Distribución espacial de las concentraciones de sulfatos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2012, 2013 y 2014).....	104

Figura 7.19.b. Distribución espacial de las concentraciones de sulfatos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2015, 2016 y 2017).....	105
Figura 7.19.c. Distribución espacial de las concentraciones de sulfatos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2018 y 2019).....	106
Figura 7.20. Concentración de Dureza total en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	107
Figura 7.21. Concentración de Alcalinidad total en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	108
Figura 7.22. Concentración de fluoruros en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	109
Figura 7.23. Concentración de plomo en el acuífero de Valle de Mezquital 2018 .....	110
Figura 7.24. Concentración de arsénico en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	111
Figura 7.25. Concentración de CF en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022.....	112
Figura 7.26. Comportamiento de la calidad conforme al índice CCME-WQI de 2012 a 2022. ....	114
Figura 8.1. Ubicación de los pozos monitoreados en las campañas de 2022.....	121
Figura 8.2. Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital en estiaje. ....	129
Figura 8.3. Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital.....	130
Figura 8.4. Distribución espacial de las concentraciones de NO <sub>3</sub> en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital, estiaje.....	131
Figura 8.5. Distribución espacial de las concentraciones de NO <sub>3</sub> en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital, lluvias. ....	132
Figura 8.6. Distribución espacial de las concentraciones de arsénico en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital, estiaje. ....	133
Figura 8.7. Distribución espacial de las concentraciones de arsénico en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital, lluvias. ....	134
Figura 8.8. Diagrama arsénico vs estroncio.....	135
Figura 8.9. Diagrama arsénico vs. sulfato .....	136
Figura 8.10. Diagrama sodio vs cloro.....	137
Figura 8.11. Química del agua de los manantiales y la presa Endhó.....	138
Figura 8.12. Química de las muestras con mezcla de agua superficial y subterránea ....	139
Figura 8.13. Química de las muestras de agua recargadas por la presa Endhó.....	140
Figura 8.14. Isótopos estables para agua de precipitación y evaporada .....	141
Figura 8.15. Isótopos estables estiaje y lluvias.....	141
Figura 8.16. Exceso de deuterio de los aprovechamientos subterráneos de el Valle del Mezquital .....	142
Figura 8.17. Tritio en los manantiales .....	145



# DIRECTORIO

## COMISION AMBIENTAL DE LA MEGALOPOLIS CAME)

**Dr. Víctor Hugo Paramo Figueroa**  
Coordinador Ejecutivo

**Mtro. Ramiro Barrios Castrejón**  
Coordinador de Gestión de la Calidad  
Ambiental en Zonas Conurbadas y  
Metropolitanas

**Mtra. Gloria Julissa Calva Cruz**  
Directora de Prevención y Control  
de Contaminación Urbana en Zonas  
Metropolitanas

**Mtro. Luis Fernando Lahud**  
Flores Director de Coordinación y  
Vinculación Institucional

## INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA)

**Dr, Adrian Pedrozo Acuña**  
Director General del IMTA

**Dr. Juan Pablo Rodríguez  
Rincón**  
Coordinador de Sistemas Hídricos

**Dr. Edgar Yuri Mendoza Cázares**  
Subcoordinador de Gestión de  
Aguas Subterráneas





# INTRODUCCIÓN

La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) es un organismo de coordinación política constituido el 23 de agosto del 2013, mediante un convenio de coordinación entre el Gobierno federal por conducto de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y los gobiernos del Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala, con el objeto de llevar a cabo la planeación y ejecución de acciones en materia de protección al ambiente, de preservación y restauración del equilibrio ecológico en la región que se extiende a las 16 delegaciones del Ciudad de México y de los 224 municipios distribuidos entre el Estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala.

El proyecto Reactivación de la red piezométrica y de calidad del agua del acuífero Valle del Mezquital se alinea con las acciones que la CAME debe observar y ejecutar en materia de protección y mejoramiento del ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico dentro del territorio definido en la cláusula segunda del convenio de creación de la CAME, así como en su zona de influencia ecológica:

Los altos niveles de contaminación encontrados en las aguas del Valle del Mezquital han generado una emergencia ambiental y sanitaria, por lo que se requiere una red y programa de monitoreo de las aguas subterráneas impactadas por la infiltración de aguas residuales no tratadas. Se han realizado estudios para caracterizar la calidad del agua subterránea, sin embargo, los últimos monitoreos piezométricos del acuífero los elaboró la Conagua en 2007 y 2012-2013. La red cubre parcialmente las inmediaciones de la presa Endhó.

# 2

## GENERALIDADES







## 2. GENERALIDADES

### 2.1. Antecedentes

La zona del Valle del Mezquital es una región de gran interés por el desarrollo agrícola que ha experimentado desde el siglo pasado cuando las aguas residuales de la Ciudad de México se utilizaron para el riego.

En décadas pasadas el Valle del Mezquital ha sido objeto de diversos estudios, entre los que se destacan los geohidrológicos, hidrológicos, agrícolas y de salud, principalmente. Entre los principales impactos que se han observado en estos años es la zona son los ascensos en los niveles del agua subterránea debido a la recarga inducida que se experimenta a través de los retornos de riego. La agricultura se lleva a cabo por métodos tradicionales de riego rodado, lo cual favorece el exceso de riego y en consecuencia un volumen mayor de retorno de riego que se incorpora al acuífero.

El proyecto *Reactivación de la red piezométrica y de calidad del agua del acuífero Valle del Mezquital* se alinea con las acciones que la CAME debe observar y ejecutar en materia de protección y mejoramiento del ambiente y de la preservación y restauración del equilibrio ecológico dentro del territorio definido en la cláusula segunda del convenio de creación de la CAME, así como en su zona de influencia ecológica.

### 2.2. Objetivos del estudio

Los objetivos que a continuación se establecen son los que corresponden fielmente a los estipulados en los términos de referencia que son la base técnica para la elaboración del presente estudio.

### 2.3. Objetivo general

*Reactivar la red de medición de niveles y calidad del agua subterránea que permita actualizar el comportamiento del acuífero en la zona de influencia de la presa Endhó en forma sistemática.*

## Objetivos particulares:

- Analizar la información histórica de los datos de piezometría y de calidad del agua.
- Reactivar la red de monitoreo piezométrica de la Conagua.
- Monitorear la calidad del agua subterránea en sesenta aprovechamientos subterráneos en conjunto con las organizaciones sociales locales.

## 2.4. Estudios previos

En la zona que comprende el acuífero y la región aledaña al Valle del Mezquital se han realizado dos estudios hidrogeológicos con el fin de evaluar su disponibilidad de agua. A continuación, se mencionan los puntos más relevantes de estos estudios, destacando los aspectos que se consideraron de mayor interés para el presente proyecto.

- ***Estudio hidrogeoquímico de la porción centro-oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. Documento elaborado por el Ing. Rodolfo del Arenal y publicado en la Revista del Instituto de Geología de la UNAM, Vol. 6 Núm. 1, 1985***

En el estudio se distinguen seis grandes grupos de rocas: calizas de origen marino; calizas con intercalaciones de arcillas, lutitas y limolitas; conglomerados de calizas con derrames de lava y tobas; rocas volcánicas riolíticas y basálticas; material clástico con lentes de caliza lacustre y cenizas volcánicas y aluvión, lavas, cenizas volcánicas, brechas y depósitos lacustres.

El estudio marca la existencia de tres mantos acuíferos: uno somero, de tipo libre y de profundidad variable cuya recarga proviene principalmente de las infiltraciones de las aguas de lluvia y retornos de riego; otro localizado en basaltos parcialmente confinados; y uno más observado en rocas cretácicas. Menciona al sinclinorio de Chalmita donde observa que las estructuras calcáreas podrían ser favorables para la acumulación de agua subterránea.

Obtiene datos generales de hidrogeoquímica, entre ellos señala tres grupos relacionados con las familias de agua, predominando la mixta-bicarbonatada y la cálcico-bicarbonatada.

- ***Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital. Conagua, 2000.***

Corresponde a un estudio geohidrológico que arroja varias cifras y comentarios interesantes los cuales se describen a continuación: en el año de 1996 el caudal de agua que llegaba al Valle del Mezquital procedente de la Ciudad de México era de 50.7 m<sup>3</sup>/seg. Este recurso era destinado al riego, afectando la calidad de los acuíferos.



En este trabajo se censaron 130 captaciones, de las cuales se evaluó su calidad, encontrándose la presencia de coliformes fecales, nitratos, sulfatos, cloruros y dureza, en concentraciones por arriba de los límites permisibles en la Norma de Agua Potable Mexicana. El estudio indica que los coliformes fecales representan el problema principal que afecta a la salud humana. Sin embargo, pueden ser removidos fácilmente con un sistema de desinfección.

- ***Influencia del riego con aguas residuales sobre la calidad del agua subterránea del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Nota informativa elaborada por el Ing. Rubén Chávez Guillén, GAS-CNA, 1998***

Consiste en una nota informativa que resume las condiciones que entonces prevalecían en el Valle del Mezquital como consecuencia del riego con aguas residuales. Menciona que este Valle es probablemente el desarrollo de riego con agua residual más antiguo y extenso del mundo, además de que los volúmenes de agua residual utilizada están creciendo.

Indica que el subsuelo del Valle está formado por una secuencia de gravas, arenas, arcillas, depósitos lacustres, calizas lacustres y derrames lávicos, que tienen un espesor variable debido a la configuración escalonada del basamento rocoso. Los espesores de estas secuencias que descansan sobre rocas volcánicas y sedimentarias marinas pueden ser hasta de 300 m. Estas rocas alojan un sistema acuífero regional muy heterogéneo y de estructura compleja.

La componente más permeable corresponde a los derrames lávicos ocasionados por su fracturamiento, así como a los materiales aluviales gruesos. En las partes altas del Valle, el acuífero funciona como libre, mientras que hacia las partes bajas se encuentra semiconfinado por materiales menos permeables.

A principios del siglo XX el nivel estático se localizaba a profundidades del orden de los 50 m. Actualmente la profundidad es menor y en la parte norte llega a aflorar. El manantial más caudaloso (Cerro Colorado) que brotó hace cincuenta años, aproximadamente, rinde un caudal de 600 lps. En el área de San Salvador los niveles freáticos afloran, inundando los terrenos que, posteriormente, tendrán que ser drenados.

En la porción central del Valle predomina el agua con altas concentraciones de sodio, cloruros y nitratos, principalmente. Su salinidad total varía entre 700 y 2,000 ppm de sólidos totales disueltos. También se reporta que el agua almacenada en la presa Endhó se ha incrementado con el tiempo.

La nota indica que, en general, las poblaciones mayores reciben agua de pozos profundos que es desinfectada, mientras que las comunidades rurales utilizan agua captada por medio de norias sin protección sanitaria. En las partes donde el agua fluye en rocas fracturadas, estos materiales no constituyen filtros biológicos efectivos.

- **Impact of wastewater reuse of groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo state, Mexico. Informe final elaborado en 1998 por la Comisión Nacional del Agua, el British Geological Survey, el London School of Hygiene and Tropical Medicine y la University of Birmingham**

Los objetivos de este trabajo fueron determinar los efectos del reúso de las aguas residuales de la Ciudad de México sobre el agua subterránea del Valle del Mezquital bajo las típicas condiciones imperantes en una región semiárida; conocer los posibles impactos positivos, como el incremento en la recarga y, negativos, como el deterioro de la calidad del agua; determinar la influencia del riego con agua residual sobre la recarga del acuífero e identificar los controles en la calidad del agua y la efectividad de los procesos de autopurificación por el suelo.

El informe menciona que el Valle del Mezquital corresponde a la zona de riego más grande y antigua de México, donde se utilizan aguas residuales desde inicio del siglo XX. Cerca de 40 m<sup>3</sup>/s de agua residual son usados en el cultivo de 45,000 ha. Conforme se ha incrementado la importación de agua residual ha aumentado la infiltración al subsuelo a través de canales y zonas de riego, donde también se suministra agua potable para aproximadamente 500,000 personas. Datos de 1995, en 2012 las cantidades son mayores.

El riego con agua residual ha modificado la recarga del acuífero, así como su descarga. Los datos más antiguos sobre mediciones del acuífero datan de 1969. El nuevo régimen del agua subterránea ha creado manantiales, como el del Cerro Colorado, el cual emergió en el 1968 y ha fluido desde esa fecha sin interrupción.

También otros manantiales más discretos (Tezontepec, Huemac y varios más) descargan de manera difusa del subsuelo hacia el cauce del río Tula. Se estimaron las pérdidas de agua a través de canales no revestidos, las que varían de 2.1 a 4.2 Mm<sup>3</sup>/año/km con un promedio de 3.55 Mm<sup>3</sup>/año/km. El informe indica que los primeros análisis sobre la calidad del agua datan de 1962 y muestran que el recurso se encontraba contaminado por agua residual cerca de los ríos Tula y Salado.

En este trabajo de la CNA-BGS se confirmó que el agua subterránea en el centro del Valle tiene una composición semejante al agua residual proveniente de la Ciudad de México y una conductividad eléctrica entre 840 y 3,150 mmhos/cm. El agua subterránea en los flancos del Valle presenta conductividad eléctrica entre 400 y 800 mmhos/cm y, representa la calidad original del agua subterránea.

La calidad del agua también fue evaluada desde el punto de vista de la potabilidad. Las tres cuartas partes de las fuentes de agua potable en el Valle del Mezquital exceden los límites permisibles de nitratos para dicho uso. Cerca de la mitad sobrepasa el límite de alcalinidad y una tercera parte presenta exceso en cloruros.

Respecto al riesgo por contaminación microbiológica, entre un tercio y la mitad de las fuentes de agua estudiadas en este trabajo resultaron positivas en coliformes fecales.

Algunos análisis mostraron la presencia de enterovirus, hepatitis A y rotavirus. Para mejorar la calidad del agua para uso potable se recomienda que no falten los ademes sanitarios en los pozos y la perforación de pozos en zonas alejadas de los principales canales, en especial calcular para cada uno de ellos la zona de protección de contaminación directa del agua subterránea.

- ***Estudio para evaluar la factibilidad de suministrar agua potable al Valle de México a partir del acuífero del Valle del Mezquital. Informe final elaborado en el 2000 por B. Jiménez, J. Barrios, A. Chávez, J. Laugier, A. Deryta y J.L. Torres, como parte de los trabajos del Instituto de Ingeniería de la UNAM para la Conagua***

El objetivo de este trabajo fue el de determinar las condiciones y costos de inversión y operación de un sistema para abastecer de agua potable al Valle de México a partir de agua del acuífero del Valle del Mezquital. Se realizaron pruebas de tratamiento con una planta piloto móvil, usando agua del manantial Cerro Colorado y del pozo PEMEX-3.

La planta piloto incluye los módulos siguientes: alimentación de agua cruda, pretratamiento, prefiltración, unidad de membranas (nanofiltración, ósmosis inversa) y sistema de lavado de membranas. Se instaló un laboratorio móvil para realizar análisis durante la operación del tratamiento piloto, que permaneció 130 horas en el manantial Cerro Colorado y 155 horas en el pozo PEMEX-13 (agosto, 2000).

Se determina la remoción de compuestos en el agua, incluyendo algunos metales inorgánicos, SDT, coliformes y compuestos organoclorados. Se indica que el uso de carbón activado favoreció la remoción de compuestos orgánicos en el agua del manantial Cerro Colorado, pero no en el agua del pozo 13 de PEMEX. También se indica que algunos compuestos pudieron ser removidos mediante los módulos de membranas, mientras que el carbono orgánico y la dureza total provocaron su taponamiento e incrustación.

Concluyen que las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa son una opción para potabilizar las aguas del Valle del Mezquital, en especial para remover sólidos totales disueltos y compuestos orgánicos, con eficiencias mayores al 95%. Hace una evaluación del agua de rechazo y como propuesta para su disposición indica la posibilidad de verterla hacia el río Tula. Se determinan los costos de operación y la factibilidad de este proyecto para el suministro de 5 m<sup>3</sup>/s de agua al Valle de México.

- ***¿El agua del Valle del Mezquital, fuente de abastecimiento para el Valle de México? Documento elaborado por R. Pérez, R. Jiménez, B. Jiménez y A. Chávez, Instituto de Ingeniería, UNAM. 2000.***

El documento indica que uno de los principales retos que tiene la Ciudad de México es incrementar en 19 m<sup>3</sup>/s el abastecimiento de agua en los próximos 15 años. Basándose en resultados de calidad del agua y disponibilidad, una alternativa es la perforación de noventa pozos para la extracción de 6 m<sup>3</sup>/s en el Valle del Mezquital.

Se indica que este recurso ya lo consumen habitantes del Valle del Mezquital. También se menciona que, sorprendentemente, resultados preliminares indican que a pesar de que el agua de este acuífero proviene de la infiltración de agua negra sin tratamiento del Valle de México, es de calidad apropiada. Esto, aunado a su disponibilidad, permite plantear la realización de un estudio detallado para evaluar el empleo del acuífero del Valle del Mezquital como fuente de abastecimiento para la Ciudad de México.

Se seleccionaron los pozos Teocalco y Tezontepec en los cuales se realizaron un gran número de determinaciones de parámetros físicos, metales, no metales, compuestos inorgánicos, microbiológicos, orgánicos volátiles y semivolátiles, pesticidas clorados, PCBs, pesticidas fosforados, trihalometanos e hidrocarburos totales. Se encontró que el agua del pozo Teocalco excede la Norma Oficial Mexicana 127 en coliformes, nitratos, nitrógeno amoniacal, Hg, Pb, Na, SAAM y STD.

20

Se considera que esta agua es apta para consumo humano solo si se potabiliza. El pozo Tezontepec presenta deficiencia en los mismos parámetros excepto nitrógeno amoniacal y SAAM (que si los cumple) pero se encuentra deficiente en Fe y Mn. En este pozo, el agua no se considera apta para consumo y con necesidad de emplear un tratamiento terciario para su potabilización.

- ***Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo. Documento elaborado por la Comisión Nacional del Agua, 2002 y publicado en su página web.***

Incluye cifras importantes correspondientes al balance de agua subterránea en el que obtiene una recarga natural de 132.5 Mm<sup>3</sup>/año que incluye tanto a la infiltración por lluvia (67.5 Mm<sup>3</sup>/año) como a la recarga horizontal (65 Mm<sup>3</sup>/año). Por otra parte, la recarga inducida a partir de los canales de riego es de 540.2 Mm<sup>3</sup>/año.

Por lo que respecta a las descargas del sistema acuífero menciona que la principal salida corresponde al flujo base hacia el río Tula el cual alcanza 540 Mm<sup>3</sup>/año, se pierden por evapotranspiración 15 Mm<sup>3</sup>/año; se descargan a través de manantiales 31 Mm<sup>3</sup>/año; la extracción por bombeo es de 92.6 Mm<sup>3</sup>/año; las descargas por flujo subterráneo 25 Mm<sup>3</sup>/año.



El acuífero obtiene una disponibilidad media de agua subterránea de 15.315 Mm<sup>3</sup>/año, al restar la recarga total de 672.7 Mm<sup>3</sup>/año), la descarga natural comprometida (500 Mm<sup>3</sup>/año) menos el volumen concesionado (157.384 Mm<sup>3</sup>/año) Menciona que el acuífero del Valle del Mezquital se encuentra en equilibrio dinámico.

- **Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: “El Mezquital Valley” case. Artículo elaborado por Blanca E. Jiménez y A. Chávez, Instituto de Ingeniería, UNAM, Water Science and Technology, Vol. 50, 2004.**

El objetivo de este artículo fue evaluar la calidad del acuífero del Valle de Tula para analizar su posible uso como una fuente de agua potable para el Ciudad de México que ha enviado, por más de 100 años, sus aguas residuales al Valle de Tula donde se usa para regar más de 90,000 ha. El volumen actual de agua residual enviada es de aproximadamente 60m<sup>3</sup>/s. Esto ha provocado una recarga artificial en la zona de aproximadamente 25 m<sup>3</sup>/s, más de 13 veces la recarga natural. Como consecuencia de esta recarga, el nivel estático se ha elevado y varios manantiales se han formado con caudales de entre 100 y 600 lps entre ellos el de Cerro Colorado.

Se determinó la calidad y disponibilidad del agua del acuífero del Valle de Tula, así como el tratamiento natural que el agua residual recibe durante su recarga al acuífero y la posibilidad del uso de membranas para tratar el agua subterránea.

Los resultados muestran que los suelos del Valle de Tula tienen la capacidad de tratar el agua residual que reciben, produciendo una calidad de agua aceptable en el acuífero, que puede ser usada como fuente de agua potable para la Ciudad de México. Para evitar riesgos a la salud derivados de compuestos emergentes, se recomienda que el agua sea tratada con membranas antes de su distribución.

- **Estudio hidrogeológico del acuífero Valle del Mezquital, Hidalgo. Elaborado por Lesser y Asociados S.A. de C.V. para la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo. 2007.**

Se realizó un estudio geohidrológico completo del acuífero del Valle del Mezquital. Se destaca que la Ciudad de México drena sus aguas residuales hacia el Valle del Mezquital a través del Gran Canal del Desagüe, del Interceptor Poniente y del Emisor Central en un volumen aproximado de 45 m<sup>3</sup>/s. Esta agua residual no tratada se utiliza para el riego de alrededor de 45,214 ha.

Se realizó un censo de 456 aprovechamientos de agua subterránea. Se llevaron a cabo 34 pruebas de bombeo, obteniéndose que la mayor parte presenta valores de transmisividad alrededor de 0.5 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s. Los pozos aislados junto a la presa Endhó tienen transmisividades mayores de 100 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s por encontrarse en rocas basálticas.

En la configuración de la profundidad al nivel estático se encontraron curvas de diez a cuarenta metros. En la parte central del Valle del Mezquital, el nivel se ubica a menos de diez metros de profundidad entre Teocalco y Tlahuelilpan y aumenta hacia los flancos del Valle conforme la superficie del terreno se eleva.

La configuración de la elevación del nivel estático presentó curvas de 2,200 msnm al sur de Apaxco, misma que disminuían en dirección al norte hasta la curva 1,980 msnm a la altura de Santiago Acayatlán, indicando un flujo subterráneo de sur a norte.

La evolución del nivel estático trazado para el periodo 2000-2007 presenta valores que van de -2 a +2m en la parte sur del Valle del Mezquital. En el centro del Valle la evolución fue cero y en el norte existen zonas locales con +1m. Se consideró que la evolución actual del acuífero es cero.

Se elaboró un balance de agua subterránea que indica que las entradas subterráneas son de 10.6 Mm<sup>3</sup>/año, la infiltración de 165.2 Mm<sup>3</sup>/año, la extracción de 97.7 Mm<sup>3</sup>/año, las salidas subterráneas 71.7Mm<sup>3</sup>/año, el cambio de almacenamiento 0 Mm<sup>3</sup>/año y la evapotranspiración de 6.4 Mm<sup>3</sup>/año.

El agua del acuífero sale a través de manantiales que descargan al río Tula, otra parte es extraída en pozos y el resto sale hacia el norte y noreste, tanto en forma superficial como subterránea. Se determinó que la infiltración total (165.2 Mm<sup>3</sup>/año) consta de infiltración de lluvia (15.8 Mm<sup>3</sup>/año), infiltración de retornos de riego (69 Mm<sup>3</sup>/año), infiltración de canales (74 Mm<sup>3</sup>/año) y 6.4 Mm<sup>3</sup>/año de agua que se infiltran al suelo, pero posteriormente se desprenden como evapotranspiración.

Mediante la piezometría se diferenciaron dos horizontes acuíferos, uno somero (con valores de profundidad al nivel estático alrededor de diez metros) y otro profundo (nivel estático de cuarenta metros más profundo). Muchos de los pozos se localizan en ambos horizontes acuíferos y se detecta un solo nivel, mientras otras captaciones, presentan ademe liso en su parte superior, por lo que solo manifiestan el nivel del acuífero inferior. Los dos horizontes acuíferos en algunos sitios pueden estar interconectados y en otros, aislados, aunque pueden comunicarse a través de las perforaciones que atraviesan a ambos.

El aspecto más importante es que la contaminación directa por el agua de los canales afecta principalmente al acuífero superior y en menor proporción al horizonte profundo. Se realizaron análisis físico-químicos, de metales y bacteriológicos hasta en 76 pozos. Se detectó que el sodio y los sólidos totales disueltos generalmente se encuentran por arriba del límite máximo permisible para agua de uso y consumo humanos, de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 (2000). Se detectó arsénico en siete aprovechamientos localizados al sur de Tlaxcoapan.





La mitad de los sitios analizados presentan fluoruros por arriba de la Norma y plomo y fosfatos también se encuentran en concentraciones altas. De las 76 captaciones, 29 (38%), acusaron coliformes totales (en cinco pozos aun cuando recibían cloración); en varias de estas captaciones también se encontraron coliformes fecales.

Se observaron valores de conductividad eléctrica entre 1,000 y 1,800  $\mu\text{mho/cm}$ . Los sólidos totales disueltos (STD) entre 1,060 y 1,224 mg/l en el centro del Valle y solamente el pozo MZ103 presentó 4,052 mg/l.

En la parte Sur del Valle las concentraciones son de entre 2,044 y 2,812 mg/l de STD. Uno de los cationes representativos en el agua subterránea fue el sodio, que varía entre 200 y 300mg/l. Respecto a metales, se analizó el fierro y el manganeso, cuyas concentraciones son reducidas, del orden de 0.03mg/l. El arsénico se encontró en 7 de 31 análisis practicados y en concentraciones entre 0.046 y 0.416mg/l (por arriba del LMP). Los fluoruros en presentaron entre 1 y 4mg/l. Se realizaron también determinaciones de plomo, boro y fosfatos, los cuales se encontraron en concentraciones muy bajas. La presencia de coliformes totales y fecales fue un común denominador el este Valle.

La familia de agua obtenida fue sódico-bicarbonatada en los aprovechamientos al poniente de Tlahuelilpan y Teocalco. Familia mixta-sulfatada, que se presenta en varios pozos de la parte sur del Valle de Mezquital.

En este trabajo se indica que la mayor contaminación al acuífero se presenta en el horizonte superior. El horizonte acuífero profundo, también se encuentra contaminado, pero en menor proporción. Por lo anterior, una recomendación general (que ya se lleva a cabo en muchos casos) es que para evitar que en los pozos de agua potable, el agua de menor calidad de horizontes superiores contribuya al agua explotada en esos pozos se diseñan con ademe liso y cementado en su porción superior, lo que se denomina en perforación ademe sanitario, y que en esta zona debe ser de una longitud de aproximadamente 50 m. Se recomienda también ubicar los pozos de agua potable alejados de los canales que corresponden a la principal causa de contaminación en esta zona.

Debido a que la mayor contaminación por aguas residuales se genera cerca de los canales y en el horizonte acuífero somero, se recomienda que los pozos de agua potable se ubiquen alejados de los canales principales y que los pozos nuevos o reposiciones de pozos incluyan ademe sanitario de cuando menos cincuenta metros de longitud a partir de la superficie del terreno. Los pozos ubicados al sur de Tlaxcoapan presentan mala calidad por varios metales y bacterias, se recomienda cambiar la fuente de abastecimiento de agua a las poblaciones cercanas.

- **Complemento de la caracterización del agua de consumo humano en el Valle de Tula. Informe final elaborado por Blanca Jiménez, A. Chávez, R. Gibson, J.E. Becerril, C. Maya y C. Hernández, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, (Proyecto 6344 del Fideicomiso del Valle de México) 2008.**

El objetivo de este trabajo fue verificar y complementar la caracterización del agua de suministro al Valle de Tula que posteriormente se recarga al acuífero. La caracterización se enfoca, en especial, al contenido de contaminantes emergentes con la intención de proporcionar datos para la realización de estudios sobre los posibles efectos a la salud humana.

En especial se determinó la presencia de compuestos organoclorados después de los sistemas de cloración, así como la identificación de parámetros que no cumplen con los criterios y normas de agua para consumo humano de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana. También se utilizaron los criterios internacionales de calidad de agua potable y reúso.

Se indica que el Valle de Tula ha venido recibiendo agua residual del drenaje de la Ciudad de México desde hace más de un siglo. Se estima que en la actualidad se reciben 53m<sup>3</sup>/s de aguas residuales que se utilizan para riego, de las cuales una parte se infiltra al subsuelo.

Estudios previos reportan problemas de calidad del agua que pueden ser controlados mediante procesos convencionales de remoción de contaminantes, pero también se ha reportado la presencia de contaminantes orgánicos. Dentro de los contaminantes detectados, motivo de este estudio, preocupan los conocidos como emergentes.

En el informe final se revisaron los datos existentes y disponibles, e indicó que la mayoría de los estudios previos se orientaron a determinar parámetros microbiológicos básicos, como coliformes fecales y totales. Se encontró información de 38 pozos, de los cuales 31 contienen coliformes totales y por lo tanto están por encima de la norma establecida. En el 45% de los pozos, se detectaron coliformes fecales.

En pocos de los estudios consultados, se proporcionan valores de microorganismos tales como Salmonella. Los parámetros físico-químicos, SDT, nitratos, Al, Cd, Pb y Cr, por lo general exceden los valores de la norma. Los parámetros de mayor preocupación fueron el hexaclorobenceno en algunos pozos y los PCB en algunos manantiales. Destacan los manantiales de Tlacotalpilco y Chilcuautla, que presentan severos problemas de contaminación. Por lo que respecta a los contaminantes emergentes, en la recopilación de información se identificaron solo trazas en algunos manantiales.

Los contaminantes emergentes provienen de pesticidas, productos químicos industriales, productos farmacéuticos y fotoquímicos, que son compuestos desechados continuamente al medio ambiente.

Entre los compuestos emergentes recientemente catalogados, se encuentran los surfactantes, los productos farmacéuticos, los productos de aseo, cuidado personal y los aditivos de la gasolina.

Se seleccionaron tres diferentes regiones en el Valle de Tula. En la primera, ubicada al Sur, se utiliza agua básicamente residual; la segunda en la parte media del Valle se emplea una mezcla de agua residual y retornos de riego y, en la tercera zona hacia Actopan, se ocupa agua de retornos de riego mezclada con agua de manantiales.

La evaluación de la calidad incluyó la determinación de contaminantes emergentes, microorganismos, análisis básicos, parámetros relacionados a la salinidad, elementos trazas y algunos subproductos de la desinfección. Se encontró que la zona 3 es la más contaminada, seguida de la zona 1 y después la zona 2.

Se concluye que existe una alta concentración de contaminantes emergentes y microbiológicos en el agua (cruda) residual que se utiliza para riego en el Valle de Tula. Sin embargo, el proceso de tratamiento natural que recibe el agua al transitar por el suelo reduce estos contaminantes, con excepción de metales, los que se acumulan en los suelos y los compuestos nitrogenados, que se acumulan en el agua.

Las dos principales recomendaciones son: contar con un proceso de potabilización del agua a base de membranas y actualizar los estudios geohidrológicos para tener un mayor conocimiento del flujo subterráneo de los acuíferos.

- **Actualización del estudio geohidrológico en el acuífero de Actopan, integración geohidrológica de la cuenca del Valle de México correspondiente al Estado de Hidalgo. Documento elaborado en 2008 por Lesser y Asociados S.A. de C.V. para la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo.**

Se levantó un censo en 203 aprovechamientos y la nivelación diferencial de los brocales en pozos seleccionados. Se realizaron diez pruebas de bombeo de donde se obtuvieron valores entre  $0.11$  y  $2.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (que corresponden a valores medios) con excepción de dos pruebas que dieron valores extremos de  $0.05$  y  $46.91 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Se recopilaron datos piezométricos, pruebas de bombeo y análisis químicos del agua, que fueron complementados con mediciones y análisis del año 2008.

Se destaca que el acuífero Actopan-Santiago de Anaya representa una recuperación de los niveles piezométricos (casi veinte metros) desde hace varias décadas, más notablemente a partir del uso intensivo de aguas residuales provenientes del Valle de México.

El excesivo riego ha ido almacenando grandes volúmenes de agua en el subsuelo hasta saturar su capacidad de almacenamiento, forzando la salida del agua a través de manantiales locales, pozos artesianos y drenes, logrando así un equilibrio piezométrico del sistema acuífero actual. Se indica que en 1992 la Conagua aforó casi  $5\text{m}^3/\text{s}$  de agua drenada a través del canal Xotho.

Se determinó que al poniente de Actopan en la zona de San Salvador el agua subterránea aflora. El nivel del agua se profundiza entre sesenta y ochenta metros en el sur y el norte de Actopan. Al poniente del Valle, al pie de la sierra, encontraron profundidades al nivel estático de más de cien metros.

La dirección de circulación del agua subterránea va de las elevaciones topográficas hacia el centro del Valle y posteriormente hacia el norte. Se determinó la existencia de un parteaguas hidrodinámico a la altura de Mixquiahuala que separa al acuífero de Actopan-Santiago de Anaya del acuífero del Valle del Mezquital.

Se identificaron dos zonas con calidades distintas de agua subterránea: una franja localizada al pie y a lo largo de la serranía de Actopan, al oriente del Valle, donde la lluvia infiltrada recarga a los acuíferos de la planicie y presenta una salinidad que cumple con las normas de calidad para uso público urbano y el centro del Valle donde la mayor parte de los sitios muestreados y analizados presentan agua con alto contenido de sales y reflejan la influencia de la infiltración de agua residual.

26

Se presenta un balance de agua subterránea con los siguientes datos: entradas subterráneas  $31.4\text{ Mm}^3/\text{año}$ , infiltración por lluvia  $11.7\text{ Mm}^3/\text{año}$ , recarga inducida  $77.1\text{ Mm}^3/\text{año}$ , extracción  $47.3\text{ Mm}^3/\text{año}$ , salidas subterráneas  $7.0\text{ Mm}^3/\text{año}$ , cambio de almacenamiento  $0\text{ Mm}^3/\text{año}$  y evapotranspiración  $6.4\text{ Mm}^3/\text{año}$ . También se determinó una disponibilidad de  $21.6\text{ Mm}^3/\text{año}$ .

- **Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea en el acuífero (1310) Valle del Mezquital, Hidalgo. Texto publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 2009. Documento elaborado por Conagua, 2009.**

Se actualiza y publica la disponibilidad de agua subterránea del acuífero del Mezquital, Hidalgo, utilizando los datos disponibles a la fecha de elaboración del trabajo, con el objeto de dar cumplimiento al programa hídrico sexenal en lo que compete a la actualización de la disponibilidad de los acuíferos mexicanos. Se manifiesta una recarga de  $664.6\text{ Mm}^3/\text{año}$ , una descarga natural comprometida de  $293.3\text{ Mm}^3/\text{año}$ , un volumen concesionado de  $162.6\text{ Mm}^3/\text{año}$ , una extracción de agua subterránea consignada en estudios técnicos de  $92.6\text{ Mm}^3/\text{año}$  y una disponibilidad de agua subterránea de  $208.6\text{ Mm}^3/\text{año}$ .



- **Análisis técnico y pruebas de potabilización del agua del acuífero del Valle del Mezquital en diversos municipios de Hidalgo. Documento elaborado por Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2010.**

Los objetivos de este trabajo fueron estimar la exposición a contaminantes emergentes por uso y consumo de agua ante diferentes escenarios de tratamiento; establecer la distribución más probable de dichos contaminantes en el medio ambiente; determinar a escala piloto la eficiencia y costo del uso de membranas para la eliminación de contaminantes y proponer el diseño funcional más adecuado para el tratamiento del agua del acuífero con fines de uso y consumo humanos.

El estudio indica que una amplia gama de microorganismos y contaminantes químicos pueden estar presentes en aguas residuales. Mediante su infiltración en terrenos agrícolas, estas aguas se emplean como recarga para el acuífero con fines de potabilización.

Es recomendable establecer un sistema de tratamiento de agua previo al consumo humano. Como en este caso que se riega con aguas residuales, propiciando una recarga al acuífero, es necesario proteger la salud pública y, por lo tanto, identificar y cuantificar compuestos orgánicos, principalmente los no regulados, los emergentes y los microorganismos patógenos, así como evaluar los riesgos potenciales a la salud.

En este trabajo se llevó a cabo un monitoreo en 27 aprovechamientos de agua subterránea y en 11 estaciones de aguas residuales. Las determinaciones que se acordaron incluyen parámetros biológicos, físicos y organolépticos, minerales metálicos, no metálicos y metaloides, subproductos de desinfección, hidrocarburos aromáticos y poliaromáticos, plaguicidas, fenoles etoxilados, parámetros extractables ácidos y básicos, fármacos, productos para el cuidado personal y hormonas.

En la mayoría de los aprovechamientos analizados se excedió el límite máximo permisible para coliformes totales y coliformes fecales, promediando 3.7 y 3.0 UFC/100ml, respectivamente. En ninguno de los aprovechamientos se identificaron cepas de bacterias enteropatógenas, quistes de protozoarios o huevos de helmintos patógenos, ni ooquistes de *Cryptosporidium*.

Se indica que, si bien los patógenos no fueron identificados en las fuentes de abastecimiento, algunos se percibieron en las muestras de aguas residuales, ante el riesgo potencial de los muestreadores expuestos a estos patógenos.

En las fuentes de abastecimiento se detectó la presencia de arsénico, fluoruros, mercurio, plomo y bario, por encima de la norma, principalmente en aprovechamientos localizados al Sur del Valle del Mezquital.

Se detectaron en algunos aprovechamientos concentraciones ultra-traza (demasiado bajas) de hormonas estrogénicas (principalmente estradiol y  $\beta$ -etinilestradiol), de los reguladores lipídicos gemfibrozil y ácido clofíbrico, antibióticos (eritromicina y sulfametoxazol), carbamazepina (antiepiléptico), metilprednisolona (antiinflamatorio), DEET (producto para cuidado personal), cafeína y benzoilecgonina. Se identificaron ochenta compuestos volátiles y semivolátiles, encontrándose que el mayor problema se presenta al Sur y al Norte del Valle del Mezquital.

En la interpretación hidrogeoquímica se comparan los resultados de este trabajo con los obtenidos en el 2012. En ninguna de las muestras se identificaron bifenilos policlorados (PCB). Los hidrocarburos aromáticos (PAH) estuvieron presentes solo en las aguas residuales.

Se menciona que el índice de amebiasis intestinal (una enfermedad gastrointestinal) en los Valles de Tula y Actopan se encuentra por arriba de la media nacional de 548 casos por cada 100,000 habitantes (en el Valle del Mezquital es de 961 y 1,074 casos para los Valles de Tula y Actopan, respectivamente) no así para el Valle de Ixmiquilpan que presenta 420 casos por cada 100,000 habitantes, debido a que el agua muestra menor grado de contaminación.

En relación a la evaluación de riesgos, concluye que no es posible asociarlos a la salud con la ingestión crónica de fármacos u otros contaminantes emergentes que se encuentran en concentraciones traza y ultra-traza.

28

El estudio realiza una amplia investigación sobre la normatividad, valores guía y regulaciones de agua de consumo humano y de reúso con fines potables, incluyendo la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humanos), así como los valores guía propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Unión Europea y los estándares de calidad de agua potable en Inglaterra, Estados Unidos (USEPA), Canadá y Australia. También trata la regulación del agua reciclada para consumo humano vía recarga de acuíferos.

Los alcances del proyecto también incluyeron determinar la efectividad de procesos de membrana en la remoción de contaminantes químicos y patógenos emergentes mediante pruebas piloto (1 lps) y realizar el diseño de una planta a escala real.

Se concluye que el agua en el Valle del Mezquital en general no satisface los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 por la alta concentración de varios parámetros, entre ellos STD, sodio, arsénico y coliformes, entre otros.

Aun cuando la concentración de contaminantes emergentes y no regulados se puede considerar ultra-traza y no representan un riesgo, indican que a mediano y largo plazos podrían afectar la salud humana. Menciona también que, desde el punto de vista microbiológico, una

desinfección bien aplicada es suficiente para asegurar la calidad del agua. Concluye también que la nanofiltración es un método confiable para el control de contaminantes emergentes.

- ***Balance y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. Artículo elaborado por Luis E. Lesser Carrillo, Juan M. Lesser Illades, Santiago Arellano Islas y David González Posadas. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 28, No. 3: 323-336, 2011.***

Se realizó un estudio geohidrológico de actualización en el acuífero del Valle del Mezquital, mediante el cual se diferenciaron dos horizontes acuíferos: uno superficial y otro profundo interconectados en algunos sitios y en otros aislados. Se detectó que un aspecto importante es que la contaminación directa por el agua de los canales afecta principalmente al acuífero superior y en menor proporción al acuífero profundo.

Se resalta que un aspecto relevante en el Valle del Mezquital es que recibe 45 m<sup>3</sup>/s de agua residual no tratada proveniente de la Ciudad de México a través del Gran Canal del Desagüe, el Interceptor Poniente y el Emisor Central. Esta agua se utiliza para el riego y parte se infiltra al acuífero. El 81% de los canales principales y el 52% de los canales laterales no se encuentran revestidos, permitiendo la infiltración y recarga del agua residual directamente al acuífero.

En este estudio, se determinó que la principal entrada de agua al acuífero del Valle del Mezquital corresponde a la infiltración de las aguas residuales sin tratar provenientes de la Ciudad de México a través de canales y retornos de riego.

Las salidas de agua del acuífero se llevan a cabo a través de manantiales que descargan al río Tula. Otra parte se extrae de pozos y el resto descarga hacia el Norte y Noreste, tanto en forma superficial (drenado por el río Salado) como subterránea.

Para el año 2007 se observaron profundidades entre diez y cuarenta metros al nivel estático. Se determinó que el flujo de agua subterránea circulaba de Sur a Norte. Se realizó un balance del agua subterránea obteniéndose que las entradas subterráneas son de 10.6 Mm<sup>3</sup>/año, la infiltración de 165.2 Mm<sup>3</sup>/año, la extracción de 97.7 Mm<sup>3</sup>/año, las salidas subterráneas 71.7 Mm<sup>3</sup>/año, el cambio de almacenamiento de cero y la evapotranspiración de 6.4 Mm<sup>3</sup>/año.

En cuanto a la calidad del agua se determinó que, de los 65 pozos con análisis químico, el sodio y los sólidos totales disueltos generalmente se encuentran por arriba del límite máximo permisible para agua de uso y consumo humanos. También en varios pozos se detectaron arsénico, fluoruros, plomo, fosfatos y boro en concentraciones que superan el límite máximo permisible.

En 29 de 76 pozos de agua potable analizados bacteriológicamente se detectaron coliformes totales y en varios de ellos coliformes fecales. Aún y cuando el agua subterránea presenta índices de contaminación. Se concluyó que es notable el alto grado de depuración que el subsuelo lleva a cabo sobre el agua residual que recarga al acuífero.

- ***Sistema Mezquital para el abastecimiento de agua en bloque al Valle de México e Hidalgo. Documento elaborado por Lesser y Asociados, 2012-2013.***

Lesser y Asociados realizó los estudios geohidrológicos de calidad del agua y de tenencia de la tierra del sistema Mezquital, el cual incluyó los acuíferos de Actopan, Ixmiquilpan, Tepeji del Río, Mezquital y Chapantongo a fin de evaluar su disponibilidad de agua (cantidad y calidad) para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México como nueva fuente abastecimiento. Con el objetivo dar cumplimiento al compromiso de la Federación, a través de la Conagua en materia de abastecimiento de agua potable y dentro del marco del Programa de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México. En el estudio se determinó lo siguiente:

En la zona de los pozos en los acuíferos Valle del Mezquital y Actopan Santiago de Anaya, se midieron los niveles de agua subterránea identificándose diferentes profundidades (nivel piezométrico cercano a la superficie del terreno del orden de los 10m y hasta 100m de profundidad). Se detectaron dos niveles piezométricos que corresponden a dos horizontes acuíferos, uno denominado acuífero superficial y otro acuífero profundo.

30 Gran parte de los pozos en la zona que se utilizan para abastecimiento de agua potable, presentan un ademe liso y cementado en los cincuenta metros superficiales, con el fin de aislarlo del agua del acuífero superficial, el cual es más común que presente agua de mala calidad debida a la influencia de los retornos del agua residual utilizada en riego.

Con lo que respecta a la calidad del agua, se detectó la presencia de estreptococo, coliformes fecales y totales predominantemente en el acuífero somero, sin embargo, los estreptococos se detectaron en también en algunos sitios del acuífero profundo, así como en manantiales y canales. La conductividad eléctrica varió en valores de 940 a 2,820  $\mu\text{mhos/cm}$  con un promedio aritmético de 1,757  $\mu\text{mhos/cm}$  en el agua subterránea; mientras que los sólidos disueltos totales se encontraron en valores mínimos de 206, máximos de 2,830 mg/l. En el Valle del Mezquital la mayor parte de los aprovechamientos del acuífero somero, manantiales y canales, presentan entre 1000 y 1500 mg/l.

El acuífero profundo presenta agua con diferentes concentraciones, pero predominan las menores a 1000 mg/l. Se detectó la presencia de nitratos tanto en el acuífero somero como en el profundo donde se determinaron valores mínimos de 0.89 mg/L, máximos de 30 mg/l. Se detectó la presencia de arsénico, así como de compuestos aromáticos y orgánicos en su mayoría ausentes o en concentraciones muy reducidas.





Del total de los 224 compuestos emergentes analizados (fenoles etoxilados, compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles, compuestos originados por fármacos y, productos para el cuidado personal y hormonas) tan solo 25 fueron detectados en los pozos y/o manantiales. De éstos, nueve fueron detectados en tres o más pozos. Los compuestos que en más ocasiones fueron detectados son la carbamazepina (10 detecciones), el sulfametoxasol (18 detecciones), el DEET (20 detecciones), el bis-2-(etilhexil) ftalato (21 detecciones) y el dibutilftalato (21 detecciones) del total de 21 análisis de agua subterránea.

Dentro del censo se visitaron y obtuvieron datos de los 210 aprovechamientos más importantes. Se determinó que hacia el sur del Valle del Mezquital y al oriente del Valle de Actopan existen actualmente un gran número de aprovechamientos. En contraste, en la parte norte del Mezquital y poniente de Actopan, prácticamente no existen pozos. En esta zona se proyectaron 143 pozos repartidos en 12 baterías donde se podría aprovechar una disponibilidad administrativa de agua subterránea de 4.8 m<sup>3</sup>/s.

- **2) Sistema Mezquital para el abastecimiento de agua en bloque al Valle de México e Hidalgo. Etapa II-Planta potabilizadora. Documento elaborado por IPESA en los años 2014-2015.**

La empresa IPESA realizó un anteproyecto de una planta potabilizadora a base de membranas de ósmosis inversa con capacidad para producir 4,800 l/s de agua potable a partir del agua subterránea del Valle del Mezquital. Para ello señaló información técnica procedente de diversas empresas e instituciones que han participado en estudios relacionados con el Sistema Mezquital.

IPESA subcontrató al área de calidad del agua del IMTA para la realización del muestreo, cuyos resultados de calidad del agua presentaron que la mayoría de los pozos que fueron muestreados incumplieron con la NOM-127-SSA1-1994 (modificación del año 2000) en cuanto al límite máximo permisible de sólidos disueltos totales, y nitratos, mientras que algunos pozos incumplieron con el límite máximo de sodio, dureza total, arsénico, manganeso y fluoruros.

Asimismo, el IMTA realizó un muestreo (marzo de 2016) a siete de los 15 pozos profundos que muestreó IPESA en 2014 y que extraen agua del acuífero profundo (IPESA, 2015). Los análisis de turbiedad, sílice, dureza total, sólidos disueltos totales (SDT) y alcalinidad se realizaron utilizando métodos de campo con estándares certificados, mientras que los análisis de arsénico, aluminio, estroncio, sodio, sulfatos, nitratos y fluoruros se realizaron en un laboratorio acreditado ante la EMA; algunos pozos no cumplen los límites máximos permisibles de sodio, dureza total y nitratos.

## 2.5. Localización de la zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el estado de Hidalgo, al centro de la República, a ochenta kilómetros al Norte de la Ciudad de México. Se ubica entre los paralelos 19° 34' y 20° 41.5' de latitud norte y los meridianos 98° 44' y 99° 38' de longitud oeste y limitada al Norte por el Valle de Ixmiquilpan y el poblado del mismo nombre, los cerros Huandri, El Ventorrillo, Pozuelos, Gaxidho, El Águila y Monte Noble, al Este por el Valle y la Sierra de Actopan, al Sur por los cerros Xicuco y El Gorrión y por los poblados Tlaxcoapan, Tetepango y Ajacuba y al Oeste por la sierra de Xinthé (Lesser-Carrillo *et al.*, 2011).

El acuífero del Valle del Mezquital queda delimitado al Norte por los acuíferos de Ixmiquilpan, Chapantongo-Alfayuca, Huichapan-Tecoautla (Figura 2.1). Al Este se localizan los acuíferos de Actopan-Santiago de Anaya y de Ajacuba. La frontera Sur se encuentra compuesta por los acuíferos de Cuautitlán-Pachuca, Tepeji del Río e Ixtlahuaca- Atlacomulco. Al Este se encuentra el acuífero de Polotitlán (CNA 2013).

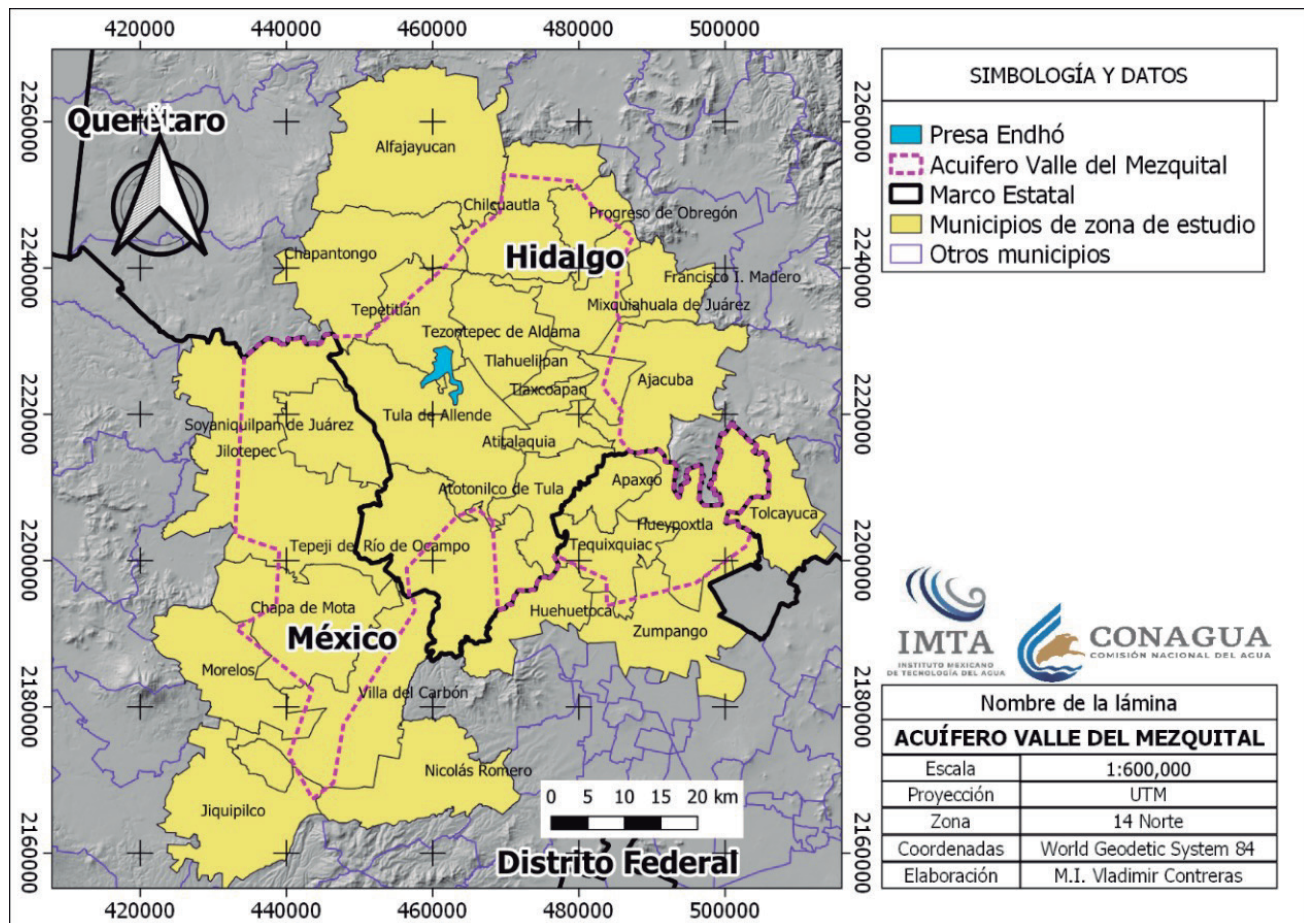
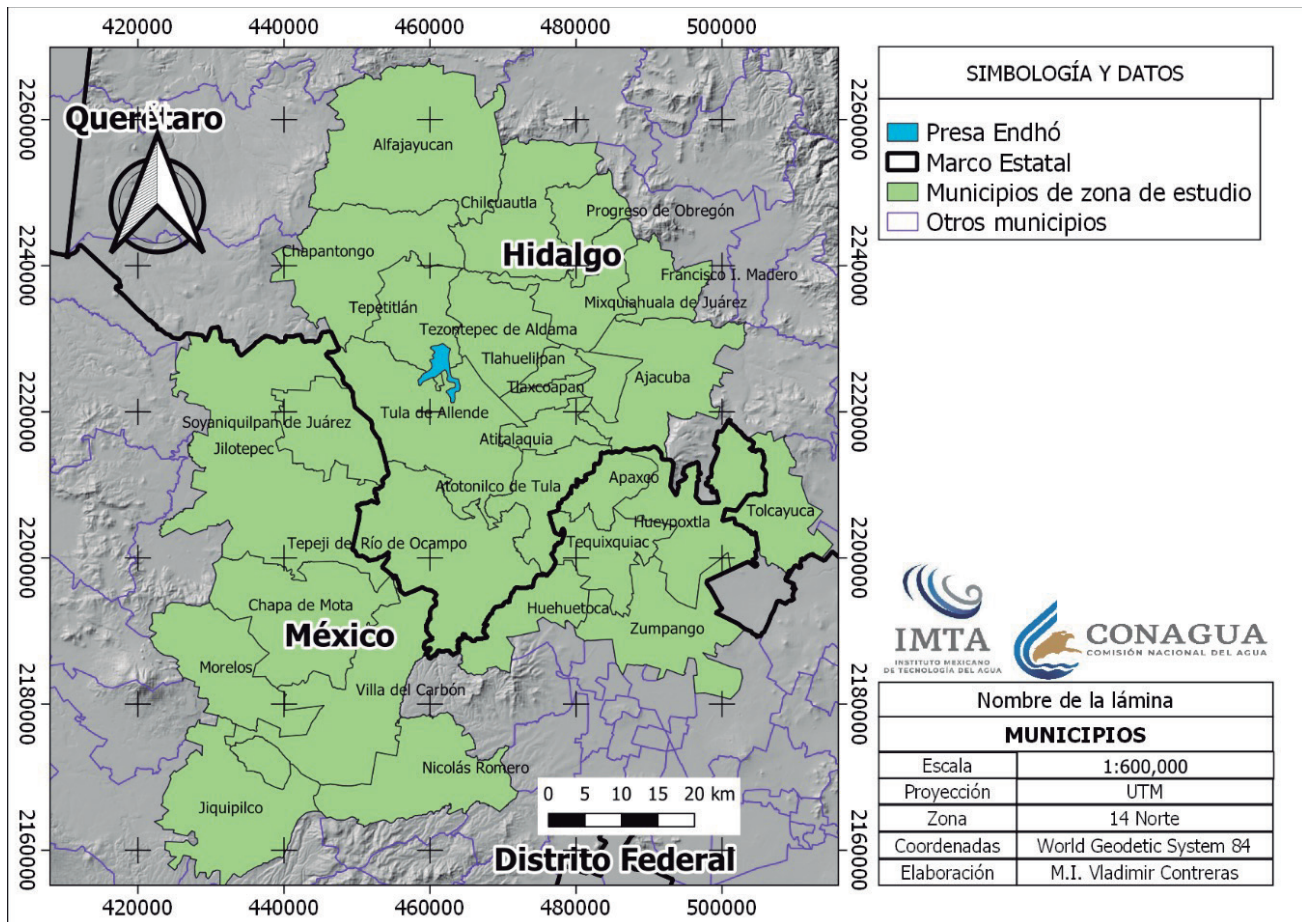


Figura 2.1. Localización del acuífero del Valle del Mezquital

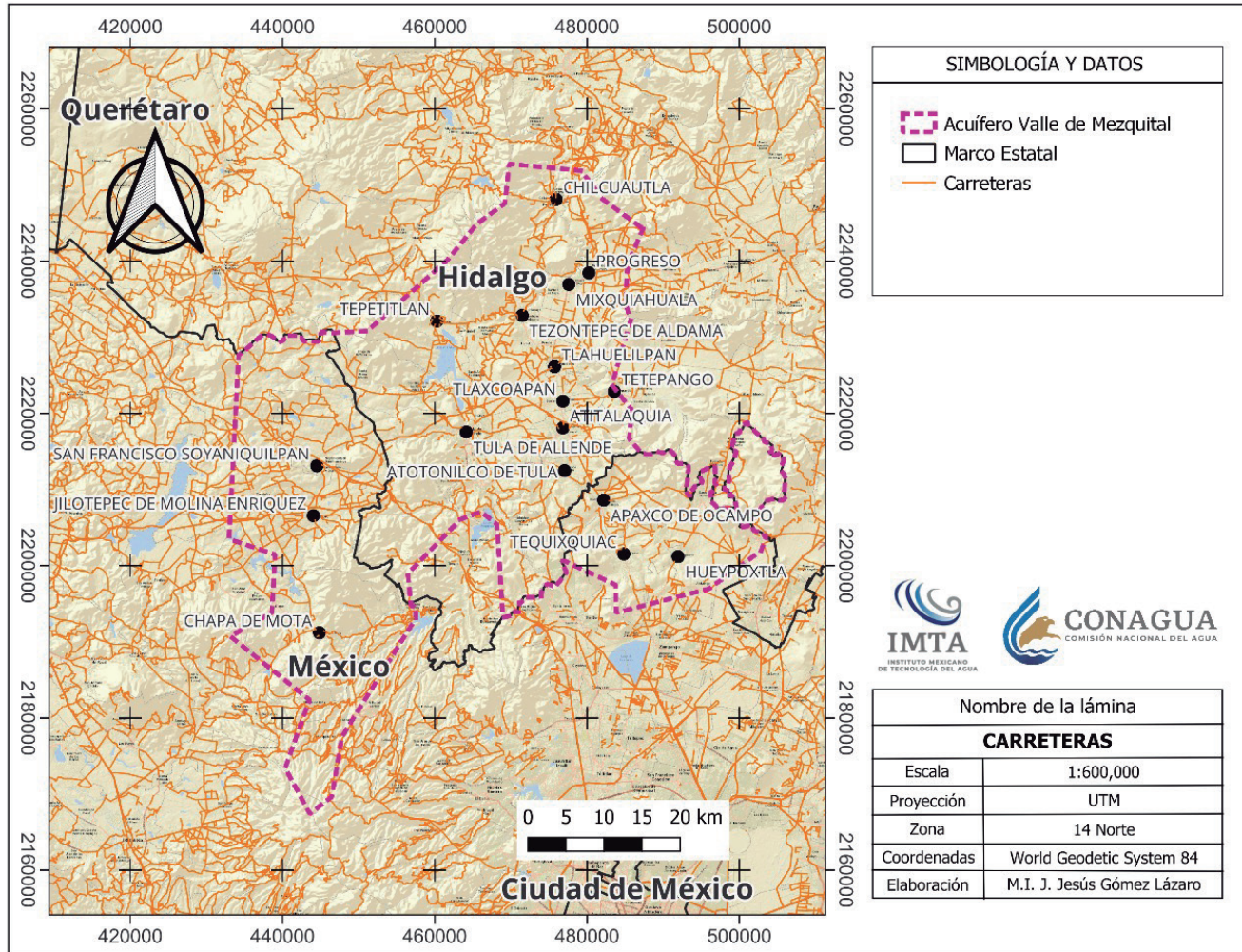
Geopolíticamente abarca municipios de Hidalgo y del Estado de México. El primero comprende, en toda su extensión, a los municipios de Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende; parcialmente los municipios Chilcuahtla, Mixquiahuala de Juárez, Progreso de Obregón, Tepeji del Río de Ocampo, Tepetitlán y Tetepango; así como pequeñas porciones de los municipios Ajacuba y Chapantongo (Figura 2.2). En el Estado de México abarca por completo a los municipios de Apaxco y Soyaniquilpan de Juárez; parcialmente los municipios Chapa de Mota, Hueycoxtila, Jilotepec, Tequixquiac y Villa del Carbón; así como pequeñas porciones de Jiquipilco, Morelos y Zumpango



**Figura 2.2.** Municipios que extraen agua del acuífero de Valle del Mezquital

## 2.6. Vías de comunicación

Las carreteras de mayor importancia en la zona son: la carretera federal No. 85 (México-Laredo), la estatal No. 45 y la estatal No. 19 (México-Querétaro); están además caminos pavimentados, de terracería y brechas que unen localmente a los poblados de la zona (Figura 2.3). Existen dos líneas de ferrocarril: la México-Nuevo Laredo y la línea México-Guadalajara (Conagua, 2002).



34 **Figura 2.3.** Mapa de carreteras en la zona de estudio

## 2.7. Actividades económicas

Las principales actividades de la población económicamente activa son la industria y la agricultura. La primera se desarrolla principalmente en Tula, donde se ubican industrias de transformación, extractivas, de construcción y maquiladoras: las más importantes son la Termoeléctrica, la Refinería de Tula, las cementeras Cruz Azul y Tolteca, y la petroquímica (Romero, 1997).

En cuanto a la agricultura dentro del Valle del Mezquital se encuentran los distritos de riego 03-Tula, 100-Alfajayucan y 112-La Concepción; el DR03 por su extensión superficial regable y antigüedad, constituye el esquema de riego más grande del país. Los principales cultivos son maíz, alfalfa, cebada, frijol, chile, calabaza y avena; mientras que los cultivos secundarios son el tomate de cáscara, trigo, jitomate y avena (Semarnat, 1996).

## 2.8. Fisiografía

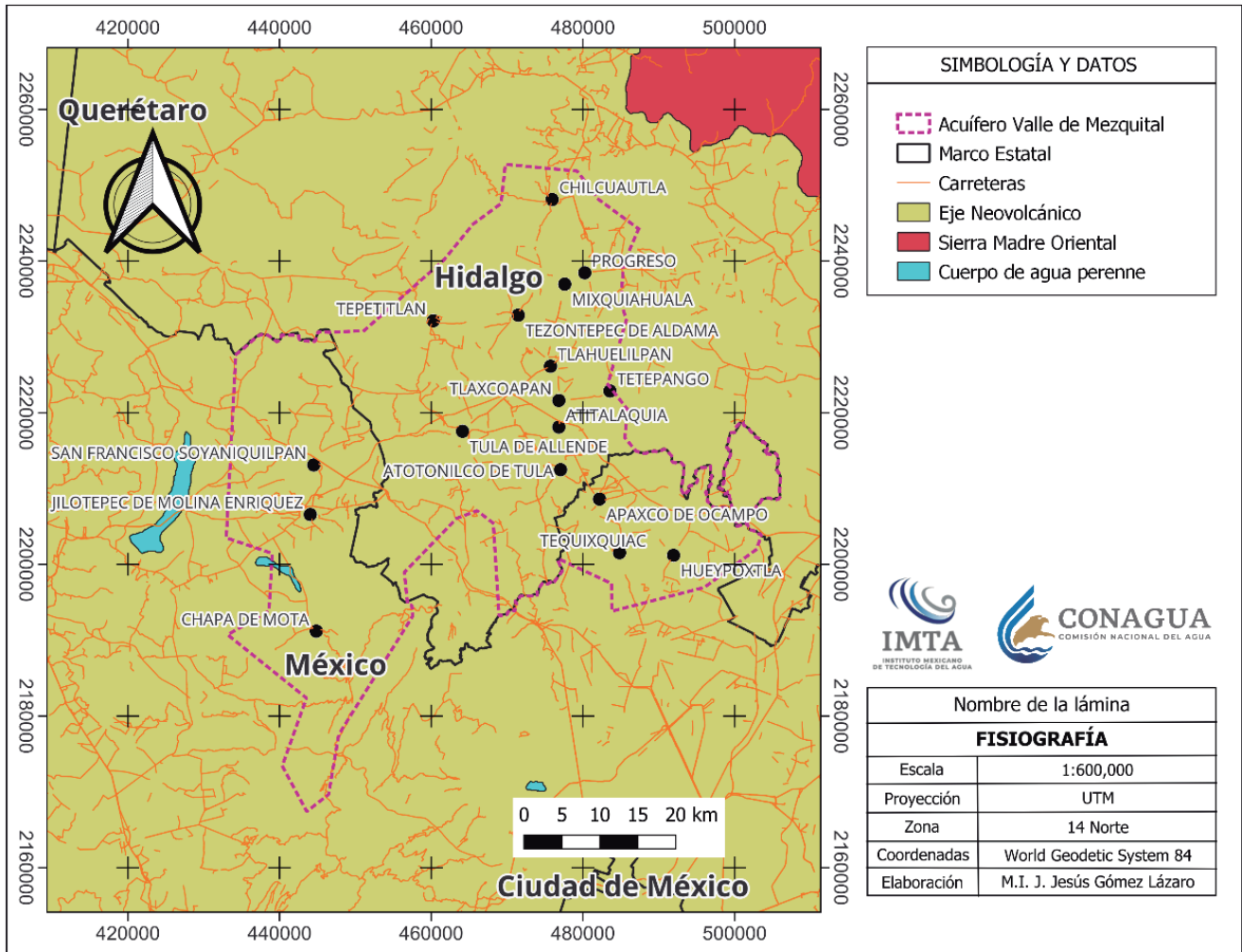
El Valle del Mezquital se ubica en el altiplano mexicano, dentro de la zona fisiográfica denominada Eje Neovolcánico (ENV) que forma un amplio Valle dividido por serranías y cerros separados.

El ENV está caracterizado por planicies construccionales escalonadas o Valles fluviales, aluviales y lacustres, poco disectados. Los Valles de la región son el del Mezquital, Actopan, Ixmiquilpan, Alfajayucan –Chapantongo, Ajacuba y Tepeji del Río. Por su importancia, destaca el Valle del Mezquital, el cual tiene una ligera pendiente hacia el norte y una elevación de aproximadamente 1,840 msnm. Se extiende por una superficie de alrededor de 2,000 km<sup>2</sup>, sobre la cual se ha desarrollado un gran distrito de riego que se utiliza las aguas residuales procedentes de la Ciudad de México. En la Figura 2.4, se muestran las provincias fisiográficas de Hidalgo, de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano, SGM, donde se detalla el trazo del límite entre el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental.

Los Valles de la región están rodeados por mesetas, cerros y sierras de varios cientos de metros de altura. La mayoría de estas elevaciones topográficas corresponden a diferentes aparatos volcánicos de composición variable, edad Cenozoico y con diferente grado de destrucción y erosión. Las elevaciones volcánicas que rodean al Valle del Mezquital son: al Poniente un conjunto de sierras (Las Canoas, El Templo, La Bruja y La Joya) que alcanzan elevaciones de hasta 3,000 msnm y lo separan del Valle de Alfajayucan –Chapatongo; al Sur los lomeríos piroclásticos de la zona de Apaxco y los cerros Zincoque y Jalpan y; al Norte la sierra de Xinthé que lo separa del Valle de Ixmiquilpan. El Valle de Ajacuba está rodeado por mesetas lávicas de los cerros Los Pechitos, El Gorrión, Mexe y Chinfi. El Valle de Actopan está limitado al Poniente por la sierra de Actopan y la sierra de Pachuca y, al Sur por los cerros Chinfi y la Cantera.

Algunas otras elevaciones topográficas las forman rocas sedimentarias marinas mesozoicas, que no fueron sepultadas por las rocas volcánicas más recientes y exhumadas por la erosión posterior.

La topografía en el ángulo Noreste del área (al norte de las sierras volcánicas de Pachuca y Actopan), está caracterizada por una serie de sierras y Valles paralelos alargados con una disección profunda en fase de madurez del ciclo geomorfológico. En esta parte, se presentan rasgos cársticos bien desarrollados en el terreno calizo, tal como dolinas, grandes ríos subterráneos y flancos caídos, todos debido a la disolución de las rocas calizas. Los cerros con más elevación se levantan hasta casi 3,000 m de altura. El Valle de Actopan está limitado por otras elevaciones topográficas de calizas, al Poniente por el cerro de San Miguel de la Cal de elevación aproximada a los 2,400 msnm y 200 m de altura por sobre el Valle y al Noroeste por del cerro Pozuelos que lo separa del Valle de Ixmiquilpan al norte. En la zona de Apaxco, ubicada al sur del Valle del Mezquital, también existen cerros de calizas en forma redondeada y dispersos en forma aislada.



36 **Figura 2.4.** Mapa fisiográfico

## 2.9. Hidrología

El Valle del Mezquital pertenece parcialmente a la Región Hidrológica No. 26, Alto Pánuco, Cuenca del río Tula. El acuífero se encuentra ubicado en la Región Hidrológica (RH) 26 Pánuco, Subregión Hidrológica Río Tula, en la cuenca del río Moctezuma. La mayor parte del flujo hidrográfico drena desde la porción suroeste, la corriente principal es el río Tula; otros ríos importantes son Salado, El Salto, Rosas, San Jerónimo, así como numerosos arroyos que forman parte de la red hidrográfica (Figura 2.5 y Figura 2.6).

El área de estudio se encuentra dentro del Distrito de Riego 03, siendo la corriente principal el río El Salto, afluente del Tula; donde se interconectan los afluentes que se utilizan para dar salida a las aguas negras provenientes del sector poniente de la Ciudad de México a través del tajo de Nochixtongo. Las aguas de los ríos Hondo y Cuautitlán afectan considerablemente su calidad del agua (Cruickshank *et al.*, 2000).

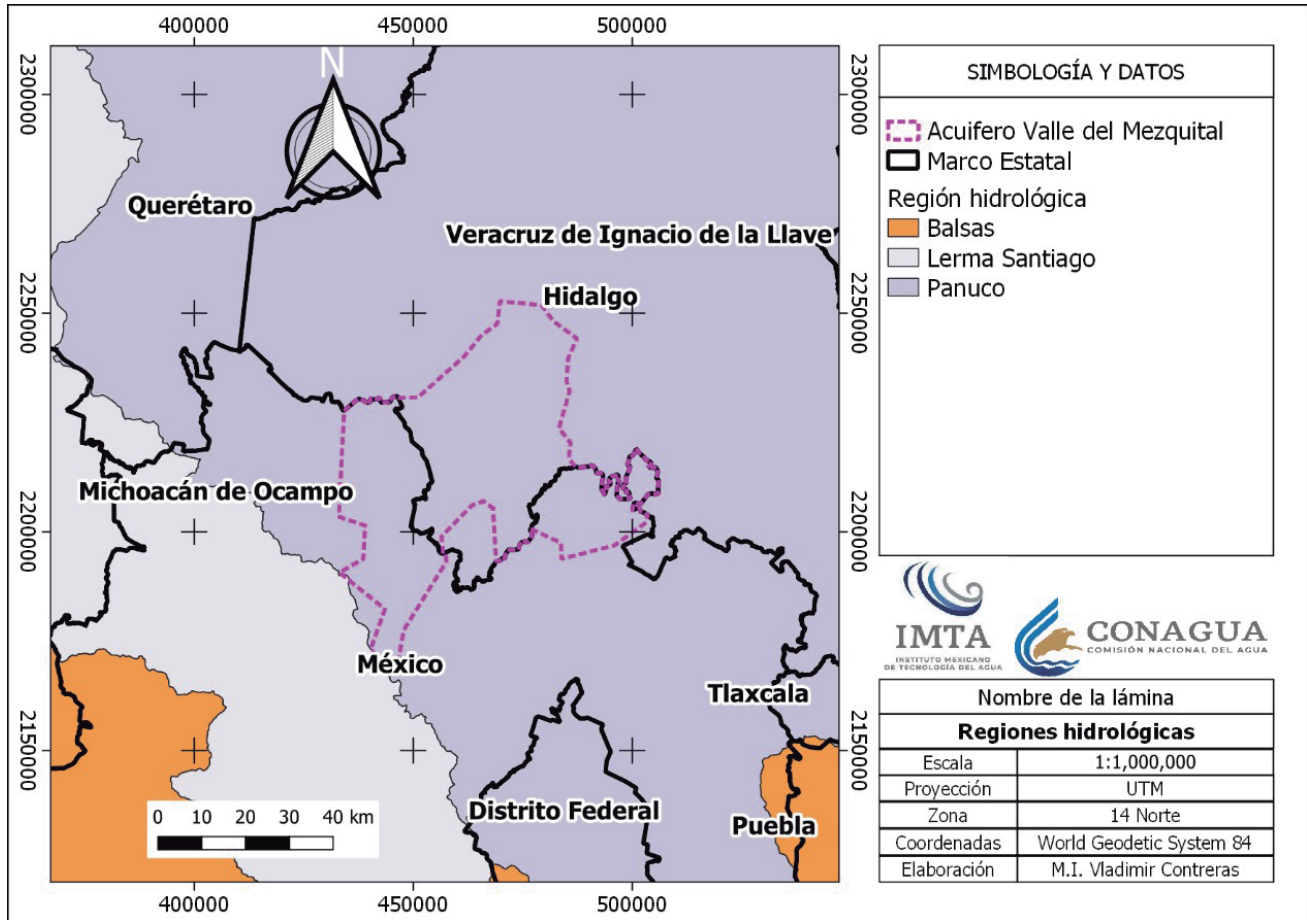


Figura 2.5. Región hidrológica y cuencas que comprende

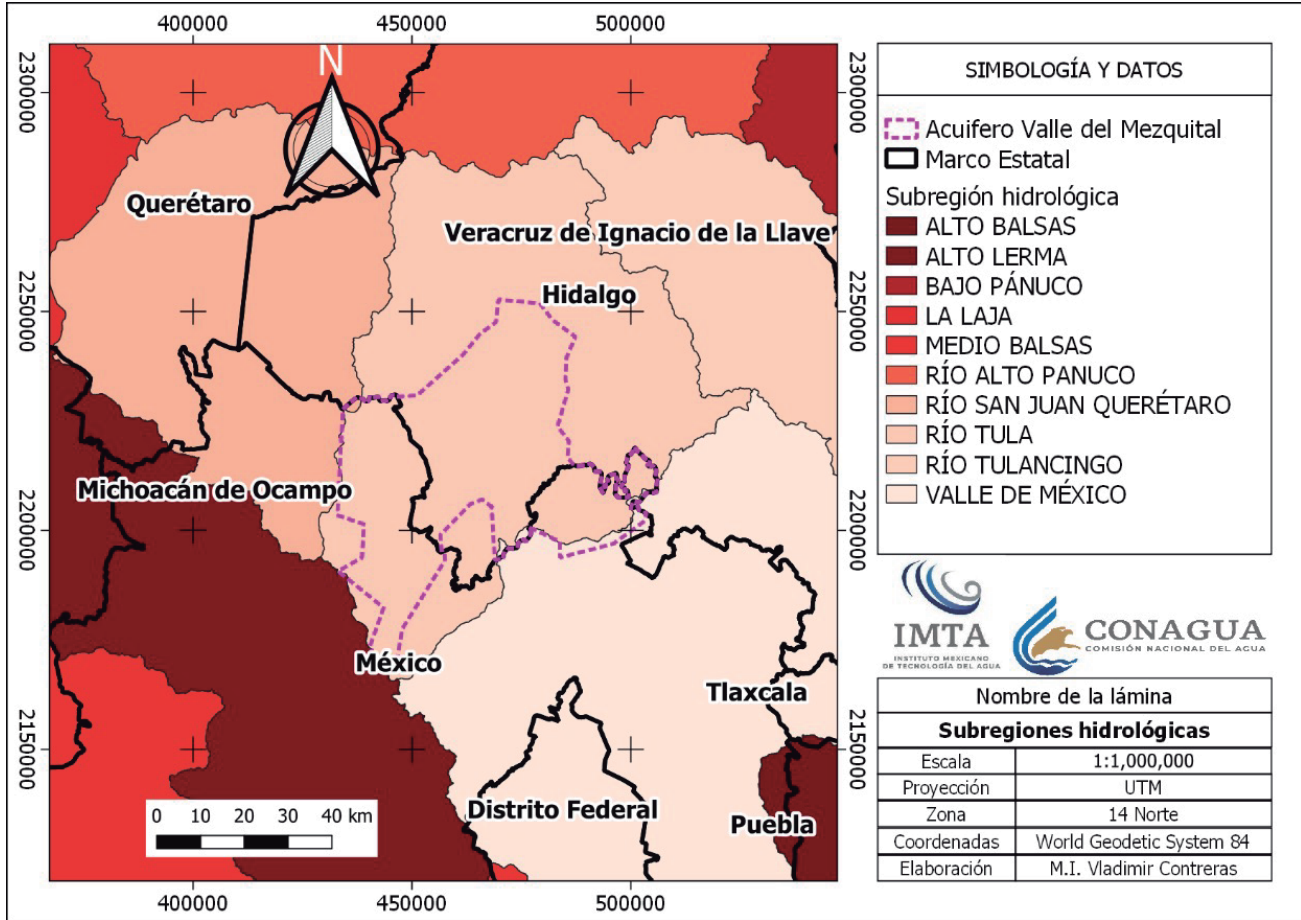


Figura 2.6. Subregiones hidrológicas

En su estado natural la zona disponía de recursos hídricos muy limitados. El escurrimiento superficial y la recarga natural de los acuíferos eran de magnitud reducida a causa de la baja precipitación pluvial. Sin embargo, a partir de la introducción de las aguas residuales procedentes del Valle de México a fines del siglo pasado, sus condiciones hidrológicas se fueron modificando sustancialmente (Figura 2.7). Mediante la construcción de obras de infraestructura hidráulica se ha incrementado el aprovechamiento del caudal creciente de aguas residuales con fines agrícolas (Jiménez *et al.*, 2004).



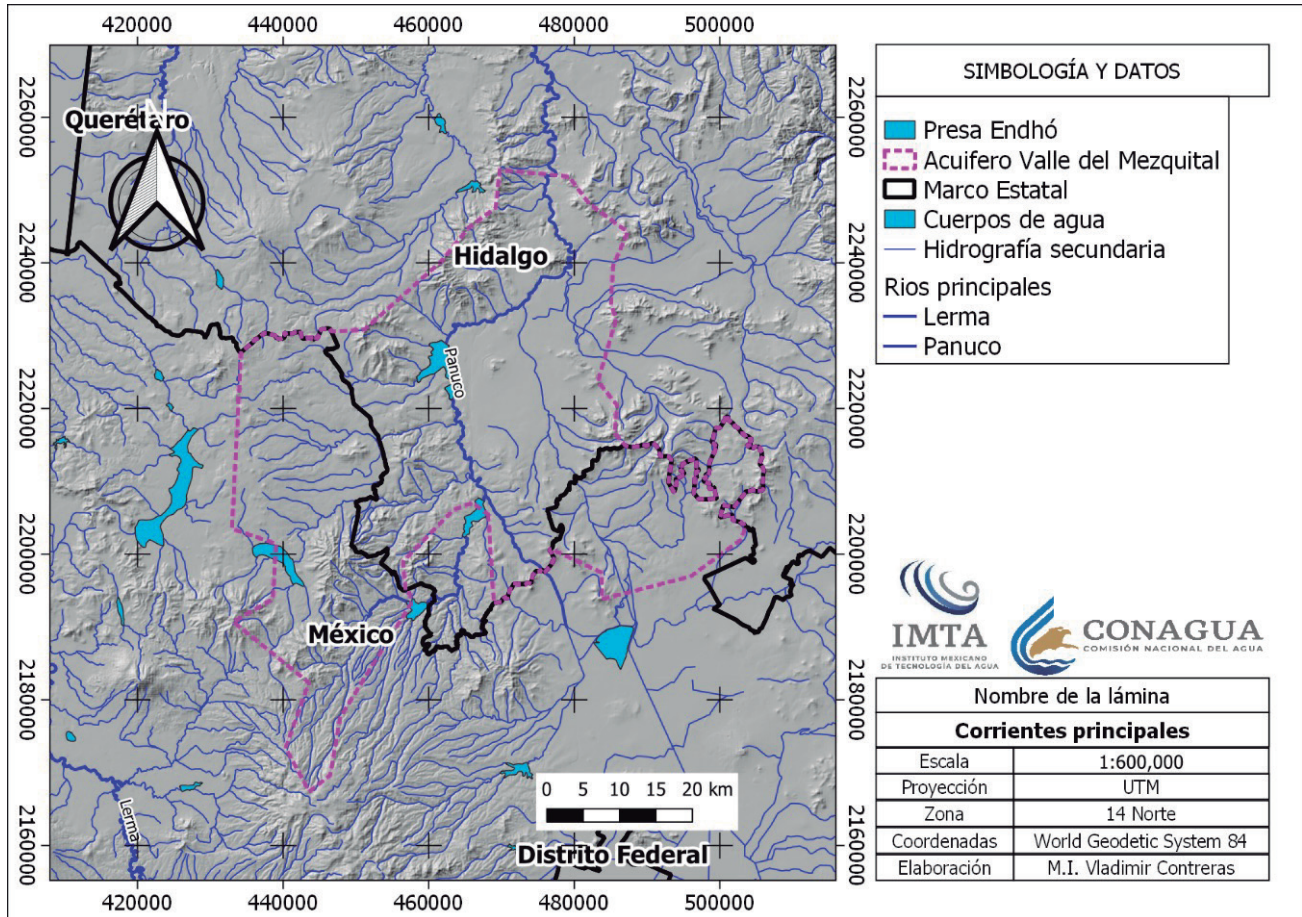


Figura 2.7. Corrientes superficiales principales

## 2.10. Infraestructura hidráulica

Actualmente la zona recibe aproximadamente 40m<sup>3</sup>/s de aguas residuales no tratadas que se utilizan parcialmente mezcladas con el escurrimiento natural del río Tula para regar alrededor de 45,214 ha en el Distrito de Riego 03, Tula, con una superficie de 45,214.52 ha regadas mediante una red de canales descritos, los principales, en la Tabla 2.1. La presencia o ausencia de revestimiento de los canales da mayor o menor oportunidad de recarga de los acuíferos locales, por lo que es importante hacer resaltar que el 81% de los canales principales están sin revestir, al igual que 52% de los canales laterales (BGS, *et al.*, 1998).

Tabla 2.1. Capacidad de los canales en el Distrito de Riego 03

Nombre	Capacidad (m <sup>3</sup> /s)
El Salto-Tlamaco	50
Canal de Fuerza	13
Dendhó	15
Endhó	15
Requena	15

El Valle posee una amplia infraestructura hidroagrícola que consiste en almacenamientos, conducciones y vías de comunicación. Dentro del DR03 existen fuera del área de estudio tres presas de almacenamiento y seis derivadoras. Dentro de los niveles freáticos, que oscilan entre los diez y veinte metros de profundidad en dirección a Mixquiahuala, se localizan 22 puntos de muestreo entre pozos, norias y manantiales.

Las estaciones climatológicas más cercanas son Tula (SMN), Tula (DGE), Jasso, Presa Endhó, Río Salado, Ajacuba (DGE) y Ajacuba (SMN); las estaciones identificadas con las siglas DGE son operadas por la Dirección General de Estudios; las restantes pertenecen al Servicio Meteorológico Nacional de la Conagua.

## 2.11. Clima

El clima en la zona de estudio varía de semiseco templado en el centro de los Valles que conforman la zona del Mezquital, a subhúmedo templado en las partes altas de las elevaciones topográficas que rodean los Valles, principalmente del Sureste. En la Figura 2.8 se muestra un plano con la distribución de climas, de acuerdo con el Atlas del Inegi.

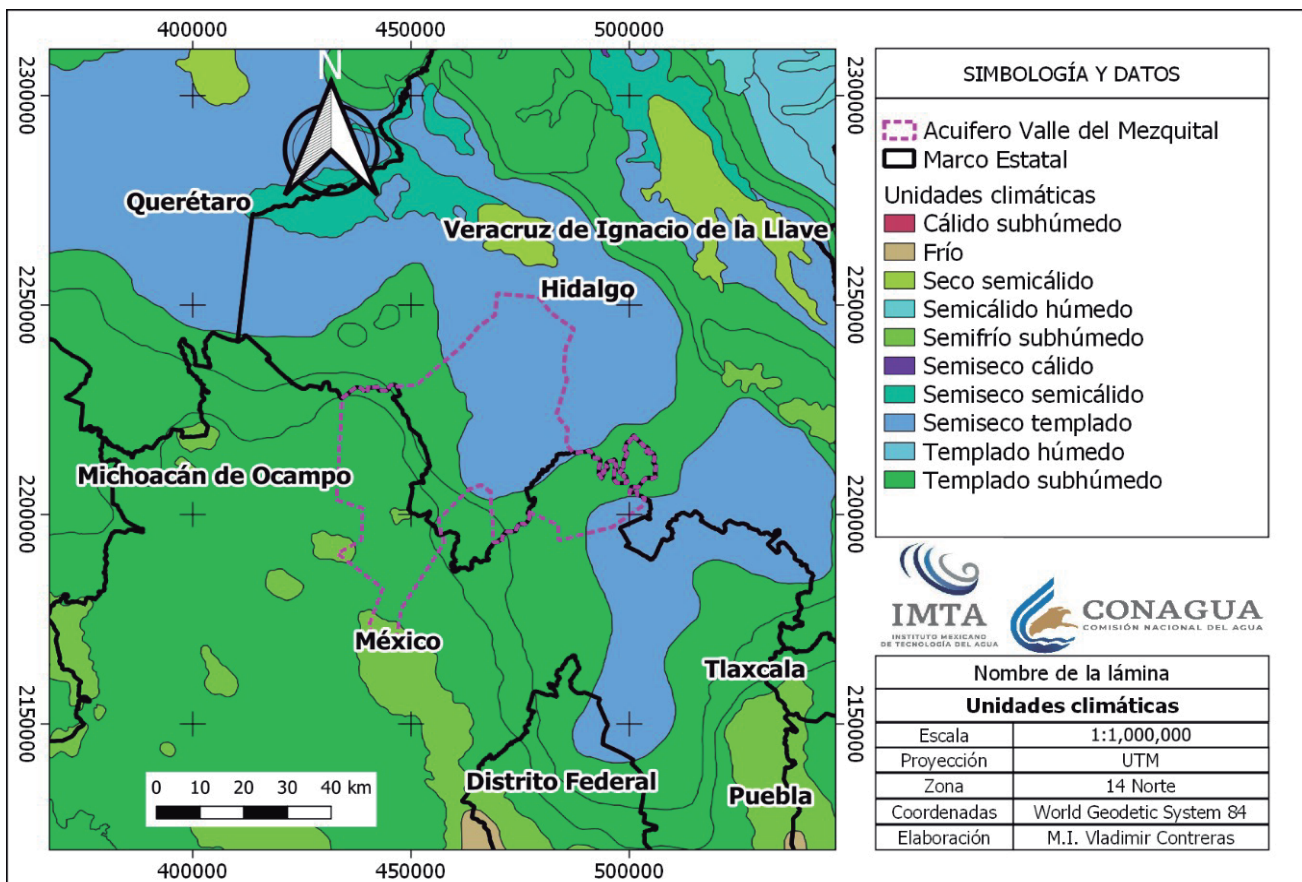


Figura 2.8. Mapa de unidades climáticas

## Temperatura

La temperatura media anual en la región varía de 8°C en la parte topográficamente alta del Sureste, a 16°C en el Valle del Mezquital y 18°C en Ixmiquilpan. En la Figura 2.9, se muestran las isotermas medias anuales de acuerdo con el Inegi. En dicha figura, se observa que la temperatura media anual registrada en las estaciones climatológicas de Mixquiahuala, claves 13-038 y 13-032, es de 17.4°C en ambas estaciones.

En la estación climatológica clave 13-060 de Tula, la temperatura media anual registrada es de 17.5°C, mientras que en Tepeji del Río la estación 13-054 presenta un promedio de 15.8°C y en la estación Actopan clave 13-025 es de 16.5°C. El sitio con mayor temperatura media anual corresponde a la estación 13-019 de Ixmiquilpan con 18.5°C, mientras que al sur de Tepeji del Río estación 15-096 se registran los valores más bajos con 15.5°C.

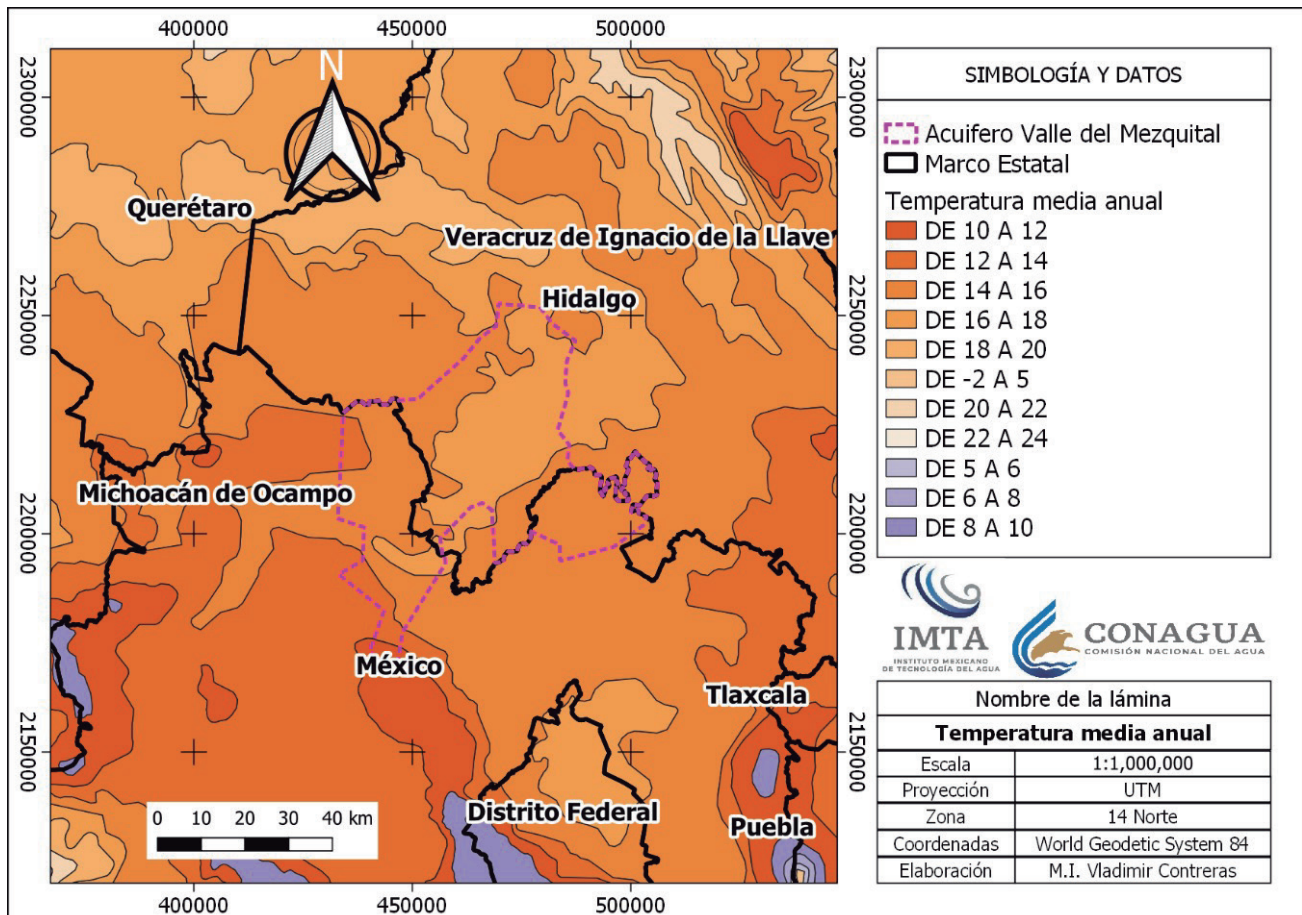


Figura 2.9. Mapa de temperatura media anual en la zona de estudio

En la Figura 2.9 se muestran las isotermas para el periodo de lluvias (mayo-octubre), donde se observan mínimas promedio de 9°C y máximas promedio de 21°C en la parte topográficamente alta del Sureste y mínimas promedio de 12°C y máximas promedio de 24°C en Ixmiquilpan. Durante el periodo de estiaje (noviembre-abril) en la región se observan temperaturas mínimas promedio de 3°C y máximas promedio de 21°C.

**Precipitación**

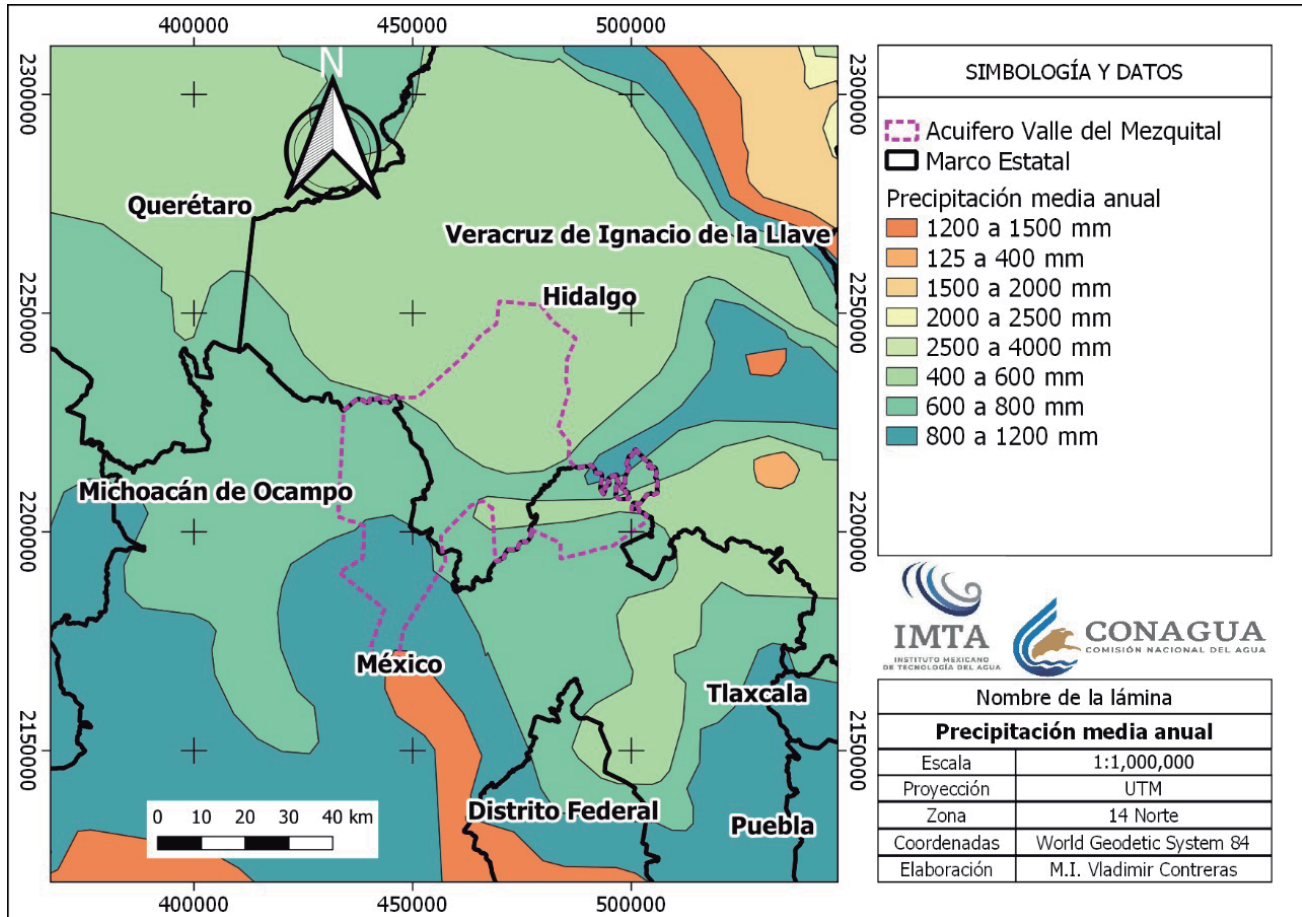
La precipitación media anual en la región varía de 1,200 mm (en la parte topográficamente alta del Sureste) a 500 y 600 mm en el Valle del Mezquital y hasta 400 mm en Ixmiquilpan. En la Figura 2.10, se muestran las isoyetas medias anuales de acuerdo con el Inegi. La precipitación media anual registrada en las estaciones climatológicas de Mixquiahuala, claves 13-038 y 13-032, son de 448.8 y 503.8 mm, respectivamente.

En la estación de climatológica de Tula, clave 13-060, la precipitación media anual registrada es de 618.7mm, mientras que en Tepeji del Río la estación 13-054 reporta 704.5mm y en la estación Actopan, clave 13-025, es de 477.5 mm. El sitio con menor precipitación corresponde a la estación de Ixmiquilpan, clave 13-019, con 363.6 mm, mientras que al sur de Tepeji del Río, estación clave 15-096, se registran los valores más altos con 1135.7mm (Lesser, 2013).

**Tabla 2.2.** Precipitación en las estaciones climatológicas

Estaciones	Precipitación (mm)
Mixquiahuala (SMN)	466.33
Tula	507.52
Tepeji	639.12
Actopan	376.08
Ixmiquilpan (SMN)	339.44

En la Figura 2.10 se muestran las temperaturas promedio donde se observan valores de 900 mm en la parte topográficamente alta del Sureste; de entre 475 y 550 mm en el Valle del Mezquital y de 400 mm en Ixmiquilpan. Para el periodo de estiaje, noviembre-abril, donde se observan valores de 125 mm en la parte topográficamente alta del Sureste; valores de poco menos de 100 en el Valle del Mezquital y de poco menos de 75 mm en Ixmiquilpan.



**Figura 2.10.** Mapa de precipitación media anual en la zona de estudio

## 2.12. Geología superficial

La geología superficial de la zona en los diversos mapas geológicos existentes revela la presencia de rocas volcánicas extrusivas ácidas e intermedias de origen Terciario y Cuaternario al norte centro y este de la zona de estudio, compuestas por las formaciones Don Guinyó, Fm Pachuca y Basaltos del Cuaternario (Figura 2.11). Estas últimas rocas afloran en la fluente del río Tula siguiendo la aparente trayectoria de una falla geológica normal. Pese al comportamiento es posible asociar la presencia de esta estructura con derrames fisurales.

Por otro lado, al Sur de la zona de estudio en un alto estructural cerca de la zona de Tula afloran rocas calizas masivas, compuestas por grandes estratos pertenecientes a la formación El Doctor, consideradas como el basamento del acuífero terciario del Valle del Mezquital. (Conagua, 2013).

Los principales rasgos estructurales corresponden a fallas de tipo normal que se han cartografiado tanto por lineamientos topográficos superficiales como por el resul-

tado de sondeos geofísicos e interpretación de imágenes de satélite. En general, dan origen a fosas tectónicas donde se han acumulado los sedimentos granulares y volcánicos en los principales Valles de la región.

Los pilares tectónicos están representados por el cerro San Miguel al Norte y el área de Bomintzhá al Sur. Corresponden a remanentes de rocas calcáreas del Cretácico que se encuentran aflorando, sin embargo, sus flancos están cortados por fallas de tipo normal, aunque en la sierra San Miguel se ha interpretado una falla de tipo recumbente. (CFE,1996).

Finalmente, la presencia de manantiales templados (temperatura mayor a 28°C) en la zona de estudio (Lesser-Carrillo 2011); de pequeñas anomalías magnéticas de campo total cercanas a la zona del Valle (SGM 2005) y la presencia cercana de la zona geotérmica de Pathé (CRE, 2011) hacen suponer las manifestaciones hidrotermales profundas y de baja temperatura en el subsuelo del Valle de Tula.

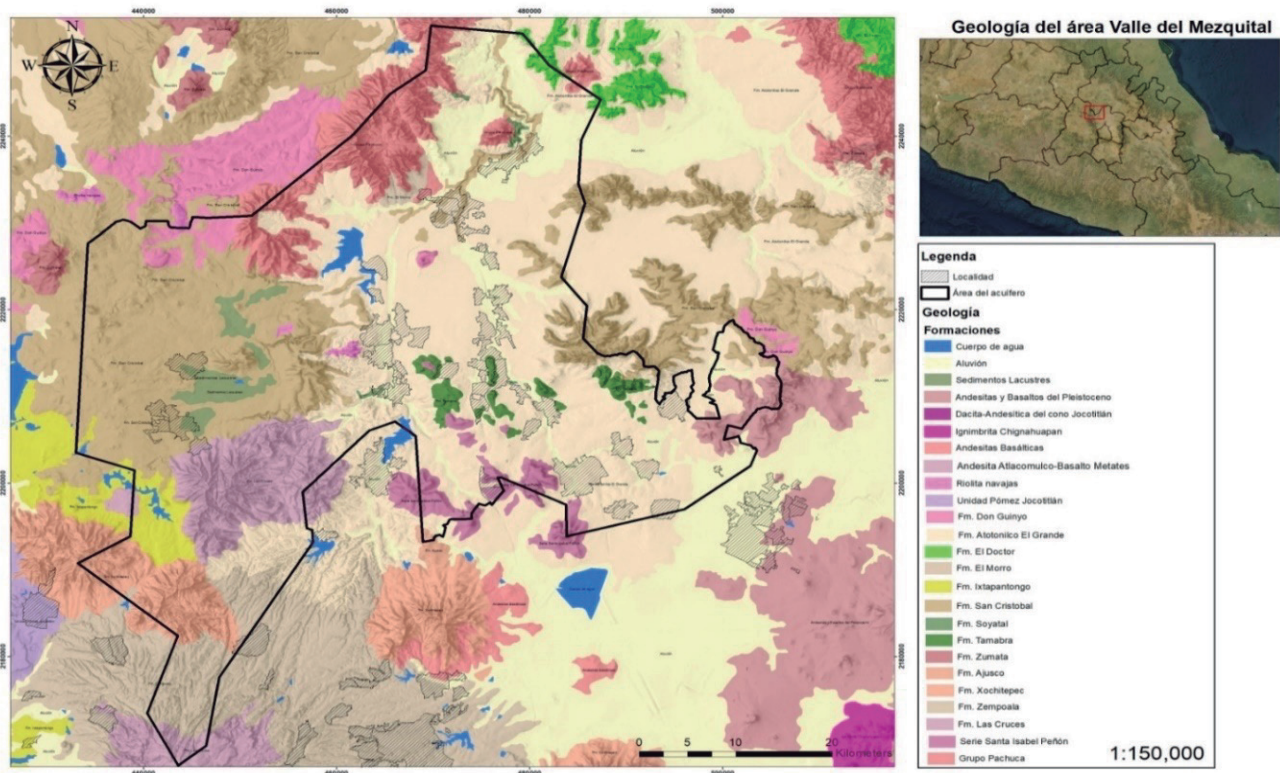


Figura 2.11. Mapa geológico de la zona de estudio

## 2.13. Estratigrafía

La estratigrafía del Valle del Mezquital fue descrita con base en las cartas geológicas F14-11 y E14-2 con escala 1:250 000 en un área que tiene una gran variedad de rocas, ígneas y



sedimentarias, de las cuales destacan las siguientes: rocas calizas con variaciones de facies, pertenecientes a la formación El Doctor, donde Wilson *et. al.*, (1955), describe algunas laminaciones interestratificadas de material fino, así como lutitas de color rojizo, además, se pueden encontrar pseudoestratos de pedernal apareciendo lenticularmente. Los estratos de esta unidad varían desde los 10 a los 20 cm de espesor, dependiendo de la facies en que se encuentre como la de calcarenita de estratificación gruesa y conglomerado de grano fino con cantidades considerables de coquina clástica. Intercaladas a esta formación se tienen rocas de la formación Tamabra que consta de calizas con estratos de 10 a 100 cm de espesor intercaladas con capas delgadas de pedernal negro.

Calizas interestratificadas transicionalmente con lutitas y margas de la formación Soyatal-Mezcala. Se pueden encontrar calizas con estratos de 10 a 20 cm de espesor de caliza gris oscura de grano fino que consta de un cuerpo de roca bien consolidado constituido por guijas y guijarros de caliza, dentro de una matriz compuesta por detritos de caliza de tamaño de arenas y en menor proporción, granos de cuarzo, feldespato y micas. Puede verse intercalada con flujos de lavas, brechas volcánicas, tobas y areniscas tobáceas de composición andesítica.

Se pueden encontrar rocas del Grupo Pachuca que consta de una sucesión volcánica constituida por lavas, brechas volcánicas, tobas y areniscas tobáceas, de composición andesítica, dacítica y riolítica, así como riolitas y coronando la sucesión, andesitas basálticas.

La formación Don Guinyo describe, de manera general, tobas y brechas riolíticas y dacíticas bien consolidadas, con lentes de vidrio negro, que pueden intercalarse con depósitos piroclásticos. Además, algunos autores describen capas de ignimbritas soldadas y no soldadas.

La Formación Atotonilco El Grande constituida en su base por depósitos gruesos, que gradúan a arenisca en la parte media y cima de la unidad, se presentan intercalaciones limo-arenosas, así como estratos tabulares con laminación paralela, los cuales contienen frecuentemente fósiles. Se pueden encontrar conglomerados, grauwacas líticas, litarenitas, limolitas, lutitas limosas, margas y depósitos volcánicos.

Aflora la formación Xochitepec que consta de tobas, brechas, complejos volcánicos y traquiandesitas, además de andesitas basálticas, andesitas de piroxeno, andesitas porfídicas de hornblenda, dacitas y traquiandesitas de hornblenda que fueron reconocidas petrográficamente. Siendo así, de manera general, se encuentra constituida por una sucesión de rocas volcánicas de composición intermedia y riodacítica, que a simple vista se observan plagioclasas y minerales máficos, como andesina, augita, hiperstena, lamprobolita y biotita, clasificando la unidad como una andesita de lamprobolita.

La Formación Zempoala se trata de una sucesión de rocas volcánicas andesíticas, donde se exhibe una interestratificación de brecha volcánica, corrientes lávicas, capas tobáceas y estratos masivos compuestos por fragmentos volcánicos.

Se han descrito hacia la parte norte, una secuencia de lavas andesíticas afaníticas-porfíricas, con escasos fenocristales pequeños de anfíbol, con algo de cuarzo secundario y depósitos piroclásticos, entre los que se han identificado flujos de ceniza y brechas volcánicas. Hacia Sur se menciona que las lavas son muy escasas, mientras que grandes bloques de roca se presentan dentro de las brechas volcánicas.

Se pueden encontrar rocas de la Formación Zumate que corresponden a dacitas relativamente inalteradas, poco falladas y no se observa mineralización cuarcifera, pero están siendo afectadas por diques. Dicha formación se distingue por contar con una textura porfídica y por las formas erosionales de pináculos. En una descripción más detallada de la unidad se describen derrames, brechas de derrame, aglomerados y rocas volcánicas epiclásticas de composición dacítica.

Hacia la base se incluyen capas clásticas constituidas por material erosionado de unidades andesíticas, dacíticas y riolíticas, cuya textura varía de limolita a conglomerado, seguidas por derrames andesíticos con fenocristales de anfíbol, cuarzo y feldespato.

La Formación San Cristóbal consiste en tobas y lavas basálticas, así como por conglomerados volcánicos de andesitas y riolitas, aunque localmente esta unidad varía de basalto a andesita. Esta formación está compuesta por derrames densos de andesita olivínica con cantidades pequeñas de capas tobáceas y clásticas.

En la Formación Las Cruces se observan depósitos piroclásticos consistentes con Pómez pliniana, secuencias de "Surges", que pueden ser planares o masivos, cristalinos, vítreos y en ocasiones con pómez, cubiertas por flujos piroclásticos generalmente no soldados, de cenizas cristalinas, vítreas y de pómez con o sin fragmentos, así como bloques accidentales.

La riolita Navajas está constituida por derrames de lava, horizontes de brecha y toba de composición riolítica, donde los derrames de lava riolítica se observan de coloración gris clara, de estructura fluidal, con vesículas horizontales, horizontes de brecha y toba riolítica, interestratificadas entre sí y con pequeñas cantidades de material volcánico epiclástico.

La riolita Chignahuapan está conformada por dos tipos de rocas, una riolita fluidal, la cual constituye una roca dura, en donde la parte superior contiene lentes obsidiana y en la base exterioriza esferulitas de 1 a 1.5 cm de diámetro; y una hialotraquita, que en desimilitud de



la primera, es una roca suave y se encuentra modificada presentando una textura fluidal y contiene sanidino, oligoclasa y poco cuarzo como minerales principales, la hematita, geothita y arcilla son secundarios, y la magnetita es el mineral accesorio. En el microscopio muestra una textura porfídica con una matriz formada por vidrio ácido que engloba fenocristales de feldespatos, cuarzo y biotita.

Se ha descrito a la Formación Ajusco como una sucesión volcánica de derrames de andesitas basálticas. Está conformada por rocas de color gris con vivos amarillentos, verdes, blancos, y en menor cantidad tonos rojizos; con textura porfídica y estructura compacta con minerales principales como augita y lamprobolita. Petrográficamente, sobresalen los basaltos de olivino y piroxenos hacia el Oeste y Sur del cerro del Ajusco; mientras que al noroeste de este cerro son andesitas de piroxeno.

La Formación Ixtapantongo se distingue por la presencia de tobas y rocas clásticas semi-consolidadas que contienen conglomerados, areniscas, areniscas tobáceas y limolitas, con confines de diatomeas, lodolitas y en menor proporción capas de pómez (Figura 2.12).

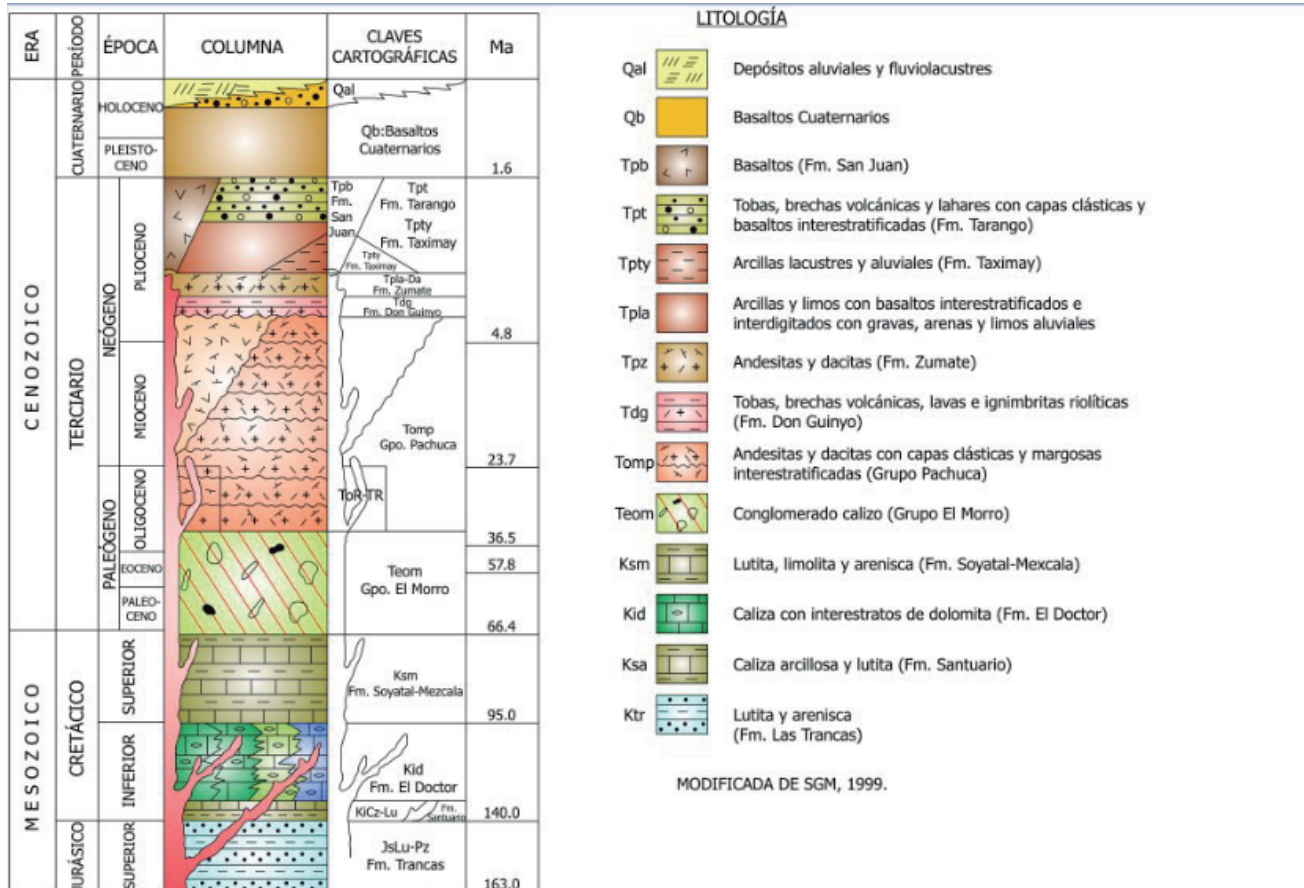


Figura 2.12. Columna estratigráfica de la zona de estudio (elaborada por Lesser y Asociados 2013).

# 3

## CENSO DE APROVECHAMIENTO





## 3. CENSO DE APROVECHAMIENTOS

Se realizaron recorridos de campo durante los que se censaron e identificaron cien aprovechamientos de agua subterránea (Tabla 3.1 y Figura 3.1). Se recabó diferente tipo de información la cual se incluye en la ficha técnica de cada uno de ellos: nombre y datos específicos del concesionario, localización y datos generales del aprovechamiento, características constructivas de la captación, régimen de operación.

Durante los recorridos de campo se obtuvieron además mediciones del nivel estático y/o dinámico y se tomó registro de caudal de aquellos que se encontraban operando. Así mismo, los aprovechamientos se localizaron en cartas topográficas del Inegi, escala 1:50 000 y se efectuó una clasificación del número de aprovechamientos según los usos a que son destinados: agrícola, industrial, doméstico, abastecimiento de agua potable, a su condición (activo, inactivo), coordenadas, diámetros de descarga, entre otros; indicando también los volúmenes extraídos y los aprovechamientos abandonados siendo identificados mediante un código consecutivo. Los detalles sobre las fichas de pozos de aprovechamiento hidráulico recolectados durante el censo se encuentran adjuntos en los anexos 3.1a , 3.1b y 3.1c.

**Tabla 3.1.** Tabla censo histórico de aprovechamientos

No.	OTRO No.	TIPO	PROPIETARIO	LOCALIZACIÓN		COTA	ALTURA	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	EVOL. DEL	ELEVACIÓN	ELEVACIÓN	
				(UTM ITRF-92)											BROCAL
				LATITUD	LONGITUD	EN	m	m	m	m	m	m	m	m	m
MZ-1	VI-406-09	POZO	EL MUNICIPIO	2232521	482437	2040.786	0.22		66.50	74.35		-7.85	1966.44		
MZ-2	PRP-174	POZO	LA UNIDAD DEPORTIVA	2238873	480926	1992.072	0.25		34.07	NO B/S	32.97	1.10		1959.10	
MZ-3 BIS	IX-206-0	MANAN.	ASOC. DESARROLLO COMUNT.	2238568	478561		0.00			0.00					
MZ-4		POZO	PEMEX	2231971	478711	2014.230			16.58	16.30	*	0.28	1997.93		
MZ-5		POZO	PEMEX	2232176	475468	2011.960		21.66	19.40	19.50	*	-0.10	1992.46		
MZ-6		POZO	PEMEX	2232531	474570	2012.340		18.87	14.61	13.17	*	1.44	1999.17		
MZ-7		POZO	PEMEX	2232479	478678	2009.460		24.14	22.18	20.00	*	2.18	1989.46		
MZ-10		MAMAN.	LA COMUNIDAD	2233688	472114		0.00		0.00	0.00		0.00			
MZ-12	A-VI-381	MAMAN.	LA COMUNIDAD	2232663	470857		0.00		0.00	0.00		0.00			
MZ-18		POZO	LA COMUNIDAD	2230977	464601	1990.000	0.75		7.07	7.10		7.12	-0.03	1982.90	1982.88
MZ-19		POZO	EL MUNICIPIO	2230975	464605				6.57						
MZ-20	VI-363-01	POZO	LA COMUNIDAD	2230503	465634	2028.976	0.65			37.86	*		1991.12		
MZ-21	X-386-07	POZO	LA COMUNIDAD	2228524	463474		0.20				CERRADO				
MZ-22		POZO	CAAMPAO	2244685	481031	2003.609			84.31			82.10	2.21		1921.51
MZ-25		MAMAN.	LA COMUNIDAD	2247534	478580		0.00			0.00					
MZ-27		POZO		2247456	472809	1943.593				78.10	*		1865.49		
MZ-32		POZO	CFE	2223139	475561	2058.750				2.91	*		2055.84		
MZ-33		POZO	CFE	2224289	478546	2059.620				6.37	*		2053.25		
MZ-34		POZO	PEMEX	2233697	477085	2009.400		24.82	23.74	20.31	*	3.43	1989.09		
MZ-36		POZO	PEMEX PPX-3	2221087	468658	2075.819		24.31	27.47	35.70	*	-8.23	2040.12		
MZ-37		POZO	PEMEX PPX-5	2221800	468434	2073.199		18.48	17.97	21.00	*	-3.03	2052.20		
MZ-38		POZO	PEMEX PPX-15	2221200	470156	2076.601		17.62	19.16	29.31	*	-10.15	2047.29		
MZ-39		POZO	LA COMUNIDAD	2220365	470557	2072.000	0.45		9.31	6.00		3.31	2066.00		
MZ-40		POZO	CFE I-5	2219260	470109	2091.440				8.12	*		2083.32		
MZ-41		POZO	CFE I-6	2218996	469419	2091.390				3.42	*		2087.97		
MZ-42		POZO	CFE I-3	2218996	471510	2091.470				8.63	*		2082.84		
MZ-43		POZO	CFE I-9	2219852	470345	2085.850				6.92	*		2078.93		
MZ-45		POZO	PEMEX PPX-7	2222526	470484	2069.450		16.09	15.33	15.17	*	0.16	2054.28		
MZ-46		POZO	PEMEX PPX-9	2223179	471529	2088.270		14.00	13.85	13.32	*	0.53	2054.95		
MZ-47		POZO	PEMEX PPX-11	2223913	472376	2061.476		7.12	7.28	7.00	*	0.28	2054.48		
MZ-48		TEOCALLI	PEMEX PPX-13	2224655	473195	2055.963			8.15	8.02	*	0.13	2047.94		
MZ-49		POZO	CFE II-9	2223667	473891	2068.670				14.59	*		2054.08		
MZ-50		POZO	CFE II-10	2223019	474172	2071.290				15.26	*		2056.03		
MZ-51		POZO	CFE II-14	2224193	474296	2057.900				4.79	*		2053.11		
MZ-52		POZO	CFE I-7	2220429	469852	2081.370				11.32	*		2070.05		
MZ-53		POZO	COMISIÓN FEDERAL DEELEC.	2220253	469207	2081.000				7.34	*		2073.66		
MZ-54		POZO	CFE I-10	2220690	471529	2080.140				16.40	*		2063.74		
MZ-55		POZO	CFE I-4	2219718	471618	2086.420				12.09	*		2074.33		
MZ-56		POZO	LA COMUNIDAD	2220929	494314	2079.347	0.45	48.24	48.28	65.80		-17.52	2013.55		
MZ-59		POZO	CFE II-13	2225777	473574	2053.250			51.30	44.04	*	7.26	2009.21		
MZ-64		POZO	PEMEX	2222767	468634	2073.060			19.52	19.28	*	0.24	2053.78		
MZ-65		POZO	PEMEX PPX-17	2223477	467930	2067.257		20.60	19.04	18.90	*	0.14	2048.36		
MZ-66		POZO	PEMEX PPX-19	2224184	467237	2063.972		22.00	22.15	21.56	*	0.59	2042.41		
MZ-68		POZO	EL MUNICIPIO	2217150	467892	2086.087			10.96			9.65	1.31	2076.44	
MZ-70		NORIA	SIN INFORMES	2218658	472558	2095.613		16.98	15.21			15.82	-0.61	2079.79	
MZ-76		NORIA	TULA	2218894	469072	2081						0.95		2080.05	
MZ-77	VII-187-0	POZO	LA COMUNIDAD	2217907	466745	2083.292	0.20		27.45	22.10	*	5.35	2061.19		
MZ-79		POZO	EL MUNICIPIO	2216137	474031	2134.811			114.31	106.00	*	8.31	2028.81		
MZ-80	KII-416-01	POZO	CAPYAT	2220124	468553	2081.376	0.53	27.22	28.54	25.00		3.54	2056.38		
MZ-86		POZO	SIN INFORMES	2214830	471499	2188.827	0.5	58.54	56.16	AZOLVADO					
MZ-92	II-227-07	NORIA	LA COMUNIDAD	2213110	474617	2136.253	0.15		18.91	18.20		9.38	0.71	2118.05	2126.87
MZ-95		NORIA	LA COMUNIDAD	2211088	474864	2200.000			38.38	40.69	*	-2.31	2159.31		
MZ-100		POZO	EL MUNICIPIO	2215491	475322	2111.793				56.75	*		2055.04		
MZ-102		POZO	LA COMUNIDAD	2217075	475822	2117.715			31.90	33.40	*	-1.50	2084.32		
MZ-103	III-236-0	POZO	LA COMUNIDAD	2217078	475846	2104	0.60	26.90	36.09	30.30		5.79	2073.70		
MZ-104		POZO	COMISIÓN DE AGUA POTABLE	2217377	475159	2109.365			32.64	36.34	*	-3.70	2073.03		
MZ-109		POZO	EL MUNICIPIO	2218977	478800	2079.969	0.28			5.63		7.38	2074.34	2072.59	
MZ-110	III-228-0	POZO	LA COMUNIDAD	2218264	475406	2092.000	0.20		25.49	28.20		-2.71	2062.89		
MZ-111		POZO	LA COMUNIDAD	2218603	474748	2098.496	0.60		25.79	NO B/S		23.60		2074.90	
MZ-116		NORIA	MARCELO MONTOYA GARCÍA	2219164	474810	2090.000						18.76		2071.24	
MZ-117		NORIA	LA COMUNIDAD	2212148	473533	2168.000						46.97		2121.03	
MZ-118		POZO	LA COMUNIDAD	2212015	472479	2225.000	0.44		120.72	108.15		108.63	12.57	2116.37	
MZ-122		POZO	CFE II-7	2224304	475121	2059.820				8.49	*		2051.33		
MZ-123		POZO	EL MUNICIPIO	2225941	478842	2067.000						13.85		2053.15	
MZ-124		POZO	EL MUNICIPIO	2225870	477537	2077.805	0.45					98.00	72.05	1979.81	2005.76
MZ-126		NORIA	EDUARDO BORJA RUY	2208402	459005	2146.000						3.52		2142.48	

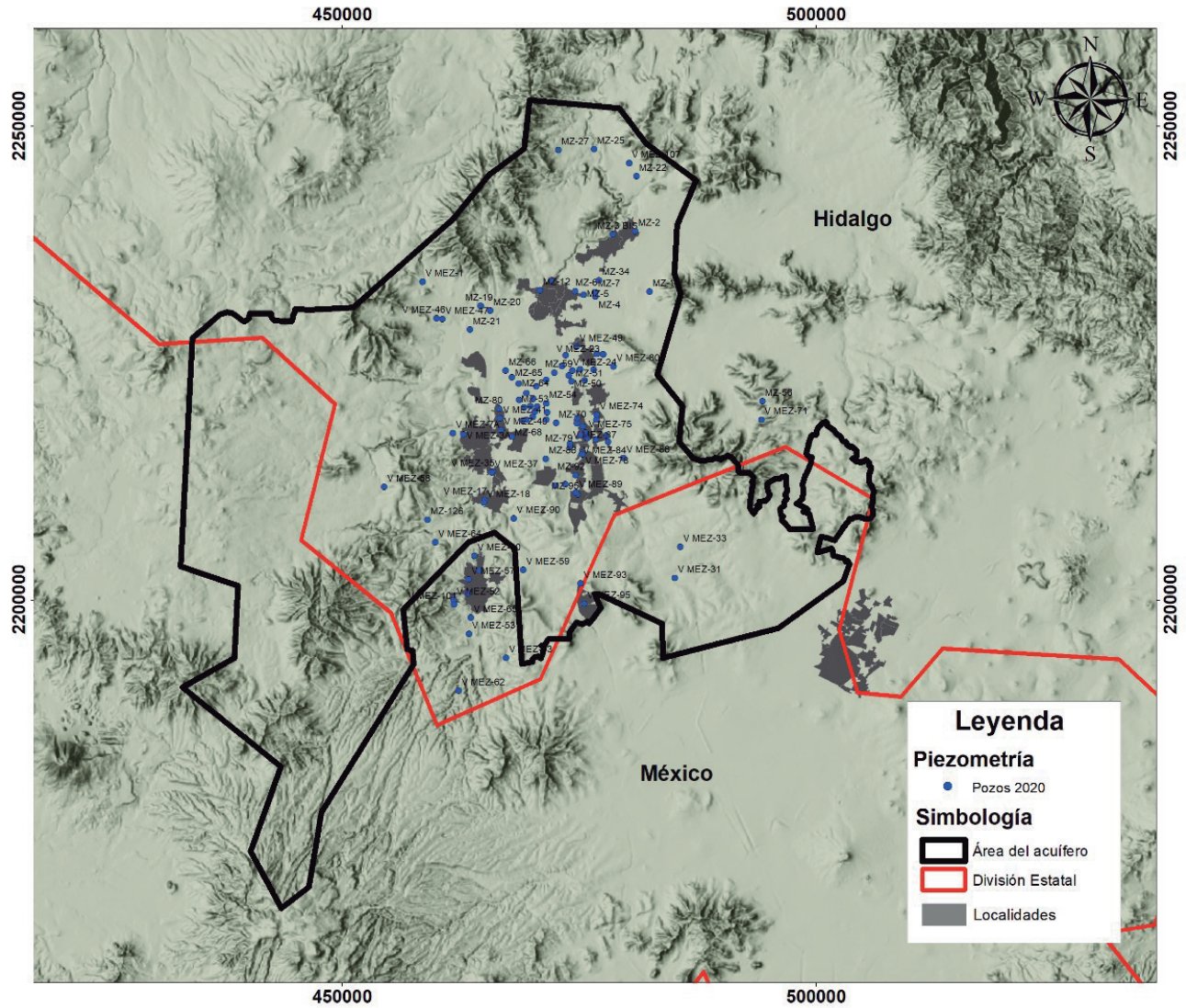


Figura 3.1. Censo de aprovechamientos

# 4

## DETERMINACIÓN DE LOS SESENTA POZOS PARA LA REACTIVACIÓN DE LA RED PIEZOMÉTRICA Y DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL





## 4. DETERMINACIÓN DE LOS SESENTA POZOS PARA LA REACTIVACIÓN DE LA RED PIEZOMÉTRICA Y DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL

La información de calidad del agua y coordenadas geográficas (Figura 4.1) en la que se basó la presente selección de pozos que comprenderán la red piezométrica y de calidad del agua fueron obtenidas de las fuentes siguientes:

- 1) Sistema Mezquital para el abastecimiento de agua en bloque al Valle de México e Hidalgo, elaborado por Lesser y Asociados en los años 2012-2013

Lesser y Asociados realizó los estudios geohidrológicos de calidad del agua y de tenencia de la tierra del Sistema Mezquital, el cual incluyó los acuíferos de Actopan, Ixmiquilpan, Tepeji del Río, Mezquital y Chapantongo, a fin de evaluar la disponibilidad de agua (cantidad y calidad) para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México como nueva fuente de abastecimiento de agua. Esto para fortalecer el cumplimiento del compromiso de la Federación, a través de la Conagua en materia de abastecimiento de agua potable y dentro del marco del Programa de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México.

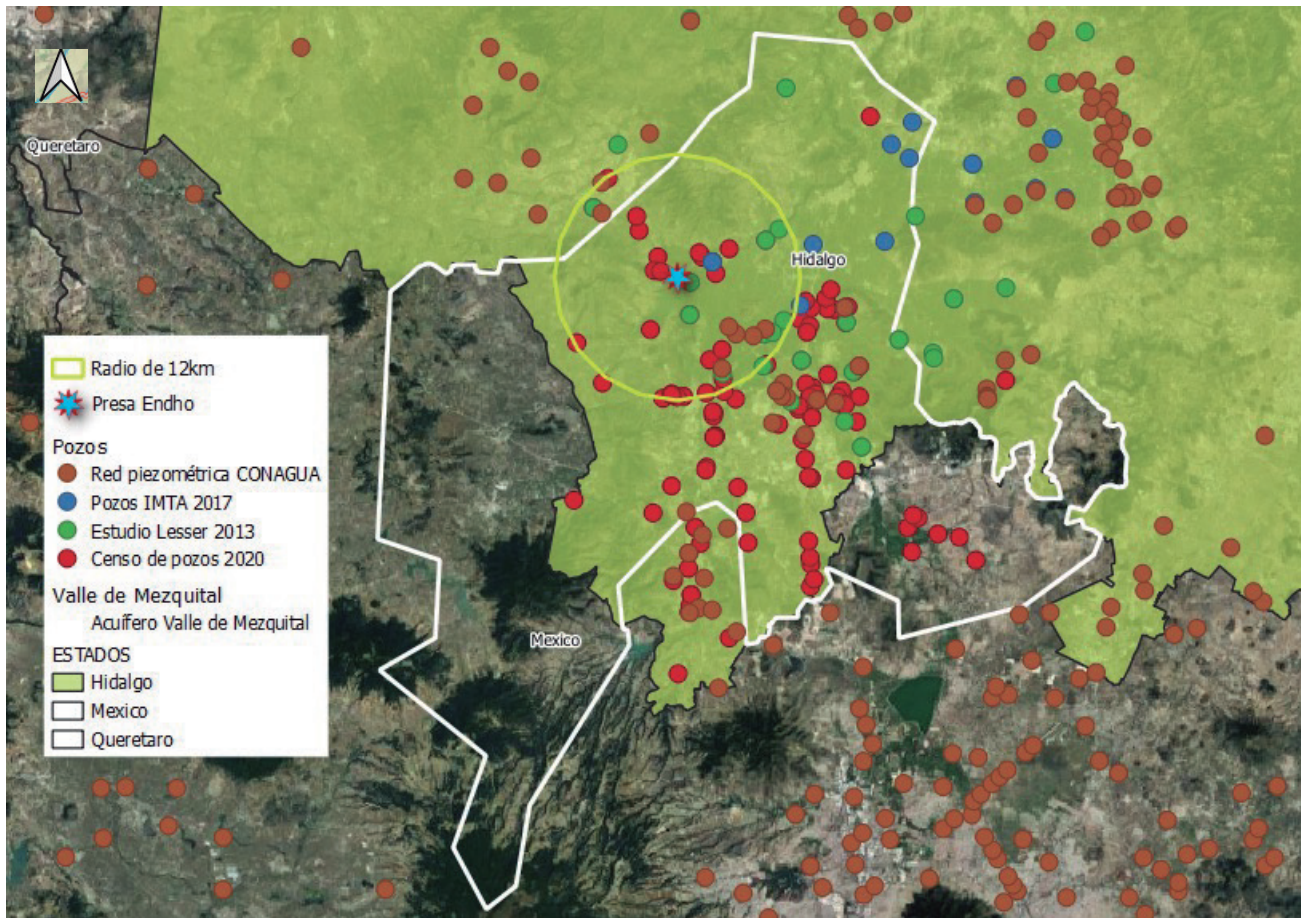
2. Relación de acuíferos con red piezométrica. Registro de datos piezométricos por pozo de observación. Mapa que muestra la ubicación de las redes y pozos piezométricos. Hidrógrafos de pozos de Conagua creados el 2016-03-04

Información obtenida de la página de Datos Abierto de la Comisión Nacional del Agua<sup>1</sup>.

3. Reactivación de la red piezométrica y de calidad del agua del acuífero Valle del Mezquital (etapa inicial)

<sup>1</sup> <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/red-piezometrica-mapas>

De acuerdo con los términos de referencia establecidos en la presente investigación se realizó previamente un censo de pozos en el año 2020.



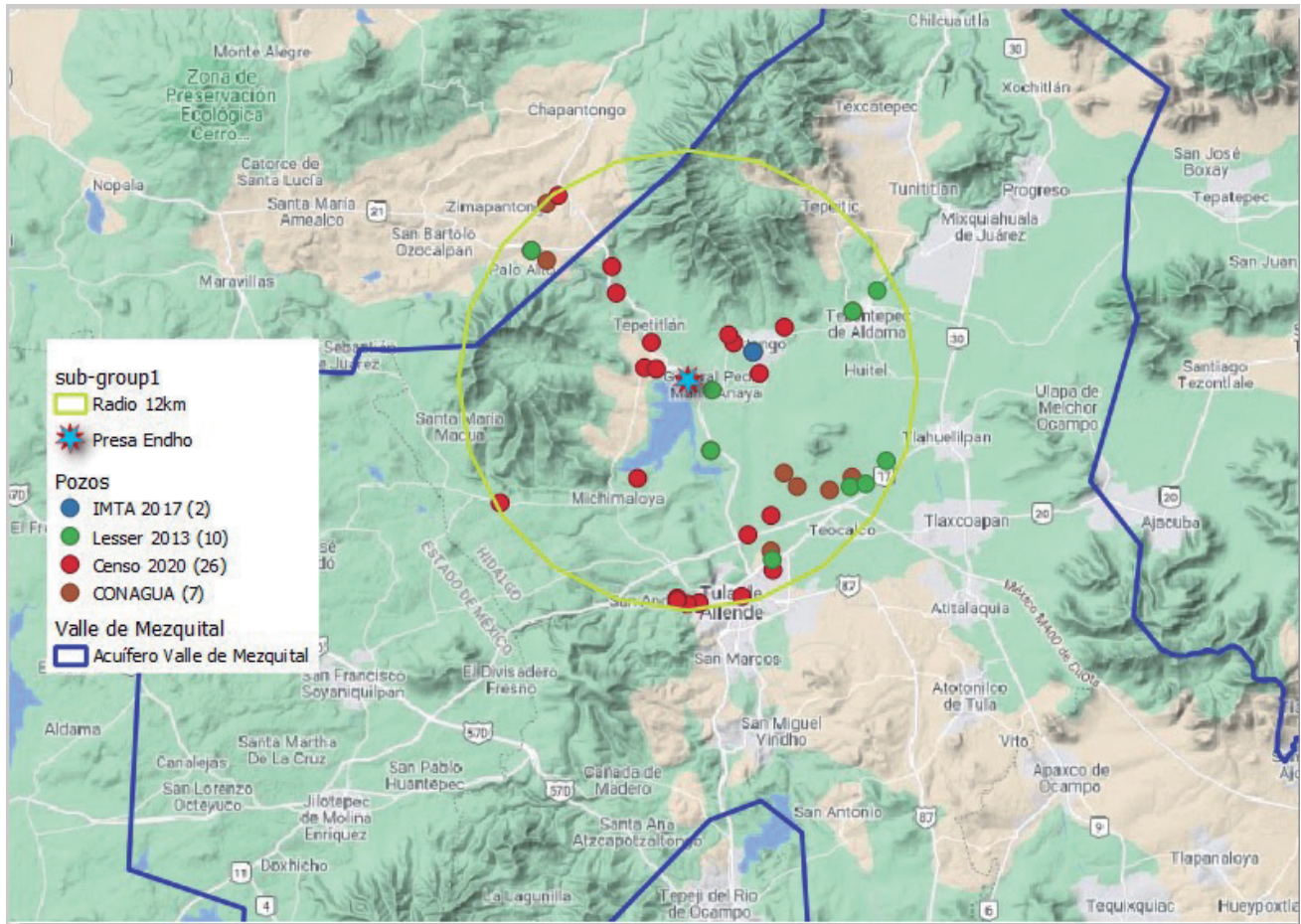
**Figura 4.1.** Ubicación geográfica de los pozos en el acuífero del Valle del Mezquital (fuente: elaboración propia con información de Conagua, 2020; IMTA 2017; Lesser, 2013)

## 4.1. Criterios de Selección

Con la finalidad de cubrir la zona que compete al acuífero del Valle del Mezquital, así como la presa Endhó, se consideró en un primer paso la selección de aquellos treinta pozos dentro de un radio de 12 kilómetros de la presa (Figura 4.2) para la red de calidad del agua.

Posteriormente, fueron descartados los puntos que estuvieran cercanos entre sí, es decir aquellos con una distancia entre ellos menor a tres kilómetros; lo anterior para obtener un mayor rango de observación en la evolución de la contaminación en los pozos (tal como se reportó en IMTA, 2017). Asimismo, a razón del censo de pozos realizado en 2020 pudieron detectarse aquellos no aptos para la toma de muestras de agua y medición piezométrica. En este sentido, de los cien pozos censados; 73 son aptos para la toma de muestra de agua y medición piezométrica (Tabla 3.1).





**Figura 4.2.** Selección preliminar de los pozos a considerar dentro de la red piezométrica en el Valle del Mezquital considerando un radio de 12 Km de la presa Endhó (fuente: elaboración propia con información de Conagua, 2020; IMTA 2017; Lesser 2013)

Por último, debido a la suficiente información se decidió elegir aquellos pozos del informe de Lesser (2016) e IMTA (2013) con la finalidad de obtener continuidad en su historial de calidad del agua sobre aquellos de Conagua, por lo que estos últimos fueron descartados ya que, igualmente se encontraban muy cercanos a las coordenadas en los informes mencionados. Por lo tanto, se cubrió la mayor parte del área.

Se seleccionaron los sesenta pozos de la red piezométrica que cubriera de la mejor manera la distribución espacial de la zona y que pudiesen ser sondeables (figura 4.12). Las coordenadas de los pozos de la red piezométrica se presentan en la tabla de 6.1, ya que corresponden a los pozos nivelados.

## 4.2. Análisis piezométrico histórico

De la información compilada en este estudio se obtuvieron datos piezométricos para los años 2000, 2007, y 2013. De esta información de elaboraron mapas de profundidad al nivel estático

y elevación del nivel estático. En esta sección también se incluyó la información obtenida para el presente estudio (año 2020).

Las configuraciones de la profundidad del nivel estático (Figura 4.3 a Figura 4.6) presentan una distribución similar de la profundidad, con valores del orden de diez metros para la porción Norte del acuífero, valores intermedios en el Valle de treinta metros, mientras que las mayores profundidades se localizan en la porción central con valores de hasta sesenta metros, ligados a la batería de pozos de la CFE y Pemex.

En cuanto a la elevación del nivel estático se realizaron las configuraciones de los años 2000, 2007, 2013 y 2020 (Figura 4.7 a Figura 4.10). En estas distribuciones del nivel estático se puede observar que el flujo principal del agua subterránea es de Sur a Norte, las partes altas corresponden a las zonas de recarga.

Para la evaluar la evolución del nivel estático se llevó a cabo una comparación de los niveles estáticos en la zona de estudio para los años 2000 a 2020. Se aprecia una recuperación de niveles para la mayor parte del acuífero, principalmente en la parte de central del Valle (Figura 4.11). Por otro lado, se observan disminuciones en los niveles del agua subterránea para las zonas Oriental y Sur. Cabe señalar que los valores de mayor magnitud hacia el Sur y Norte de la zona de estudio pueden deberse a la calidad de la información reportada para el año 2000, y que no sea representativa de dicha evolución (gran recuperación en la zona Norte y una gran disminución de niveles hacia la porción Sur).

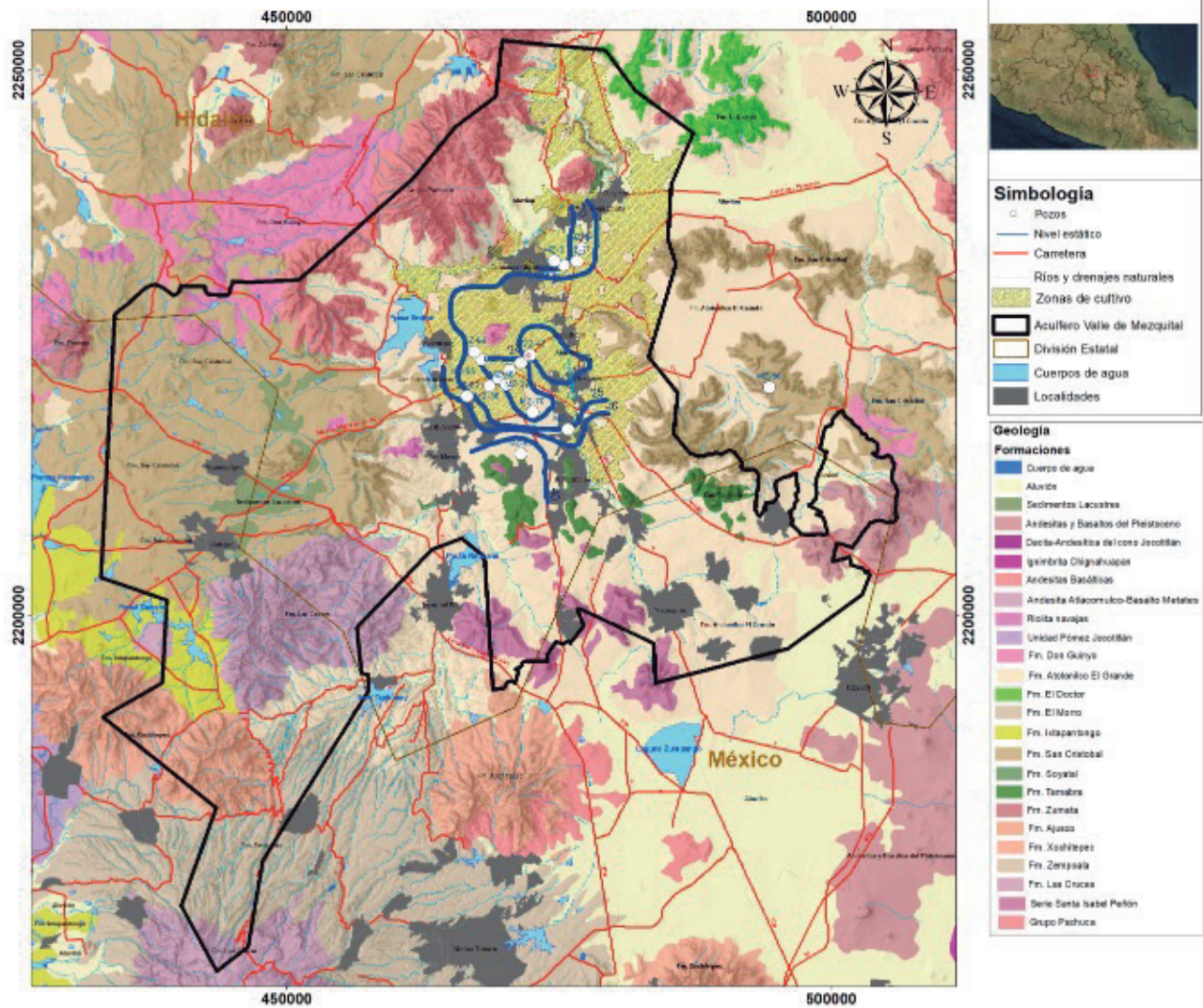


Figura 4.3. Profundidad al nivel estático (m) 2000

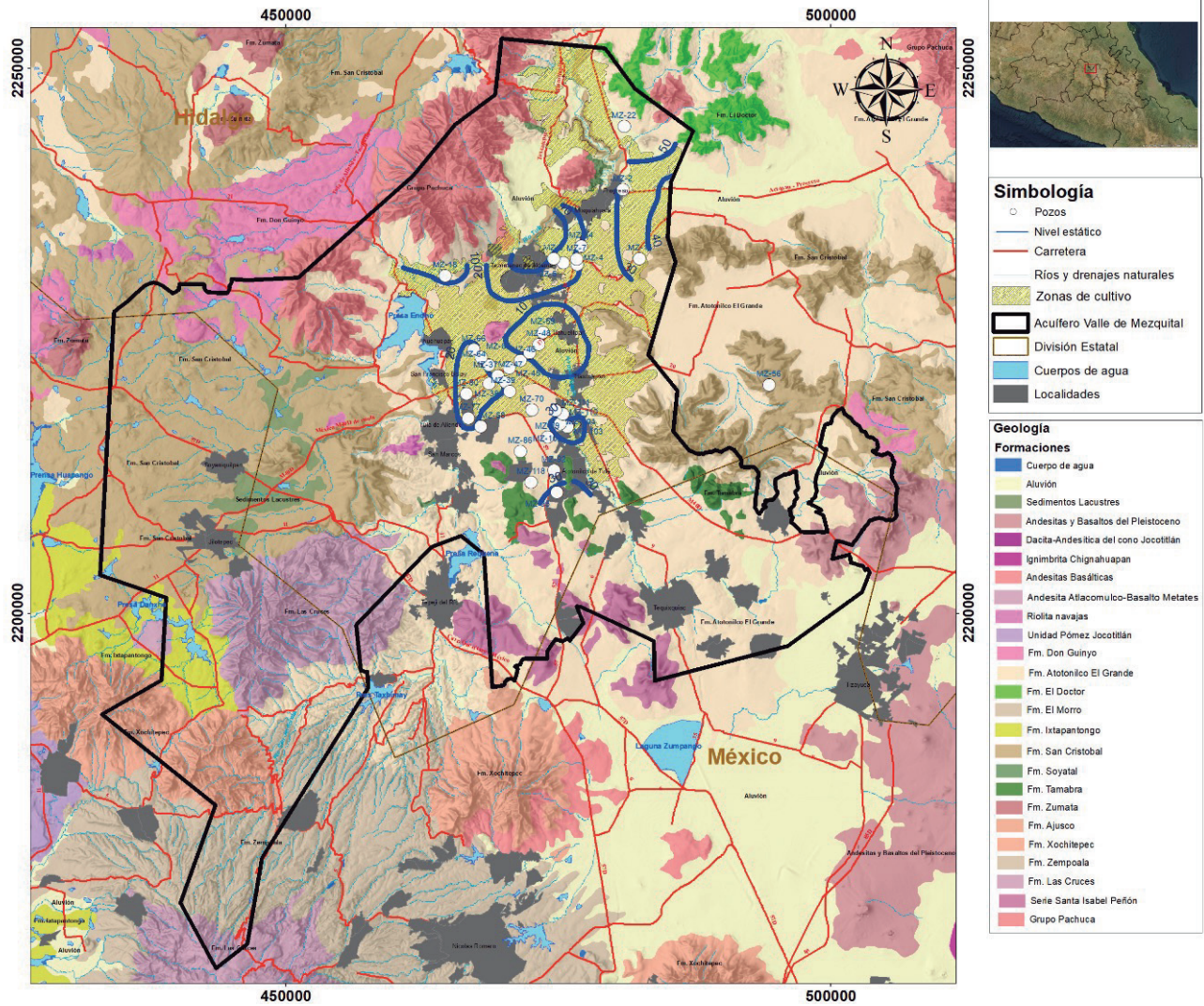


Figura 4.4. Profundidad al nivel estático (m) 2007

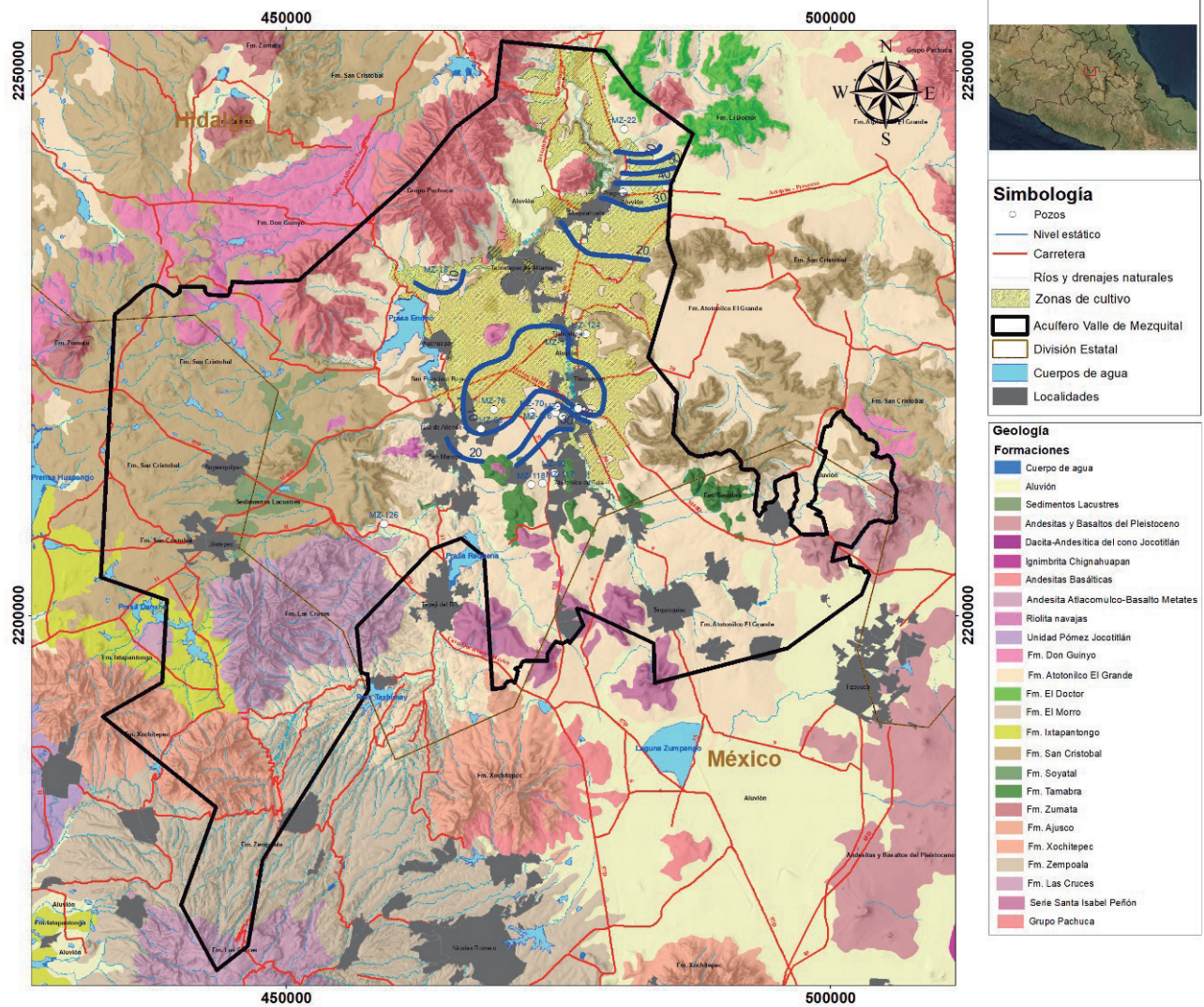


Figura 4.5. Profundidad al nivel estático (m) 2013

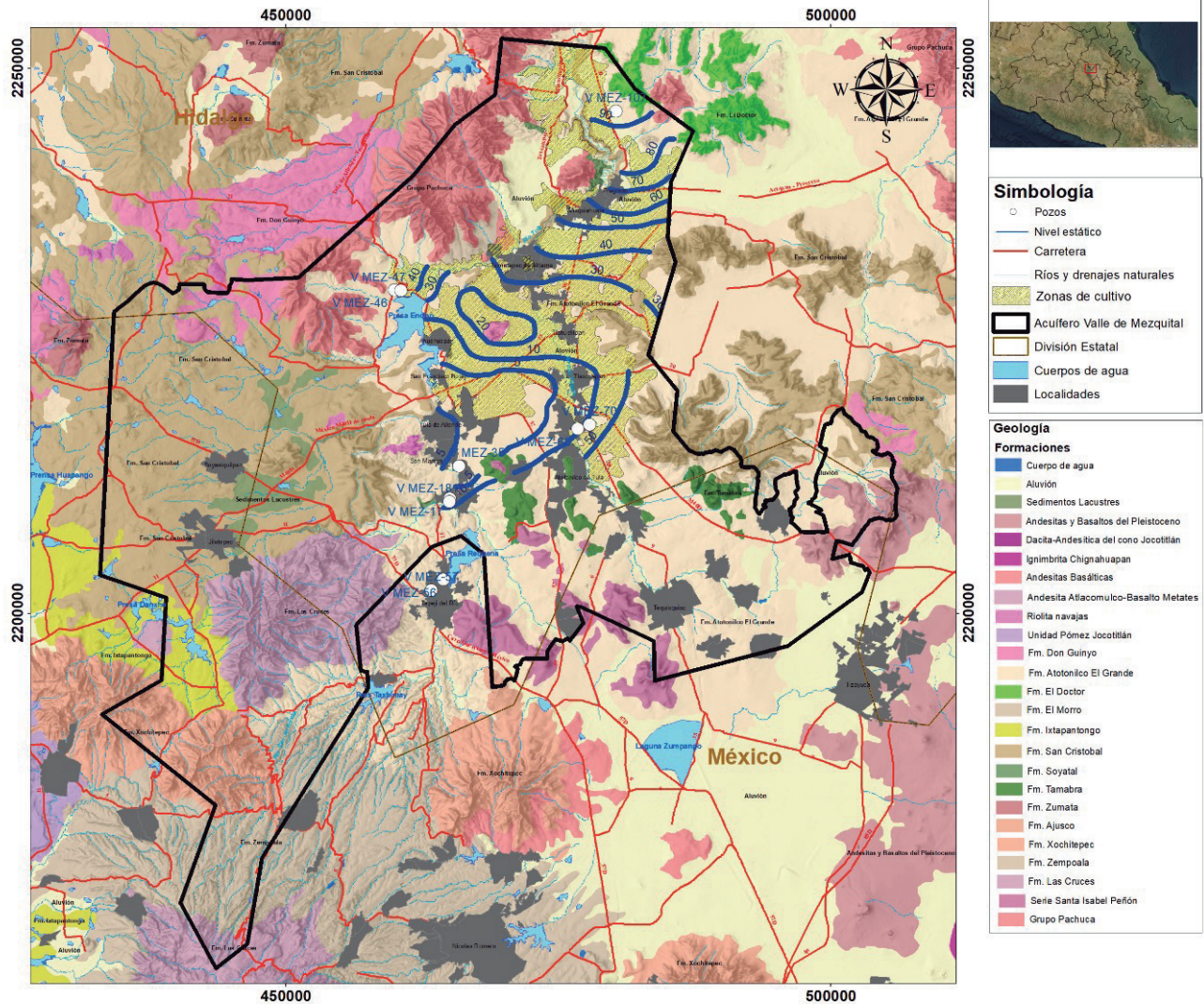


Figura 4.6. Profundidad al nivel estático (m) 2020

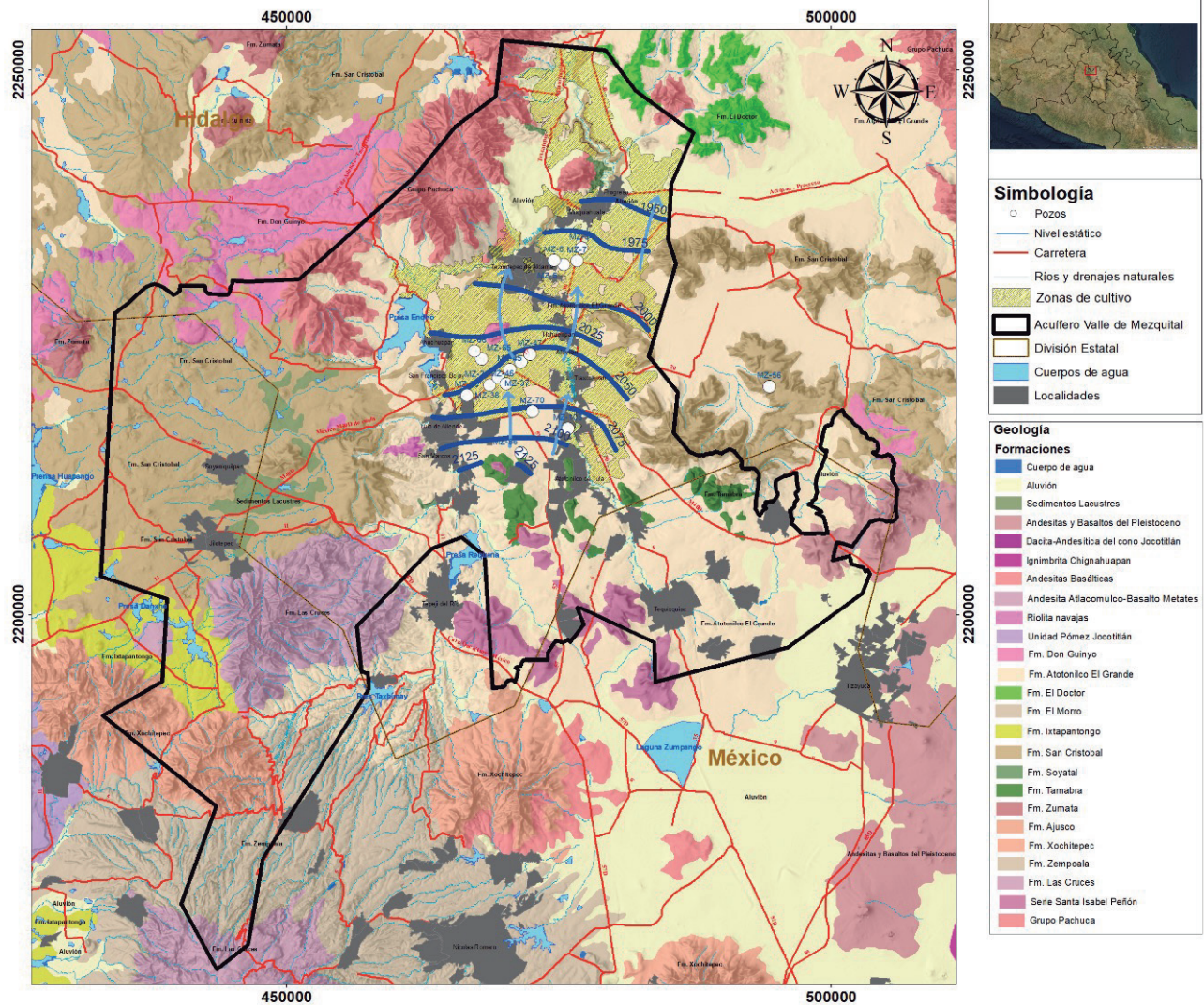


Figura 4.7. Elevación del nivel estático (msnm) 2000

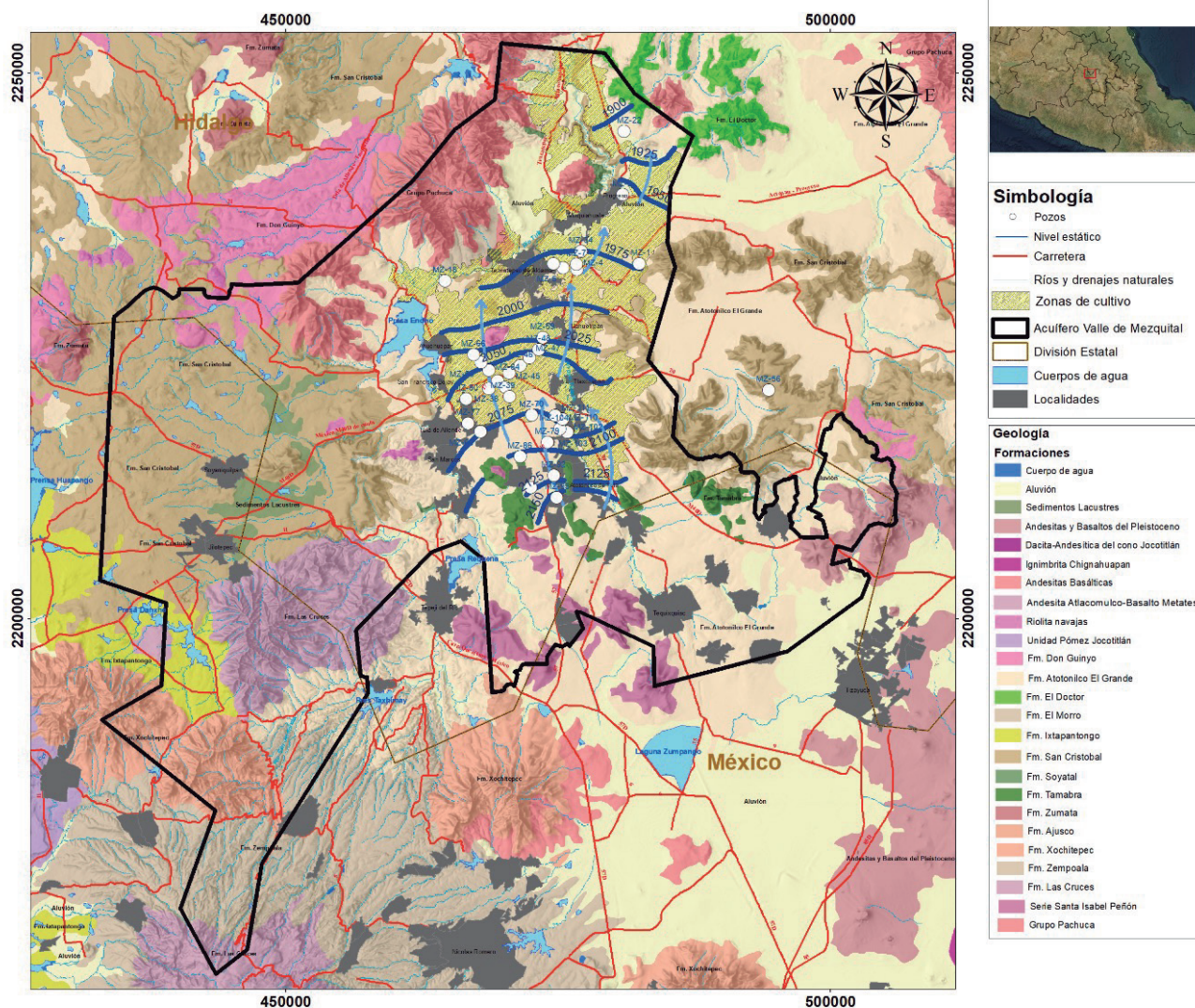


Figura 4.8. Elevación del nivel estático (msnm) 2007



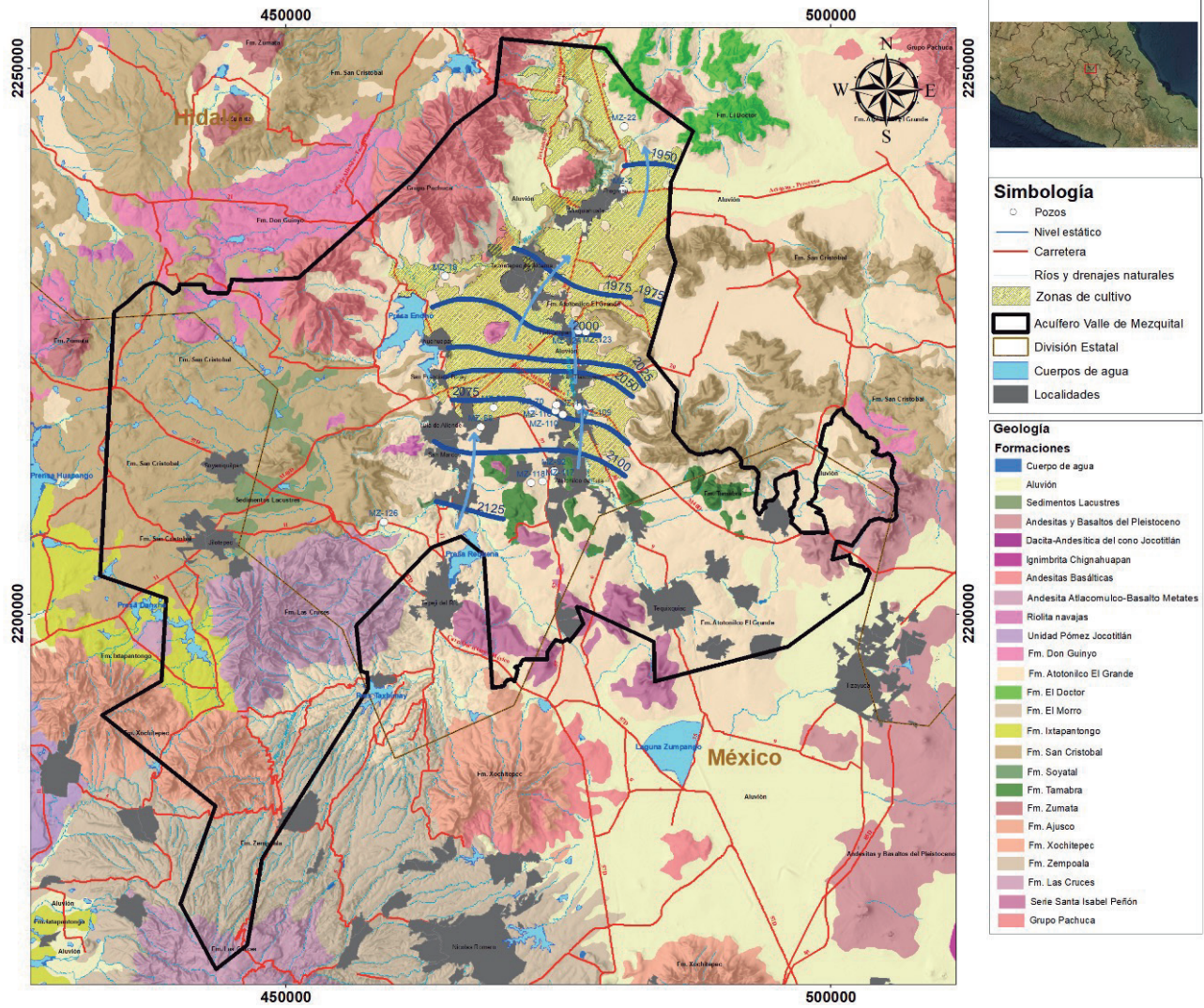


Figura 4.9. Elevación del nivel estático (msnm) 2013

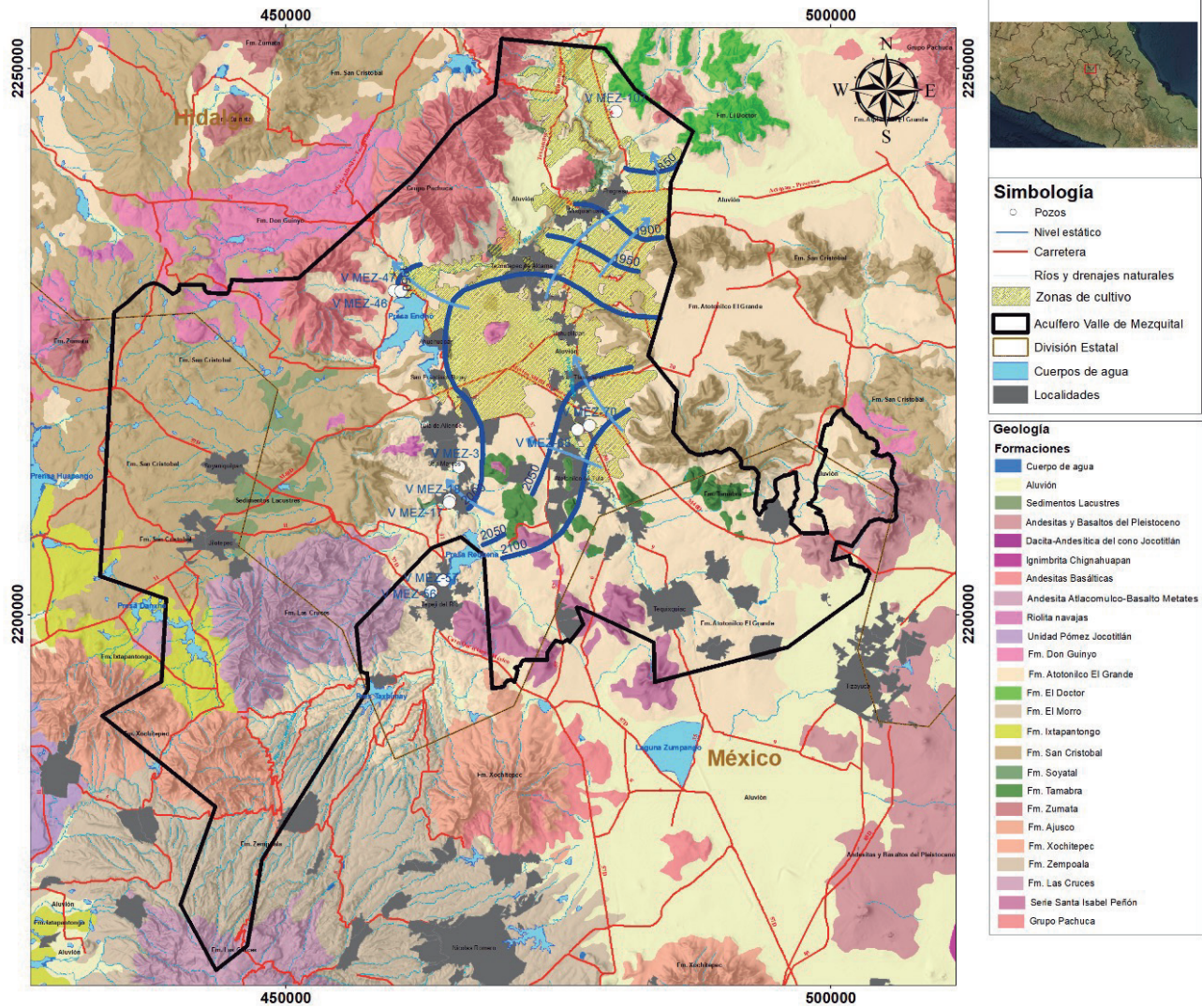


Figura 4.10. Elevación del nivel estático (msnm) 2020

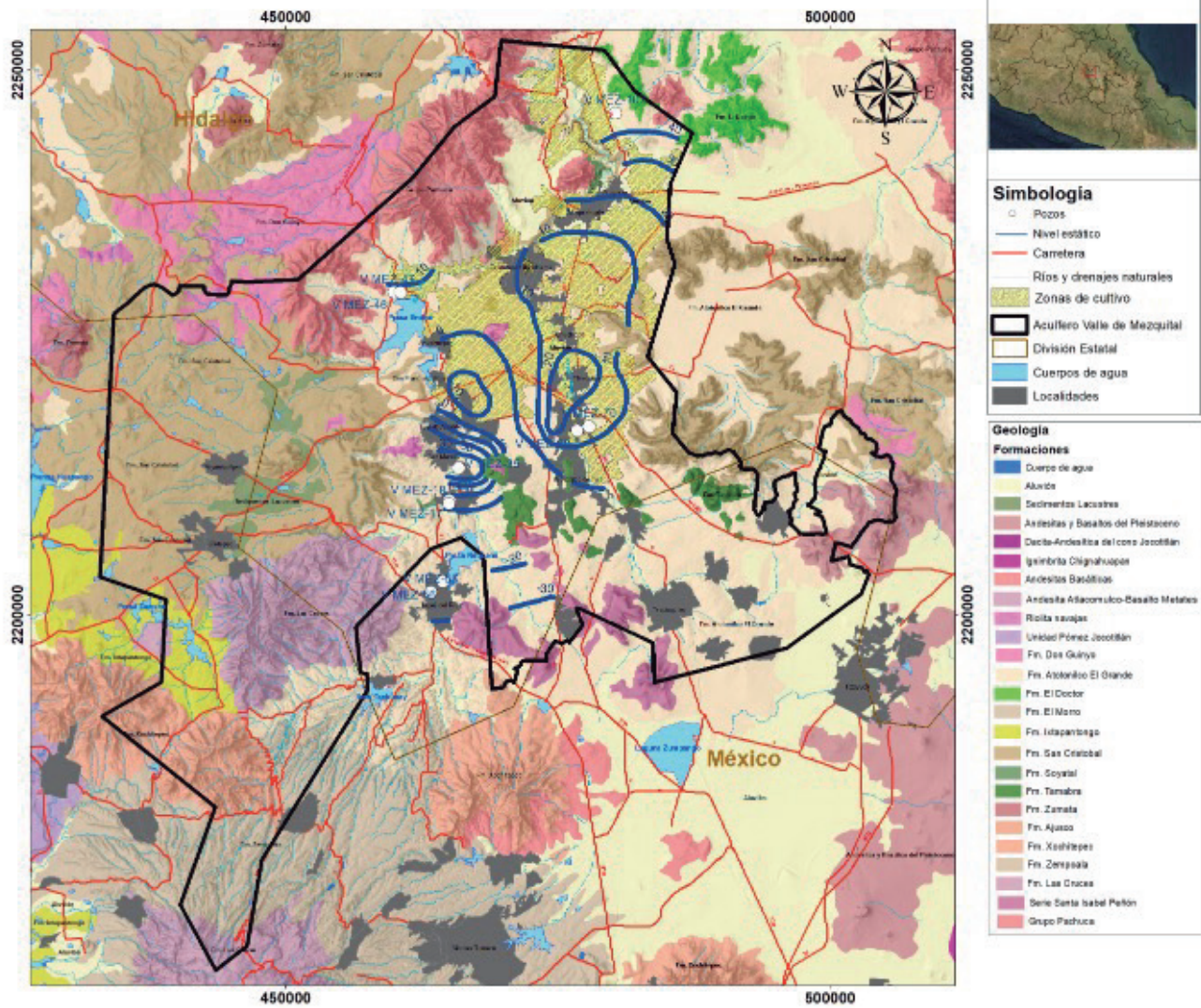
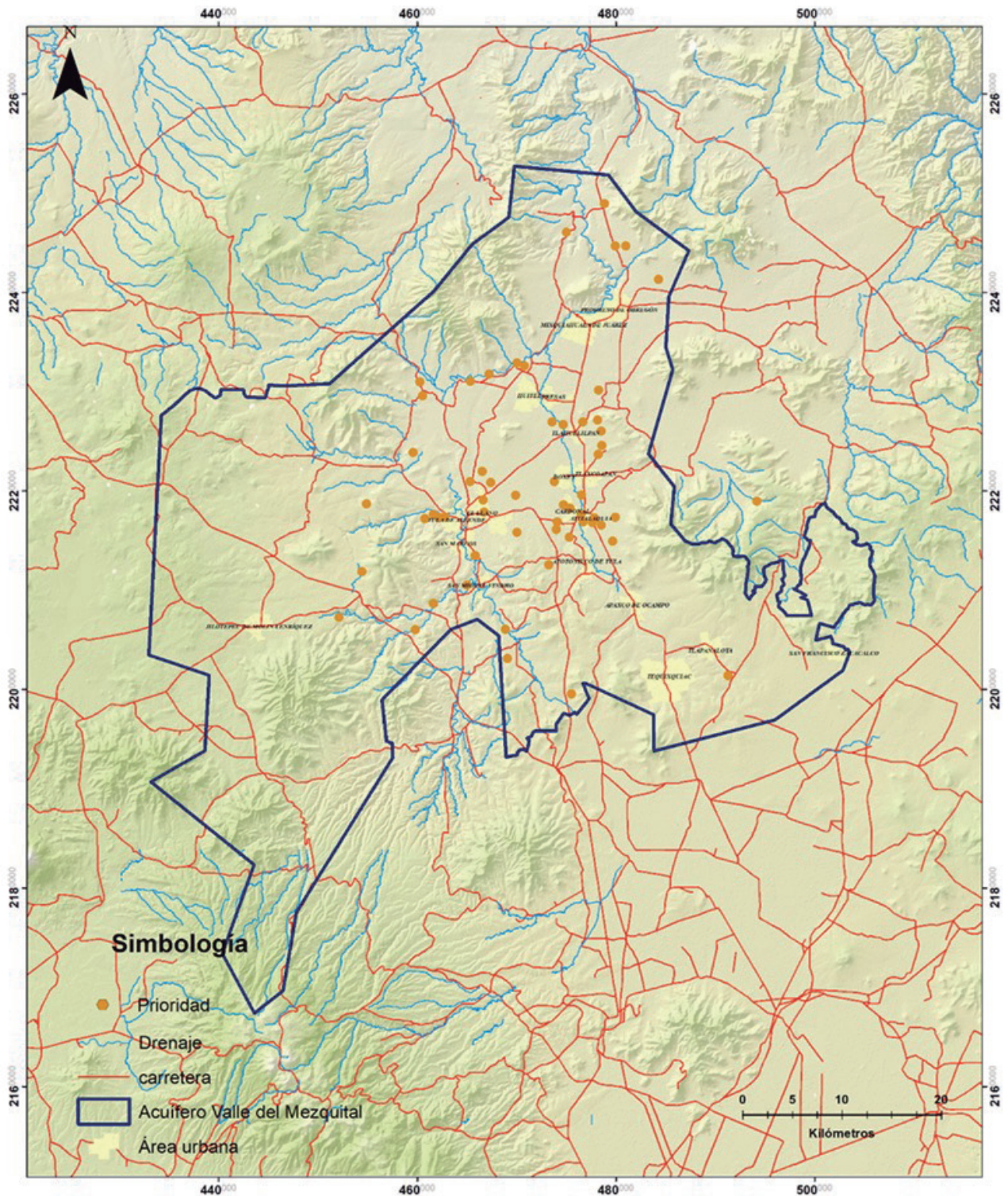


Figura 4.11. Evolución del nivel estático mediante 2000-2020 (m), Valle del Mezquital.



**Figura 4.12.** Ubicación geográfica de sesenta pozos como propuesta para la reactivación de la red de piezométrica en el acuífero del Valle del Mezquital (fuente: elaboración propia con información del IMTA, 2020)

# 5. DETERMINACIÓN DE LA RED DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL MEZQUITAL

## 5.1. Análisis piezométrico histórico

La red de calidad del agua para el acuífero del Valle del Mezquital no se había considerado anteriormente como un componente separado en estudios anteriores. Sin embargo, para este estudio se solicitó identificar aquellos pozos que pudiesen conformar una red que permitiera capturar de manera espacial la posible contribución de la presa Endhó en la calidad del agua subterránea.

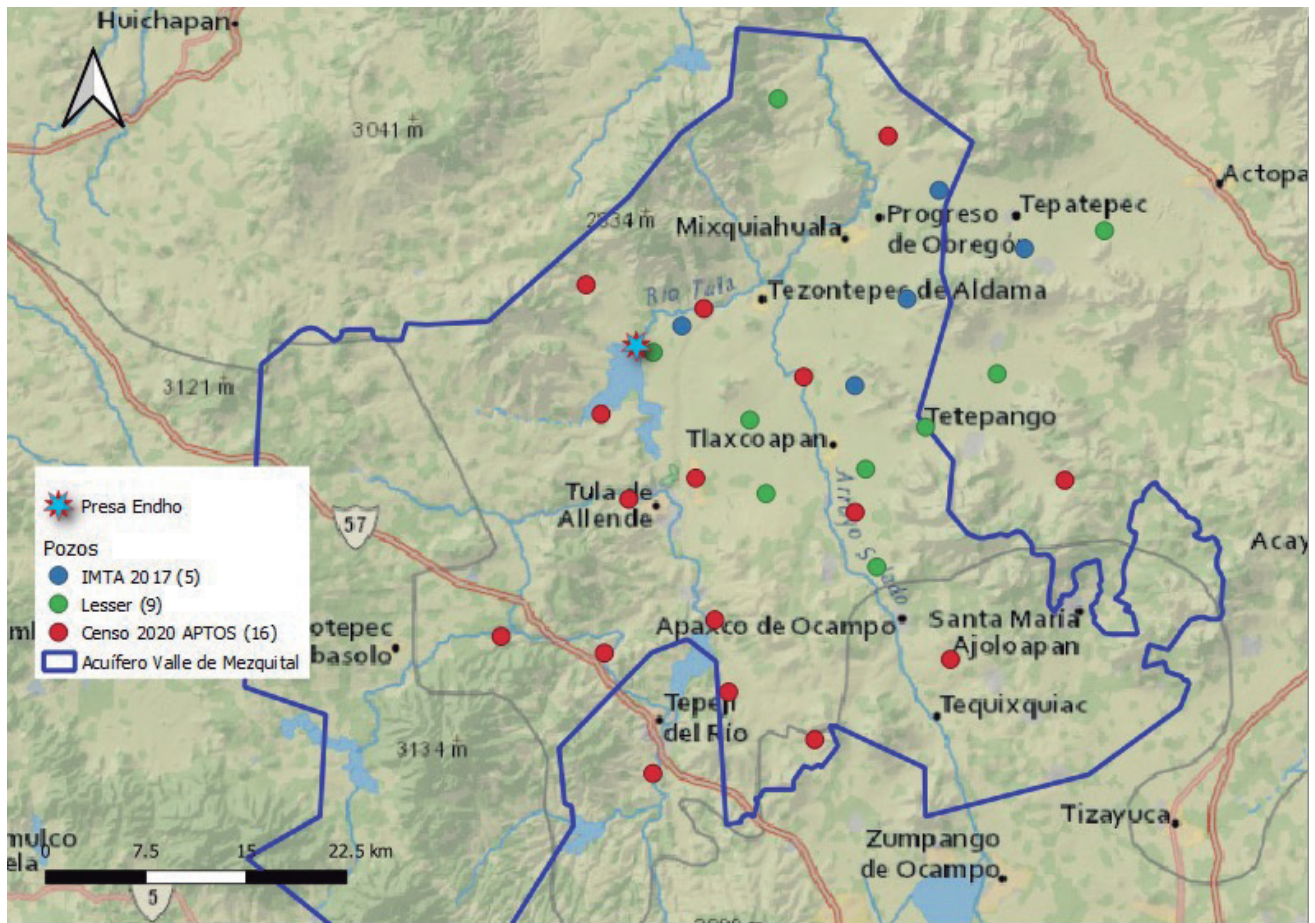
Como estudio previo se puede considerar el estudio desarrollado por el IMTA para los años 2016 y 2017, del cual, a continuación, se hace una breve descripción.

- 1) Planta piloto para la producción de agua potable y libre de contaminantes emergentes a partir del agua subterránea del Valle del Mezquital con base en un sistema de membranas

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua realizó, durante 2016 y 2017, un análisis técnico de los pozos profundos, previamente analizados en el informe IPESA de 2014, para extraer agua del acuífero profundo del Valle del Mezquital. Los resultados indicaron que presenta contaminación por nitratos, sólidos disueltos totales, dureza, sodio, arsénico, además de la presencia de sulfametoxasol (bactericida) y sulfanilamida (antimicótico). Asimismo se detectaron concentraciones elevadas de sílice (>70 mg/L). Por último, se seleccionaron tres pozos con el mayor grado de contaminación o presencia de especies químicas que limitan el aprovechamiento de la tecnología de filtración mediante membranas.

## 5.2. Diseño de la red de calidad del agua

En la figura 4.14 se presenta la propuesta de treinta pozos para la reactivación de la red de calidad del agua del acuífero del Valle del Mezquital. En la Tabla 5.1, Tabla 5.2 y Tabla 5.3 se presentan las respectivas coordenadas de los pozos del censo 2020; del informe de Lesser (2016) e IMTA (2013). Se seleccionaron los treinta pozos de la red de calidad del agua de la mejor manera la distribución espacial de la zona y que pudiese tomar la muestra de agua (Figura 5.1).



**Figura 5.1.** Ubicación geográfica de treinta pozos como propuesta para la reactivación de la red de calidad del agua en el acuífero del Valle del Mezquital (fuente: elaboración propia con información del IMTA, 2017; Lesser, 2013)

**Tabla 5.1.** Selección de pozos a partir del censo del 2020

ID	No.	TIPO	LUGAR	MUNICIPIO	ESTADO	PROPIETARIO	LATITUD	LONGITUD
1	V MEZ-7A	POZO	NANZHA	TULA	HIDALGO	MUNICIPIO	20° 03' 15.8094" N	99° 22' 00.1441" W
2	V MEZ-1	POZO	SAYULA	TEPETITLAN	HIDALGO	MUNICIPIO	20° 11' 57" N	99° 23' 51" W
3	V MEZ-33	NORIA	RANCHERÍA LAREDO	TEQUIXQUIAC	EDO. MEX.	INDEPENDIENTE	19° 56' 47.448" N	99° 08' 12.49" W
4	V MEZ-10	POZO	SANTA MARIA MICHIMALTONGO	TULA	HIDALGO	MUNICIPIO	20° 06' 42.7590" N	99° 23' 11.9519" W
5	V MEZ-103	MANANTIAL	EL BANCO	TEPEJI DEL RIO	HIDALGO	MUNICIPIO	19° 57' 41.4" N	99° 27' 27.3240" W
6	V MEZ-95	POZO	PASEOS DE LA PRADERA	ATOTONILCO	HIDALGO	MUNICIPIO	19° 53' 32" N	99° 14' 01" W
7	V MEZ-109	GALERIA	TEZONTEPEC	TEZONTEPEC	HIDALGO	MUNICIPIO	20° 10' 59.75" N	99° 18' 47.95" W
8	V MEZ-106	POZO	XOCHITLAN	PROGRESO	HIDALGO	MUNICIPIO	20° 17' 59.74" N	99° 10' 54.16" W
9	V MEZ-71	POZO	LA RANFLA	ATITALAQUIA	HIDALGO	MUNICIPIO	20° 04' 3.177" N	99° 3' 18.7287" W
10	V MEZ-64	POZO	SANTA ANA	TEPEJI DEL RIO	HIDALGO	MUNICIPIO	19° 57' 01.6452" N	99° 23' 01.9284" W
11	V MEZ-90	POZO	SAN JOSE AJOCULCO	ATOTONILCO	HIDALGO	MUNICIPIO	19° 58' 23" N	99° 18' 18" W
12	V MEZ-85	POZO	BOJAY 2	ATITALAQUIA	HIDALGO	MUNICIPIO	20° 02' 45" N	99° 12' 18" W
13	V MEZ-49	POZO	COL. CUAHUTEMOC	TLAHUELILPAN	HIDALGO	CONCESIÓN CFE A TLAHUELILPAN	20° 08' 14.0183" N	99° 14' 30.7881" W
14	V MEZ-41	POZO	EL LLANO #20	TULA	HIDALGO	COMUNAL	20° 04' 7.3068" N	99° 19' 7.8293" W
15	V MEZ-59	POZO	DOS PEÑAS	TEPEJI DEL RIO	HIDALGO	MUNICIPIO	19° 55' 27.5520" N	99° 17' 42.5148" W
16	V MEZ-54	POZO	SANTIAGO TLAPANOLOYA 2	TEPEJI DEL RIO	HIDALGO	MUNICIPIO	19° 52' 9.0152" N	99° 20' 56.49" W

**Tabla 5.2.** Selección de pozos a partir del informe Lesser, 2016

ID	Nombre	TIPO	LUGAR	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	PROPIETARIO	FECHA
17	MZ-21	POZO	SAN ISIDRO	MIXQUIAHUALA	20° 09' 13" N	99° 20' 58" W	EL MUNICIPIO	06/12/2007
18	MZ-424	NORIA			20° 06' 29" N	99° 16' 49" W	SIN INFORMES	21/02/2008
19	MZ-27	POZO			20° 19' 30" N	99° 15' 38" W		07/12/2007
20	IN-4	POZO	EL ROSARIO	FCO. I. MADERO	20° 14' 10" N	99° 01' 37" W	EL PUEBLO	21/10/2008
21	MZ-326	POZO	EL REFUGIO	ATOTONILCO	20° 00' 32" N	99° 11' 22" W	LA COMUNIDAD	28/01/2008
22	MZ-312	POZO	TLAXCOAPAN	TLAXCOAPAN	20° 04' 30" N	99° 11' 51" W		24/01/2008
23	AJ-1	POZO	TETEPANGO	TETEPANGO	20° 06' 12" N	99° 09' 17" W	LA COMUNIDAD	04/12/2007
24	MZ-3B	Manantial	PROGRESO		20° 03' 30" N	99° 16' 07" W	BAÑO GRANDE	
25	AJ-12	POZO	EJIDO DE AJACUBA	AJACUBA	20° 08' 22" N	99° 06' 13" W	AGUA POTABLE Y ALCANT.	06/12/2007

**Tabla 5.3.** Selección de pozos a partir del informe IMTA, 2013

ID	Pozo	Municipio	Latitud	Longitud	Profundidad	Propietario
26	IN-13-BIS	San Salvador	20° 10' 17.50" N	99° 19' 44.40" W	200	CAAMSSH
27	MZ-1	Mixquiahuala	20° 11' 24.00" N	99° 10' 5.00" W	200	CAAMM
28	MZ-301	Tlahuelilpan	20° 7' 53.00" N	99° 12' 19.00" W	197	Comunidad
29	FIP-183-BIS	Mixquiahuala	20° 15' 48.00" N	99° 8' 42.70" W	200	Comunidad
30	FIP-176	Fco. y Madero	20° 13' 26.10" N	99° 5' 2.90" W	200	CAASVAM





## 6. NIVELACIÓN DE BROCALES

Se determinaron las elevaciones de los brocales con respecto del nivel medio del mar, punto de medición y terreno natural de la red de monitoreo piezométrico del acuífero del Valle del Mezquital. Para ello se revisó la red de cien pozos proporcionados por el cliente del año 2020.

Con las técnicas y equipos empleados en este proceso se obtuvieron las mediciones que permitirán tener una base lo suficientemente confiable para futuras mediciones, ya el control vertical y horizontal se hizo con referencia al Sistema Geodésico Nacional.

En cuanto a los antecedentes y localización a través del producto ya obtenido, de acuerdo con este proceso, nos permitieron detectar sus futuras variaciones físicas; monitorear las diferencias que se puedan presentar y obtener una estadística del comportamiento físico del acuífero.

### 6.1. Metodología

Como primera actividad se realizaron los recorridos de campo para verificar las condiciones de los pozos de la red. Las elevaciones obtenidas están referidas a bancos de nivel de elevaciones conocidas, establecidas por el Inegi, para lo cual se ligaron las bases de GPS a los bancos Inegi, así como entre ellas. Las coordenadas obtenidas se concentraron en tablas en las que se indican las observaciones pertinentes.

El levantamiento de los puntos se realizó considerando dos bases topográficas activas de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA). La estación que se consideró es la IHID, que se localiza en la ciudad de Pachuca, con coordenadas  $20^{\circ} 06' 53.62216''$ ,  $98^{\circ} 44' 17.77306''$ , y elevación de 2390.334 msnm. Para el levantamiento se utilizó un GPS con las características siguientes:



**Figura 3.1.** Banco de apoyo



## Instrumento utilizado:

Marca: Sokkia GRX2.

Frecuencias: doble frecuencia L1 y L2.

Gps/Glonas, soporta L2C.

Canales: 72.

Precisión Estático: +/- (3+0.5ppm) mm.

El levantamiento de las coordenadas X, Y, Z de los sesenta pozos se inició de acuerdo con la selección previa mediante recorridos de campo para establecer la red piezométrica con los pozos distribuidos en el acuífero.

A los datos levantados de cada pozo se les realizó un post-proceso, ya que los datos crudos se tomaron en formato tipo Rinex. El procesamiento de los datos se realizó con el *software* Magnet Tools. Versión: 4.3.1.0 con parámetros de calidad menores a los 0.05 m, por lo cual el punto tiene una precisión de  $\pm 5$  cm.

En la Tabla 6.1 se muestra la relación de pozos nivelados y las coordenadas X, Y, Z obtenidas.

## 6.2. Brocales nivelados

Tabla 6.1. Red de monitoreo piezométrica y brocales nivelados

ID	No.	TIPO	LUGAR	MUNICI.	EDO.	LATITUD (Y)	LONGITUD (X)	Elevación del brocal (NIVELADO, Z)
10	V MEZ-8	POZO	LA LOMA	XOCHITLA	HIDALGO	20° 03' 53.4312" N	99° 25' 52.6087" W	2290.443
71	V MEZ-71	POZO	LA RANFLA	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 04' 3.177" N	99° 3' 18.7287" W	2281.165
36	V MEZ-34	NORIA	RANCHERÍA LAREDO	TEQUIXQUIAC	EDO. MEX.	19° 56' 55.372" N	99° 08' 29.153" W	2256.389
35	V MEZ-33	NORIA	RANCHERÍA LAREDO	TEQUIXQUIAC	EDO. MEX.	19° 56' 47.448" N	99° 08' 12.49" W	2249.345
11	V MEZ-9	POZO	SAN MIGUEL DE LAS PIEDRAS	TULA	HIDALGO	20° 06' 0.44424" N	99° 27' 19.204" W	2219.763
32	V MEZ-30	CARCAMO	TLAPANALOYA	TEQUIXQUIAC	EDO. MEX.	19° 55' 56.215" N	99° 07' 5.72" W	2219.477
46	V MEZ-44	POZO	ESTACIÓN ZAYULA	TEPETITLAN	HIDALGO	20° 13' 9.1499" N	99° 26' 24.435" W	2219.578
33	V MEZ-31	POZO	TEQUIXQUIAC	TEQUIXQUIAC	EDO. MEX.	19° 54' 59.423" N	99° 08' 33.12" W	2205.456
45	V MEZ-43	POZO	PINO SUAREZ	TEPETITLAN	HIDALGO	20° 14' 42.5342" N	99° 25' 36.11" W	2169.654
54	V MEZ-53	POZO	SANTIAGO TLAPANOLOYA 1	TEPEJI DEL RÍO	HIDALGO	19° 51' 47.471" N	99° 20' 59.389" W	2142.133
56	V MEZ-54	POZO	SANTIAGO TLAPANOLOYA 2	TEPEJI DEL RÍO	HIDALGO	19° 52' 9.0152" N	99° 20' 56.49" W	2139.591
67	V MEZ-66	POZO	CAMINO A LA CANTERA	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 03' 11.174" N	99° 11' 29.178" W	2136.634
78	V MEZ-76	POZO	BOJAY	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 2' 30.9526" N	99° 14' 53.9162" W	2135.598
59	V MEZ-57	POZO	NOXTONGO	TEPEJI DEL RÍO	HIDALGO	19° 54' 54.137" N	99° 21' 1.393" W	2133.821
57	V MEZ-55	POZO	BARRACAS	TEPEJI DEL RÍO	HIDALGO	19° 52' 42.548" N	99° 20' 53.098" W	2132.193
58	V MEZ-56	POZO	TLAXNICALPAN	TEPEJI DEL RÍO	HIDALGO	19° 55' 25.381" N	99° 20' 22.294" W	2119.788
69	V MEZ-69	POZO	TABLON	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 02' 53.07" N	99° 12' 49.298" W	2119.371
77	V MEZ-76B	POZO	18 DE MARZO	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 03' 10.954" N	99° 14' 16.332" W	2106.793

**Tabla 6.1** Red de monitoreo piezométrica y brocales nivelados (Continuación)

ID	No.	TIPO	LUGAR	MUNICI.	EDO.	LATITUD (Y)	LONGITUD (X)	Elevación del brocal (NIVELADO, Z)
79	V MEZ-77	POZO	TLAMACO	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 02' 9.4718" N	99° 14' 9.9582" W	2106.546
75	V MEZ-75	POZO	CARDONAL	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 03' 19.23" N	99° 13' 57.918" W	2104.117
76	V MEZ-75A	POZO	CARDONAL	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 03' 1.486" N	99° 13' 51.589" W	2103.904
80	V MEZ-78	POZO	TLAMACO	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 02' 4.79" N	99° 14' 8.90" W	2103.865
68	V MEZ-67	POZO	TEZOQUIPA	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 03' 30.23" N	99° 12' 29.16" W	2102.391
23	V MEZ-21	POZO	MUNITEPEC DE MADERO	TLAHUELILPAN	HIDALGO	20° 07' 53.66" N	99° 12' 19.031" W	2101.287
70	V MEZ-70	NORIA	COL. ATLANTES	HUEYPOXTLA	HIDALGO	20° 03' 9.021" N	99° 12' 42.73" W	2101.198
2	V MEZ-2	POZO	SAYULA	TEPETITLAN	HIDALGO	20° 12' 42" N	99° 23' 59" W	2100.224
73	V MEZ-73	POZO	COL. DENDHÓ	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 03' 51.2233" N	99° 14' 29.142" W	2099.861
72	V MEZ-72	POZO	DENDHÓ	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 03' 40.099" N	99° 14' 6.568" W	2094.916
16	V MEZ-14	POZO	LLANO 2DA SECCION	TULA	HIDALGO	20° 03' 3.4750" N	99° 18' 25.52" W	2081.834
17	V MEZ-15	POZO	MONTECILLO	TULA	HIDALGO	20° 02' 20.867" N	99° 19' 38.3538" W	2081.145
5	V MEZ-4	POZO	NANZHA	TULA	HIDALGO	20° 03' 05.0836" N	99° 22' 29.5661" W	2080.909
40	V MEZ-38	POZO	SAN LORENZO	TULA	HIDALGO	20° 02' 9.327" N	99° 19' 40.1522" W	2080.781
74	V MEZ-74	POZO	TLALMINULPAN	ATITALAQUIA	HIDALGO	20° 04' 21.008" N	99° 13' 15.975" W	2080.459
25	V MEZ-23	POZO	SAN PRIMITIVO	TLAHUELILPAN	HIDALGO	20° 07' 47.45" N	99° 12' 53.81" W	2079.852
12	V MEZ-10	POZO	SANTA MARIA MICHIMALTONGO	TULA	HIDALGO	20° 06' 42.7590" N	99° 23' 11.9519" W	2067.378
52	V MEZ-51	POZO	TLAHUELILPAN	TLAHUELILPAN	HIDALGO	20° 08' 50.5089" N	99° 13' 6.452" W	2066.542
26	V MEZ-24	POZO	MUNITEPEC DE MADERO	TLAHUELILPAN	HIDALGO	20° 07' 49.87" N	99° 13' 17.63" W	2063.628
18	V MEZ-16	POZO	EX HACIENDA ZARAGOZA	TULA	HIDALGO	20° 01' 6.81" N	99° 19' 32.81" W	2060.274
51	V MEZ-50	POZO	CARR. JUANHDO	TLAHUELILPAN	HIDALGO	20° 08' 23.5712" N	99° 13' 22.752" W	2059.782
37	V MEZ-35	POZO	IGNACIO ZARAGOZA	TULA	HIDALGO	20° 01' 4.9029" N	99° 19' 34.1716" W	2056.931

**Tabla 6.1** Red de monitoreo piezométrica y brocales nivelados (Continuación)

ID	No.	TIPO	LUGAR	MUNICI.	EDO.	LATITUD (Y)	LONGITUD (X)	Elevación del brocal (NIVELADO, Z)
14	V MEZ-12	POZO	SAN FRANCISCO BOJAY	TULA	HIDALGO	20° 05' 7.160" N	99° 19' 53.0218" W	2054.772
7	V MEZ-6	POZO	NANZHA	TULA	HIDALGO	20° 03' 19.3684" N	99° 22' 00.1441" W	2053.747
20	V MEZ-18	POZO	SANTA MARIA LUCAN	TULA	HIDALGO	19° 59' 18.19" N	99° 20' 5.27" W	2053.884
1	V MEZ-1	POZO	SAYULA	TEPETITLÁN	HIDALGO	20° 11' 57" N	99° 23' 51" W	2050.632
19	V MEZ-17	POZO	SANTA MARÍA LUCAN	TULA	HIDALGO	19° 59' 27.2" N	99° 20' 2.50" W	2049.378
8	V MEZ-7	POZO	NANZHA	TULA	HIDALGO	20° 03' 15.8094" N	99° 22' 00.1441" W	2048.288
48	V MEZ-46	POZO	LA LOMA	TEPETITLÁN	HIDALGO	20° 09' 50.487" N	99° 23' 0.0297" W	2042.865
39	V MEZ-37	MANATIAL	COLONIAL 61 Y 62	TULA	HIDALGO	20° 01' 1.2580" N	99° 19' 38.076" W	2040.574
50	V MEZ-49	POZO	COL. CUAHUTEMOC	TLAHUELILPAN	HIDALGO	20° 08' 14.0183" N	99° 14' 30.7881" W	2038.851
3	V MEZ-3	POZO	NANZHA	TULA	HIDALGO	20° 03' 11.0520" N	99° 21' 20.8346" W	2037.114
49	V MEZ-47	POZO	LA HERMITA	TEPETITLÁN	HIDALGO	20° 09' 48.388" N	99° 22' 38.68" W	2035.478
22	V MEZ-20	POZO	CENTRO DE TULA	TULA	HIDALGO	20° 03' 22.54" N	99° 20' 04.34" W	2029.983
111	V MEZ-109	GALERIA	TEZONTEPEC	TEZONTEPEC	HIDALGO	20° 10' 59.75" N	99° 18' 47.95" W	2027.873
114	V MEZ-112	POZO	VINOLA	TEZONTEPEC	HIDALGO	20° 10' 46.65" N	99° 20' 28.52" W	2019.639
115	V MEZ-113	POZO	EL CHAMIZAL	TEZONTEPEC	HIDALGO	20° 09' 41.22" N	99° 19' 32.84" W	2010.293
47	V MEZ-45	POZO	TEPETITLAN	TEPETITLÁN	HIDALGO	20° 10' 33.62" N	99° 22' 47.5612" W	2008.375
108	V MEZ-105	POZO	PROGRESO	PROGRESO	HIDALGO	19° 14' 50.74" N	99° 10' 57.37" W	1998.902
112	V MEZ-110	POZO	ATENGO	TEZONTEPEC	HIDALGO	20° 10' 17.73" N	99° 19' 44.034" W	1990.811
109	V MEZ-106	POZO	XOCHITLÁN	PROGRESO	HIDALGO	20° 17' 59.74" N	99° 10' 54.16" W	1964.265
53	V MEZ-52	POZO	ARJAS	TEPEJI DEL RÍO	HIDALGO	20° 53' 43.473	99° 21' 55.324" W	1422.674



# 7. EVOLUCIÓN DE LOS DATOS HISTÓRICOS HIDROGEOQUÍMICOS

## 7.1. Compilación de información

Se conformo una base de datos con la información con los parámetros fisicoquímicos, iones mayores y elementos traza de los muestreos en aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el acuífero del Valle del Mezquital, acorde con la Comisión Nacional del Agua (Conagua) de los años 2012-2019 y del monitoreo de 2022 (Anexo 7.1). En la siguiente tabla se presenta la lista de los aprovechamientos incluidos en el análisis histórico.

## 7.2. Determinación de las familias de agua

Esta etapa consistió en el análisis de la evolución de las familias de agua que incluye: cálculo del error, la clasificación de las familias de agua. En la Tabla 7.1 se enlistan los pozos considerados para el análisis histórico y sus coordenadas.

**Tabla 7.1.** Aprovechamientos considerados para el análisis histórico de hidrogeoquímico y calidad del agua.

Latitud	Longitud	Clave	Aprovechamiento	Año con datos
20.12033	-99.26236	DLHID1 <sub>4</sub> 32	MANANTIAL CERRO COLORADO	2012, 2013, 201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018,2019
20.08506	-99.2 <sub>4</sub> 5 <sub>4</sub> 9	DLHID1 <sub>4</sub> 33	POZO DOXEY	2012, 2013, 201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018,2019
20.05312	-99.23755	DLHID1 <sub>4</sub> 3 <sub>4</sub>	POZO EL 18 DE MARZO	2013, 201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018,2019
20.0 <sub>4</sub> 815	-99.21365	DLHID1 <sub>4</sub> 36	POZO EL TABLÓN	2012, 2013, 201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018,2019
20.00875	-99.18962	DLHID1 <sub>4</sub> 37	POZO EL REFUGIO	2012, 2013, 201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018,
20.0169 <sub>4</sub>	-99.32728	DLHID1 <sub>44</sub> 1	MANANTIAL DAMU	2012, 2013, 201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018
20.1635	-99.37739	DLHID1 <sub>4</sub> 59	POZO EL TORREÓN	2012, 2013, 201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018
20.00932	-99.26809	DLHID1 <sub>4</sub> 60	POZO EL BOSQUE II	2013
20.00932	-99.26809	DLHID1 <sub>4</sub> 60M1	POZO BOXFI	201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018
20.19098	-99.27902	DLHID1 <sub>4</sub> 61	MANANTIAL TEZONTEPEC	2013, 201 <sub>4</sub> , 2015, 2016, 2018,2019
20.1119	-99.386 <sub>4</sub> 6	DLHID1 <sub>4</sub> 86M1	POZO MICHIMALTONGO	2018
20.0 <sub>4</sub> 9 <sub>44</sub>	-99.208888	DLHID5399	SAN JOSE BOJAY	2017, 2018, 2019
20.06 <sub>4</sub> 87	-99. <sub>4</sub> 31302	DLHID61 <sub>4</sub> 6	XOCHITLÁN	2019
20.09985	-99. <sub>4</sub> 55 <sub>4</sub> 27	DLHID61 <sub>4</sub> 5	EL CHABACANO	2019
20.05097	-99.307055	DLHID6 <sub>4</sub> 5 <sub>4</sub>	POZO EL LLANO SEGUNDA SECCIÓN	2019,
20.077911	-99.31986	DLHID6 <sub>4</sub> 57	POZO ITURBE	2019
20.08521	-99.331 <sub>4</sub> 7	DLHID6 <sub>4</sub> 58	POZO SAN FRANCISCO BOJAY COLONIA	2019,
20.11187	-99.3865083	DLHID6 <sub>4</sub> 59	POZO MICHIMALTONGO	2019,
20.12 <sub>4</sub> 50	-99.3 <sub>4</sub> 97361	DLHID6 <sub>4</sub> 61	POZO SANTA ANA AHUEHUEPAN	2019
20.1325	-99.383055	DLHID6 <sub>4</sub> 63	POZO SANTA MARÍA DAXTHO	2019
20.15382	-99.3 <sub>4</sub> 955	DLHID6 <sub>4</sub> 67	POZO PEDRO MARÍA ANAYA	2019





**Tabla 7.2.** Aprovechamientos considerados para el análisis de familias de agua 2022.

Latitud	Longitud	Clave	Aprovechamiento
20° 03' 15.809 <sub>4</sub> " N	99° 22' 00.1 <sub>44</sub> 1" W	V MEZ-7A	Nanzha
20° 11' 57" N	99° 23' 51" W	V MEZ-1	
19° 56' 7.4 <sub>44</sub> 8" N	99° 08' 12.4 <sub>9</sub> " W	V MEZ-33	Noria
20° 06' 2.7590" N	99° 23' 11.9519" W	V MEZ-10	Santa María Michimalton
19° 57' 1.4 <sub>4</sub> " N	99° 27' 27.32 <sub>0</sub> 0" W	V MEZ-103	Manantial El Banco
19° 53' 32" N	99° 1' 01" W	V MEZ-95	Paseos de la pradera
20° 10' 59.75" N	99° 18' 7.95" W	V MEZ-109	Galería Tezontepec
20° 17' 59.7 <sub>4</sub> " N	99° 10' 5.4 <sub>16</sub> " W	V MEZ-106	Xochitlán
20° 0' 3.177" N	99° 3' 18.7287" W	V MEZ-71	
19° 57' 01.6 <sub>4</sub> 52" N	99° 23' 01.928 <sub>4</sub> " W	V MEZ-6 <sub>4</sub>	Santa Ana
19° 58' 23" N	99° 18' 18" W	V MEZ-90	San José Ajoculco
20° 02' 4 <sub>5</sub> " N	99° 12' 18" W	V MEZ-85	Bojay 2
20° 08' 1.4 <sub>0183</sub> " N	99° 1' 30.7881" W	V MEZ-4 <sub>9</sub>	Col. Cuahutemoc
20° 0' 7.3068" N	99° 19' 7.8293" W	V MEZ-4 <sub>1</sub>	
19° 55' 27.5520" N	99° 17' 2.51 <sub>4</sub> 8" W	V MEZ-59	Dos Peñas
19° 52' 9.0152" N	99° 20' 56.4 <sub>9</sub> " W	V MEZ-5 <sub>4</sub>	
20° 09' 13" N	99° 20' 58" W	MZ-21	
20° 06' 29" N	99° 16' 4 <sub>9</sub> " W	MZ-4 <sub>24</sub>	
20° 19' 30" N	99° 15' 38" W	MZ-27	
20° 1' 10" N	99° 01' 37" W	IN-4	
20° 00' 32" N	99° 11' 22" W	MZ-326	El Refugio
20° 0' 4 <sub>30</sub> " N	99° 11' 51" W	MZ-312	Tlaxcoapan
20° 06' 12" N	99° 09' 17" W	AJ-1	
20° 03' 30" N	99° 16' 07" W	MZ-3B	Manantial Progreso
20° 08' 22" N	99° 06' 13" W	AJ-12	
20° 10' 17.50" N	99° 19' 44 <sub>4</sub> 0" W	IN-13-BIS	
20° 11' 2.4 <sub>00</sub> " N	99° 10' 5.00" W	MZ-1	
20° 7' 53.00" N	99° 12' 19.00" W	MZ-301	
20° 15' 4 <sub>8.00</sub> " N	99° 8' 2.70" W	FIP-183-BIS	
20° 13' 26.10" N	99° 5' 2.90" W	FIP-176	

### 7.3. Cálculo del error

Como parte del análisis hidrogeoquímico y para dar veracidad a los datos químicos de los pozos muestreados, se realizó el cálculo del error de balance de cargas, que se calcula como se indica en la siguiente ecuación (Alley, 1993):

$$\% \text{ error} = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} \times 100$$

El error calculado en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital se considera aceptable ya que en todos los casos estuvo entre  $\pm 5\%$  lo cual indica confiabilidad y verosimilitud en la información analizada.

### 7.4. Determinación de familias de agua

Para clasificación de los tipos de agua o facies hidrogeoquímicos se utilizaron los diagramas de Piper utilizando el *software The Geochemist's Workbench* (Aqueous Solutions, 2023) en los datos de los años 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2022 (estiaje y lluvias). En la Figura 7.1 se presenta la clasificación de agua utilizada en un diagrama de Piper.

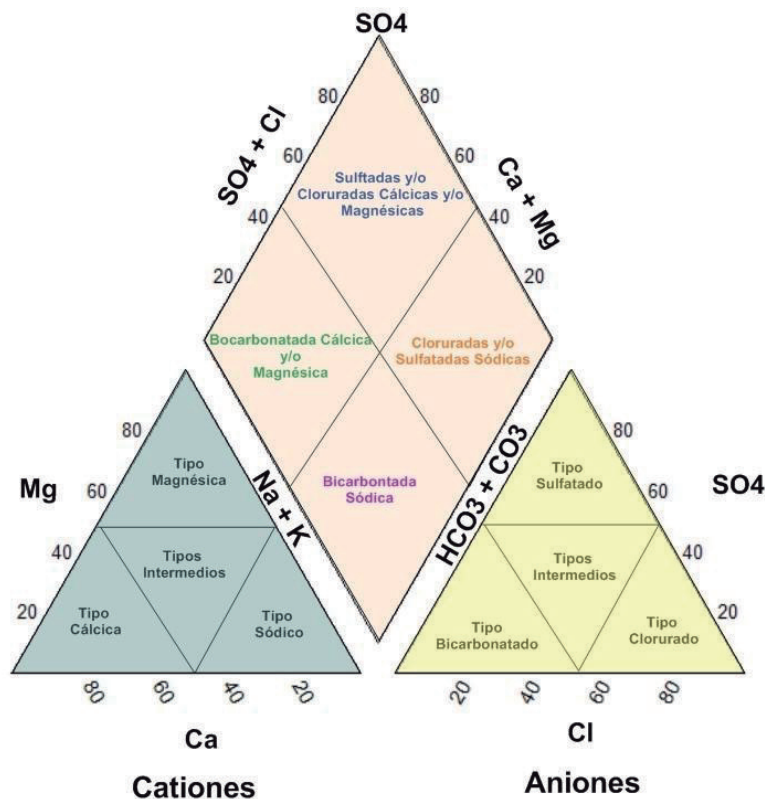


Figura 7.1. Simbología del diagrama de Piper

En la Figura 7.2 a la Figura 7.11 se pueden observar los diagramas de Piper de los años 2012 a 2022 en donde se pueden observar los tipos de agua que se presentan en los aprovechamientos muestreados durante este periodo. En estos diagramas sobresalen siete familias de agua: bicarbonatada cálcica, bicarbonatada sódica, clorurada sódica, sulfatada sódica, sulfatada cálcica, clorurada cálcica y bicarbonatada magnésica.

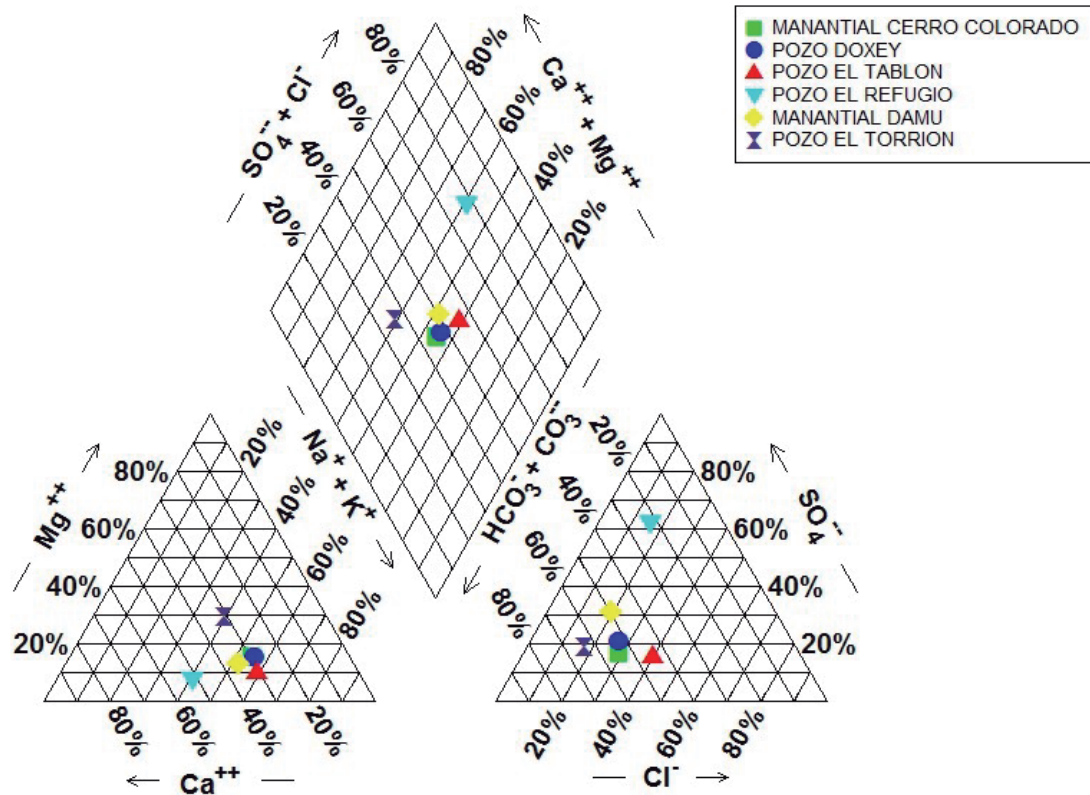


Figura 7.2. Diagrama de Piper del año 2012

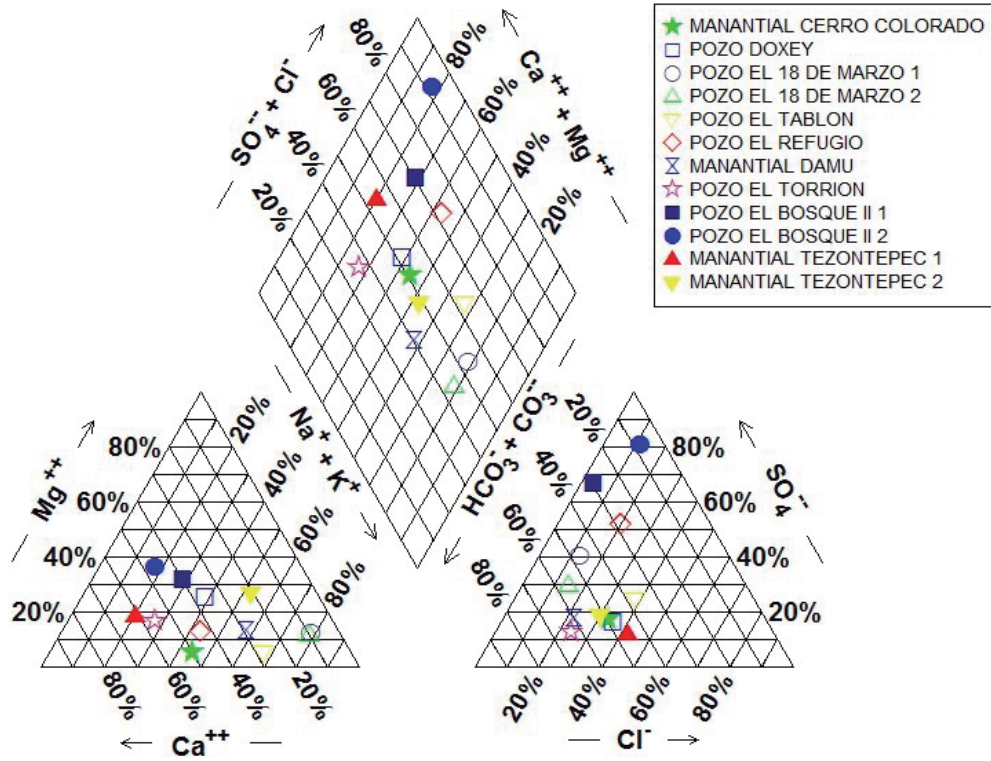


Figura 7.3. Diagrama de Piper del año 2013

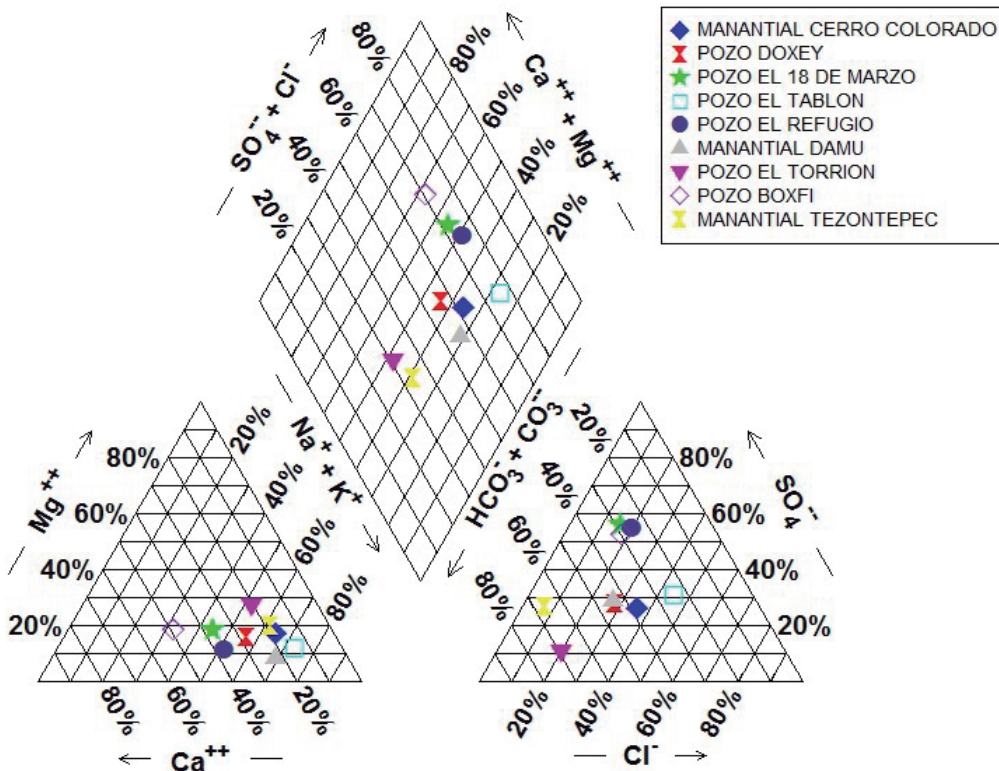


Figura 7.4. Diagrama de Piper del año 2014

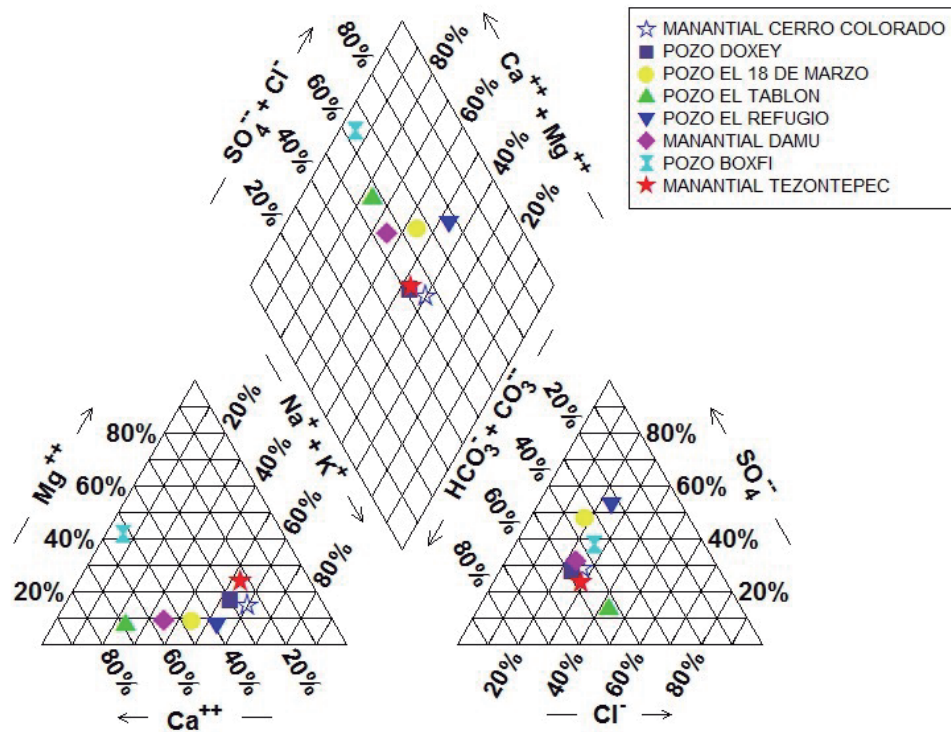


Figura 7.5. Diagrama de Piper del año 2015

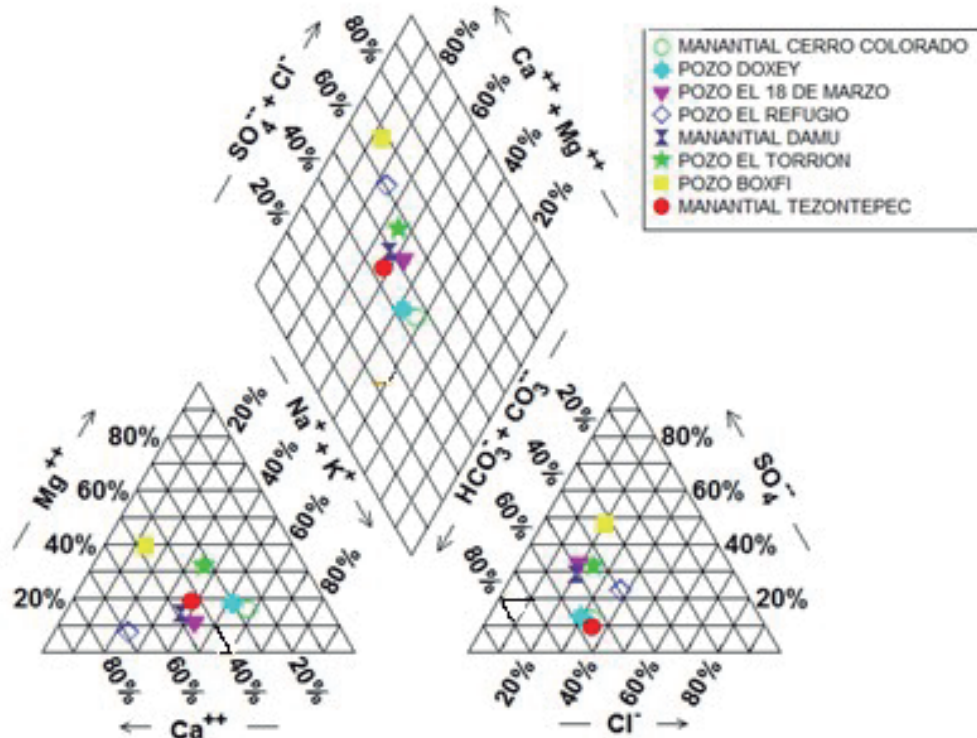


Figura 7.6. Diagrama de Piper del año 2016

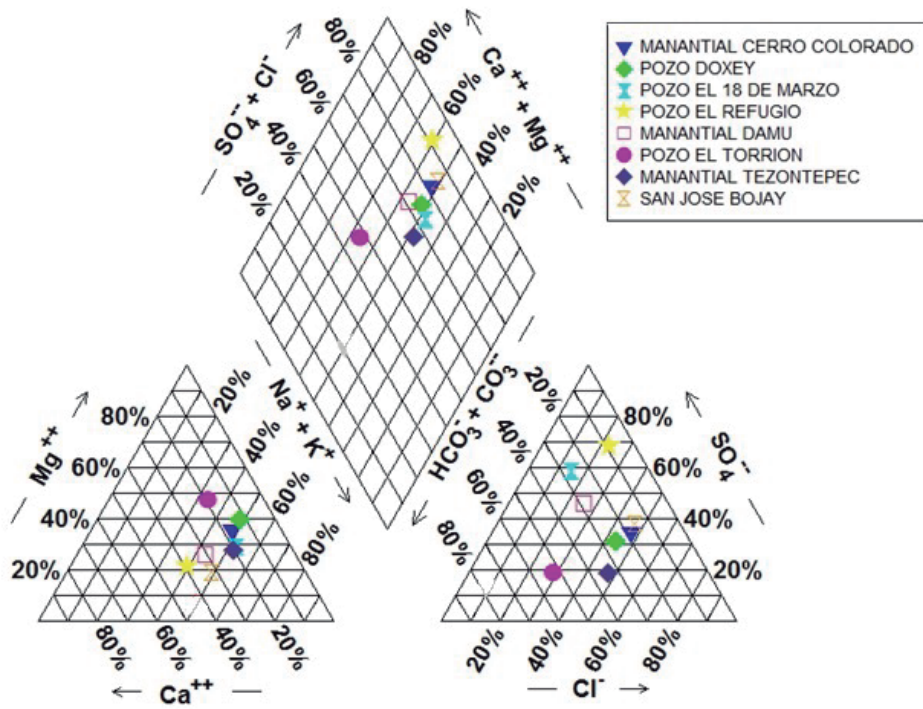


Figura 7.7. Diagrama de Piper del año 2017

84

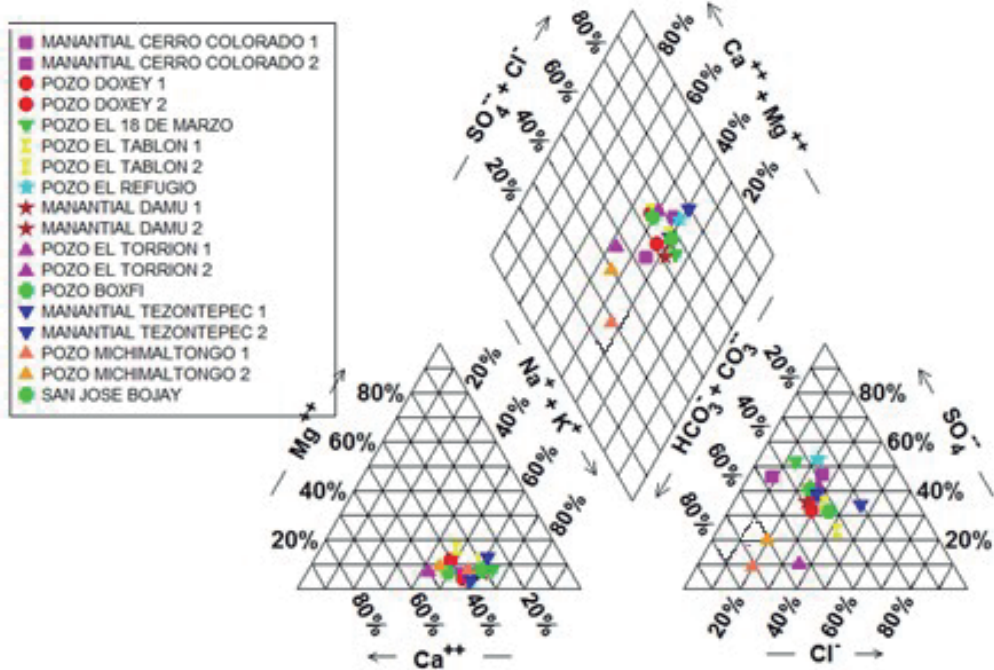


Figura 7.8. Diagrama de Piper del año 2018

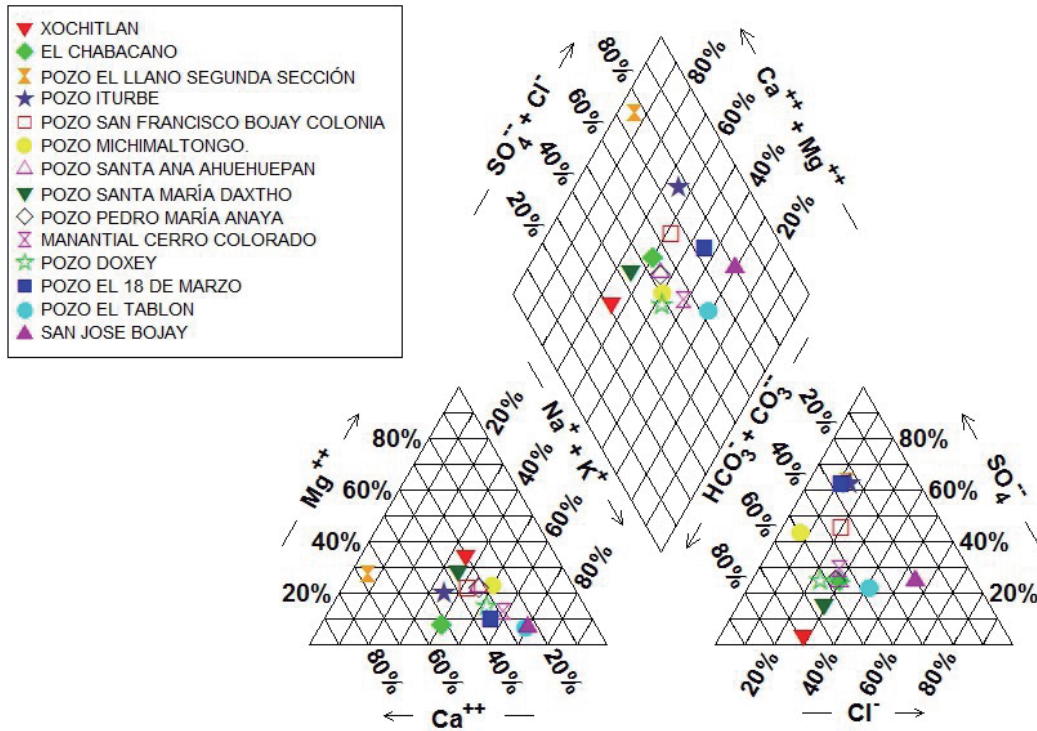


Figura 7.9. Diagrama de Piper del año 2019

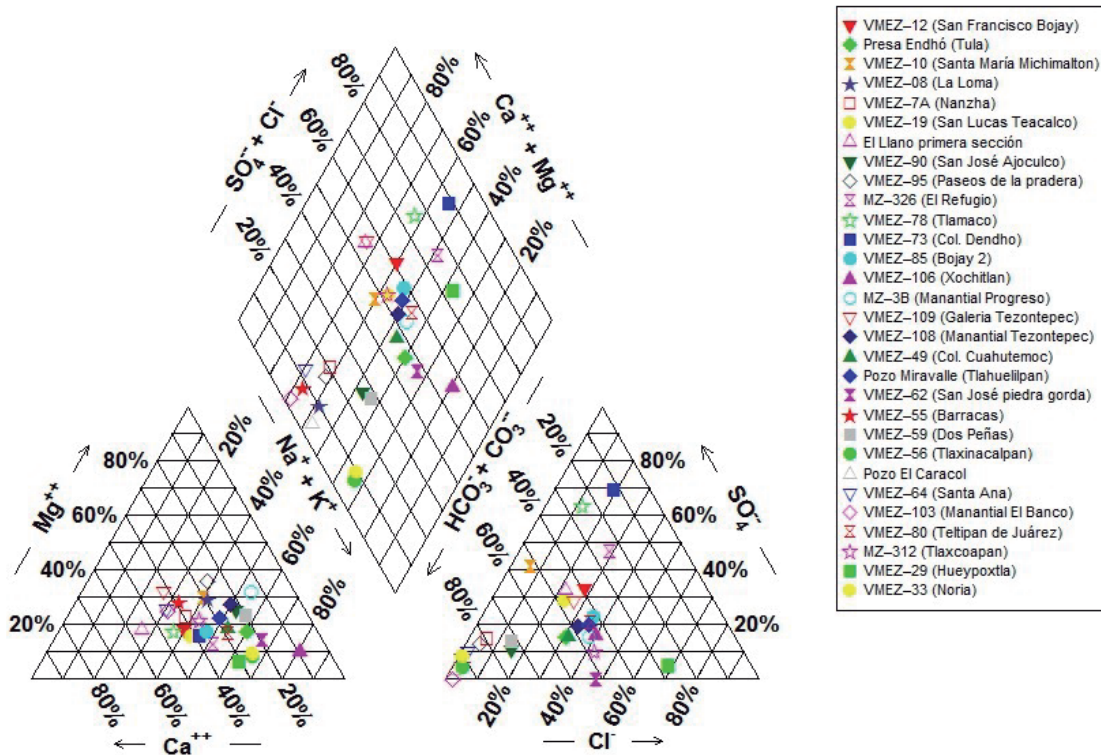


Figura 7.10. Diagrama de Piper del año 2022 (estiaje)

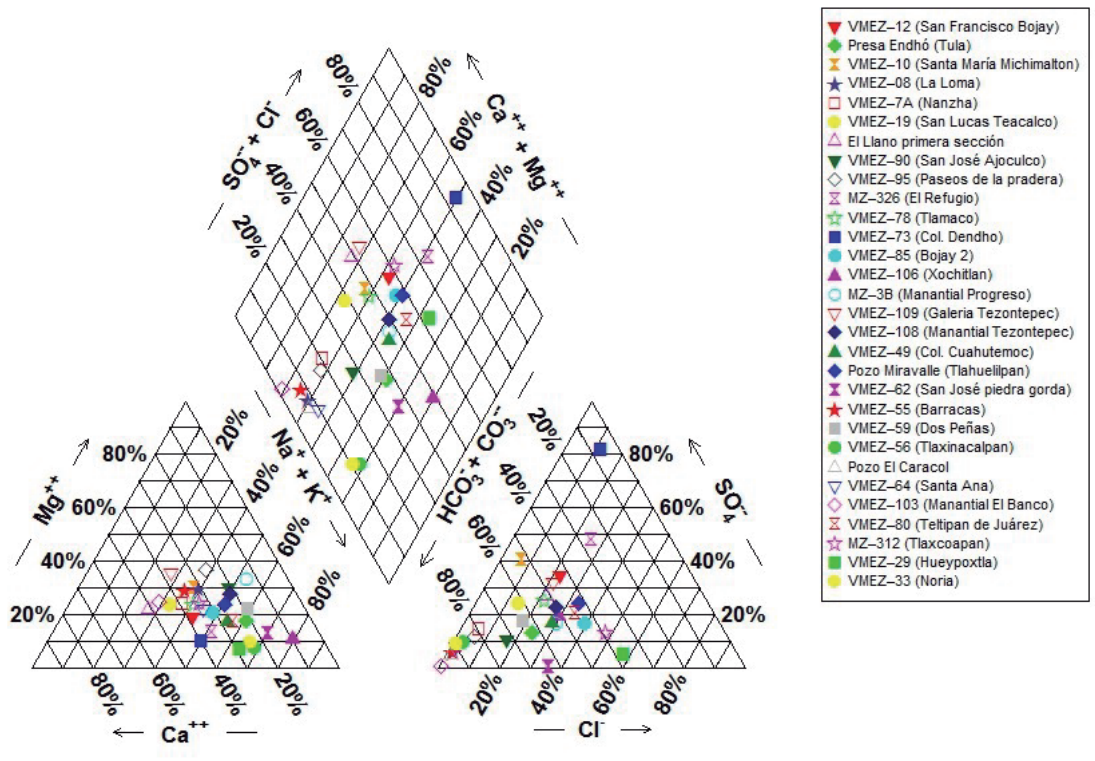


Figura 7.11. Diagrama de Piper del año 2022 (lluvias)

86

En la Tabla 7.3 y Tabla 7.4 se resumen los tipos de agua encontrados por año (2012 a 2022) y para cada pozo monitoreado se puede observar en la tabla que las familias de agua los grupos que prevalecen son Ca - HCO<sub>3</sub>, Mg- HCO<sub>3</sub>, Na-HCO<sub>3</sub>, Na-Cl, Ca-SO<sub>4</sub> y Na-SO<sub>4</sub>



**Tabla 7.3.** Tipos de agua reportados en el Valle del Mezquital de 2012 a 2019 y 2022

Año	Tipo de agua o facies hidrogeoquímicos
2012	Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada cálcica (Ca- HCO <sub>3</sub> ) Clorurada sódica (Na-Cl) Sulfatada cálcica (Ca-SO <sub>4</sub> )
2013	Bicarbonatada cálcica (Ca-HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Clorurada sódica (Na-Cl) Sulfatada sódica (Na-SO <sub>4</sub> )
2014	Clorurada sódica (Na-Cl) Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Sulfatada sódica (Na-SO <sub>4</sub> )
2015	Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Sulfatada sódica (Na-SO <sub>4</sub> ) Bicarbonatada cálcica (Ca- HCO <sub>3</sub> ) Clorurada cálcica (Ca-Cl)
2016	Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada cálcica (Ca- HCO <sub>3</sub> ) Clorurada cálcica (Ca-Cl) Bicarbonatada magnésica (Mg-HCO <sub>3</sub> ) Sulfatada cálcica (Ca-SO <sub>4</sub> )
2017	Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada cálcica (Ca- HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada magnésica (Mg-HCO <sub>3</sub> ) Clorurada sódica (Na-Cl) Sulfatada sódica (Na-SO <sub>4</sub> ) Clorurada sódica (Na-Cl)
2018	Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Sulfatada sódica (Na-SO <sub>4</sub> ) Clorurada sódica (Na-Cl)
2019	Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada cálcica (Ca- HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada magnésica (Mg-HCO <sub>3</sub> ) Clorurada sódica (Na-Cl) Sulfatada sódica (Na-SO <sub>4</sub> )
2022	Estiaje Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada cálcica (Ca- HCO <sub>3</sub> ) Clorurada sódica (Na-Cl) Sulfatada sódica (Na-SO <sub>4</sub> ) Sulfatada cálcica (Ca-SO <sub>4</sub> ) Lluvias Bicarbonatada sódica (Na-HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada cálcica (Ca- HCO <sub>3</sub> ) Bicarbonatada magnésica (Mg- HCO <sub>3</sub> ) Clorurada sódica (Na-Cl) Sulfatada sódica (Na-SO <sub>4</sub> )

**Tabla 7.4.** Tipos de agua reportados en el Valle del Mezquital de cada uno de los aprovechamientos

Año	Familia	Nombre del aprovechamiento
2012	Ca-SO <sub>4</sub>	Pozo El Refugio
	Na-Cl	Pozo El Tablón
	Na-HCO <sub>3</sub>	Manantial Cerro Colorado
		Pozo Doxey
		Manantial Damu
	Pozo El Torreón	
2013	Ca-Cl	Manantial Tezontepec 1
	Ca-HCO <sub>3</sub>	Manantial Cerro Colorado
		Pozo El Torreón
	Ca-SO <sub>4</sub>	Pozo El Bosque 1
		Pozo El Bosque 2
	Na-Cl	Pozo El Tablón
	Na-HCO <sub>3</sub>	Pozo Doxey
		Pozo El 18 de Marzo 1
		Pozo El 18 de Marzo 2
		Manantial Damu
	Manantial Tezontepec 2	
Na-SO <sub>4</sub>	Pozo El Refugio	
2014	Ca-SO <sub>4</sub>	Pozo Boxfi
	Na-Cl	Manantial Cerro Colorado
		Pozo El Tablón
	Na-HCO <sub>3</sub>	Pozo Doxey
		Manantial Damu
		Pozo El Torreón
	Na-SO <sub>4</sub>	Manantial Tezontepec
Pozo El 18 de Marzo		
	Pozo El Refugio	
2015	Ca-Cl	Pozo El Tablón
	Ca-HCO <sub>3</sub>	Manantial Damu
		Pozo Boxfi
	Na-HCO <sub>3</sub>	Manantial Cerro Colorado
		Pozo Doxey
		Manantial Tezontepec
Na-SO <sub>4</sub>	Pozo El 18 De Marzo	
	Pozo El Refugio	



Tabla 7.4. Tipos de agua reportados en el Valle del Mezquital de cada uno de los aprovechamientos (Continuación)

Año	Familia	Nombre del aprovechamiento
2016	Ca-Cl	Pozo El Refugio
	Ca-HCO <sub>3</sub>	Pozo El 18 De Marzo
		Manantial Damu
		Manantial Tezontepec
	Ca-SO <sub>4</sub>	Pozo Boxfi
	Mg-HCO <sub>3</sub>	Pozo El Torreón
	Na-HCO <sub>3</sub>	Pozo El Mezquital
		Manantial Cerro Colorado
Pozo Doxey		
2017	Ca-SO <sub>4</sub>	Pozo El Refugio
	Mg-HCO <sub>3</sub>	Pozo El Torreón
	Na-Cl	Manantial Cerro Colorado
		Pozo Doxey
		Manantial Tezontepec
		San Jose Bojay
	Na-SO <sub>4</sub>	Pozo El 18 De Marzo
		Manantial Damu
2018	Ca-HCO <sub>3</sub>	Pozo El Torreón 1
	Na-Cl	Pozo El Tablón 1
		Pozo El Tablón 2
		Manantial Tezontepec 2
		San José Bojay
		Pozo Doxey 1
		Manantial Damu 1
		Pozo Michimaltongo 1
		Pozo Michimaltongo 2
	Na-SO <sub>4</sub>	Manantial Cerro Colorado 1
		Manantial Cerro Colorado 2
		Pozo Doxey 2
		Pozo El 18 de Marzo
		Pozo El Refugio
		Manantial Damu 2
		Pozo El Torreón 2
Pozo Boxfi		
Manantial Tezontepec 1		

**Tabla 7.4.** Tipos de agua reportados en el Valle del Mezquital de cada uno de los aprovechamientos (Continuación)

Año	Familia	Nombre del aprovechamiento
2019	Ca-HCO <sub>3</sub>	El Chabacano
		Pozo Santa María Daxtho
	Ca-SO <sub>4</sub>	Pozo El Llano Segunda Sección
		Pozo Iturbe
	Mg-HCO <sub>3</sub>	Xochitlan
	Na-Cl	Pozo El Tablón
		San José Bojay
	Na-HCO <sub>3</sub>	Pozo Michimaltongo.
		Pozo Santa Ana Ahuehuepan
		Pozo Pedro María Anaya
		Manantial Cerro Colorado
		Pozo Doxey
	Na-SO <sub>4</sub>	Pozo San Francisco Bojay Colonia
		Pozo El 18 de Marzo
	2022 (Estiaje)	Ca-HCO <sub>3</sub>
El Llano primera sección		
VMEZ-109 (Galería Tezontepec)		
VMEZ-55 (Barracas)		
Pozo El Caracol		
VMEZ-64 (Santa Ana)		
VMEZ-103 (Manantial El Banco)		
Ca-SO <sub>4</sub>		VMEZ-78 (Tlamaco)
Na-Cl		VMEZ-29 (Hueypoxtla)
Na-HCO <sub>3</sub>		VMEZ-12 (San Francisco Bojay)
		Presa Endhó (Tula)
		VMEZ-10 (Santa María Michimalton)
		VMEZ-08 (La Loma)
		VMEZ-19 (San Lucas Teacalco)
		VMEZ-90 (San José Ajoculco)
	VMEZ-95 (Paseos de la pradera)	
	VMEZ-85 (Bojay 2)	
	VMEZ-106 (Xochitlán)	
MZ-3B (Manantial Progreso)		

**Tabla 7.4.** Tipos de agua reportados en el Valle del Mezquital de cada uno de los aprovechamientos (Continuación)

Año	Familia	Nombre del aprovechamiento
2022 (Estiaje)	Na-HCO <sub>3</sub>	VMEZ-108 (Manantial Tezontepec)
		VMEZ-4 <sub>9</sub> (Col. Cuauhtémoc)
		Pozo MiraValle (Tlahuelilpan)
		VMEZ-62 (San José piedra gorda)
		VMEZ-59 (Dos Peñas)
		VMEZ-56 (Tlaxinacalpan)
		VMEZ-80 (Teltipan de Juárez)
		MZ-312 (Tlaxcoapan)
		VMEZ-33 (Noria)
	Na-SO <sub>4</sub>	MZ-326 (El Refugio)
VMEZ-73 (Col. Dendho)		
2022 (lluvias)	Ca-HCO <sub>3</sub>	VMEZ-12 (San Francisco Bojay)
		VMEZ-7A (Nanzha)
		VMEZ-19 (San Lucas Teacalco)
		El Llano primera sección
		VMEZ-55 (Barracas)
		VMEZ-6 <sub>4</sub> (Santa Ana)
		VMEZ-103 (Manantial El Banco)
	Mg-HCO <sub>3</sub>	VMEZ-109 (Galería Tezontepec)
	Na-Cl	VMEZ-85 (Bojay 2)
		VMEZ-62 (San José piedra gorda)
		MZ-312 (Tlaxcoapan)
		VMEZ-29 (Hueypoxtla)
	Na-HCO <sub>3</sub>	Presa Endhó (Tula)
		VMEZ-10 (Santa María Michimalton)
		VMEZ-08 (La Loma)
		VMEZ-90 (San José Ajoculco)
		VMEZ-95 (Paseos de la pradera)
VMEZ-78 (Tlamaco)		
VMEZ-106 (Xochitlan)		
MZ-3B (Manantial Progreso)		

**Tabla 7.4.** Tipos de agua reportados en el Valle del Mezquital de cada uno de los aprovechamientos (Continuación)

Año	Familia	Nombre del aprovechamiento
2022 (lluvias)	Na-HCO <sub>3</sub>	VMEZ-108 (Manantial Tezontepec)
		VMEZ-49 (Col. Cuahutemoc)
		Pozo MiraValle (Tlahuelilpan)
		VMEZ-59 (Dos Peñas)
		VMEZ-56 (Tlaxinacalpan)
		Pozo El Caracol
		VMEZ-80 (Teltipan de Juárez)
		VMEZ-33 (Noria)
	Na-SO <sub>4</sub>	MZ-326 (El Refugio)
VMEZ-73 (Col. Dendho)		

El enriquecimiento en las familias Na-HCO<sub>3</sub>, Ca-Na-HCO<sub>3</sub> y HCO<sub>3</sub>-Cl, Na-Cl, principalmente, debido a que fluye a través del depósito aluvial y las rocas volcánicas (basaltos, ignimbritas y tobas riolíticas) y posiblemente rocas carbonatadas. Los cationes principales Na<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup> son generalmente dominantes; y Mg<sup>2+</sup> es de importancia secundaria. De los aniones principales, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> es generalmente dominante; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Cl<sup>-</sup> son de importancia secundaria.

## 7.5. Evolución de la calidad del agua de los datos históricos

### ***Evolución de la calidad del agua conforme a los datos de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (CONAGUA)***

Este análisis se realizó considerando datos de 2012 a 2022 en el que se realizaron gráficas y mapas para poder observar la evolución de la calidad en el tiempo y la evolución espacial de varios parámetros principales tales como: pH, SDT, nitratos, nitritos, sulfatos, dureza total y Coliformes fecales. Los valores de pH están dentro del rango establecidos en los criterios ecológicos para agua potable de 5 a 9 unidades de pH, no se observan variaciones en este parámetro (Figura 7.12). Los valores SDT superan los criterios de 500 y 1000 mg/L de los criterios ecológicos para uso de abastecimiento y de la norma 127 de uso y consumo humano (Figura 7.13).

Esto se puede observar para los años 2019 y 2022, en los pozos el Llano segunda sección, Iturbe, San Francisco Bojay Colonia, Pedro María Anaya, excepto en el pozo Xochitlan. Se

puede observar en período de 2012 a 2018 en los pozos El Tablón, Refugio, El 18 de marzo, El Torrión y en el Manantial Cerro Colorado (83 a 1502, 562 a 1680, 860 a 1574, 539 a 628 y 279 a 1144 mg/L respectivamente). Así mismo, se puede observar en las figuras 7.14a, b y c que los aprovechamientos que superan los 1000 mg/L se ubican en la región Noroeste y Este.

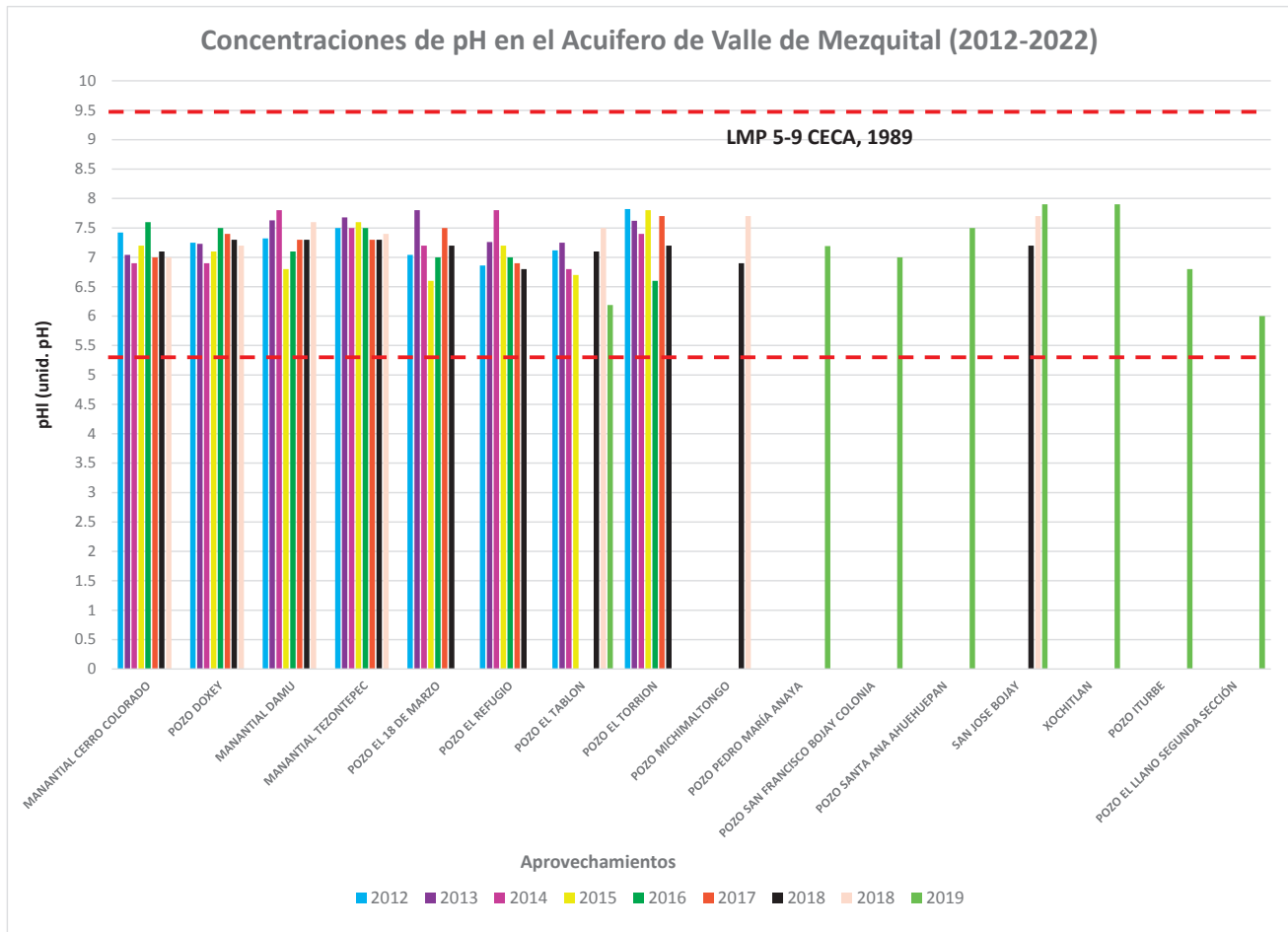
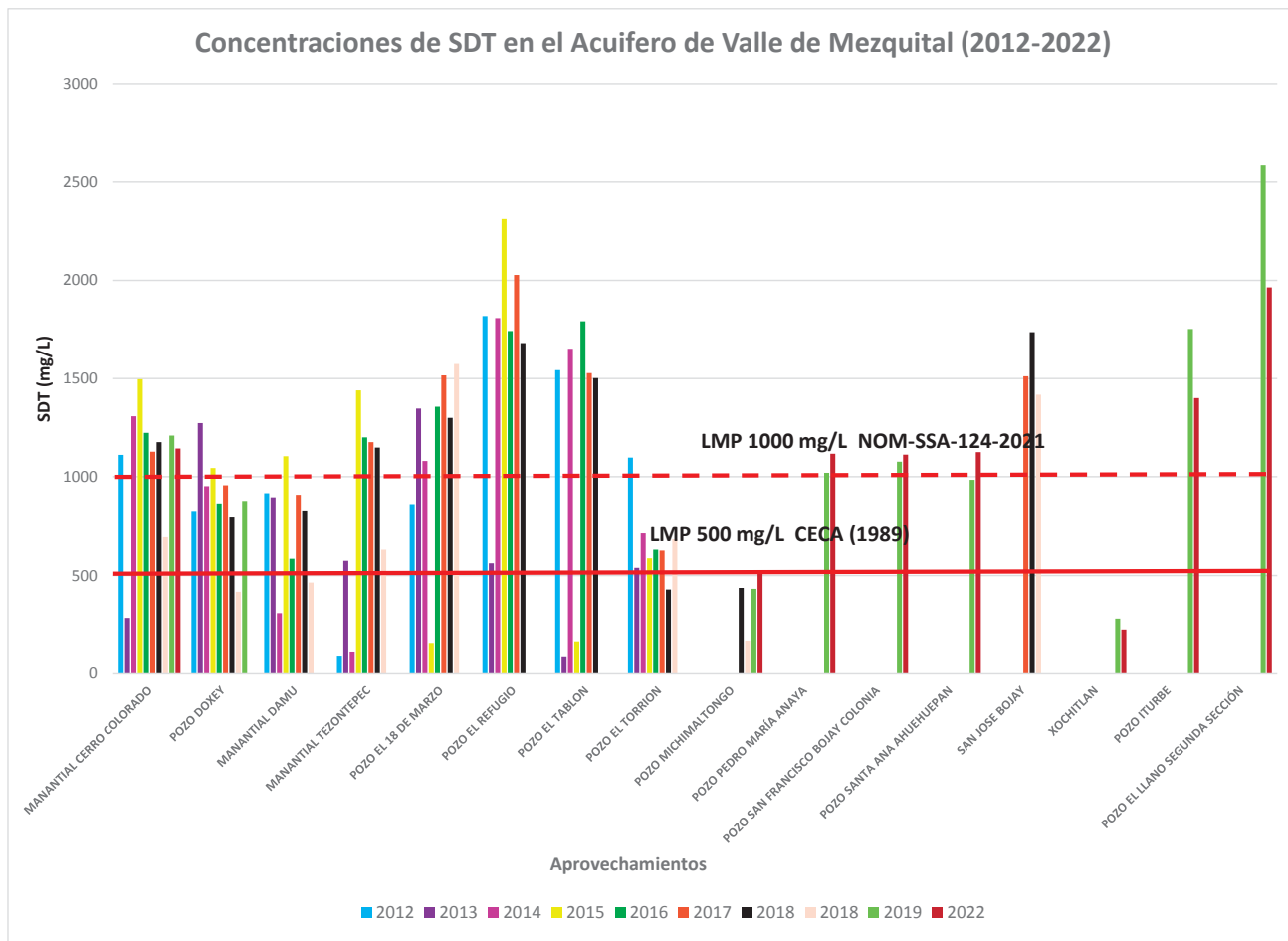
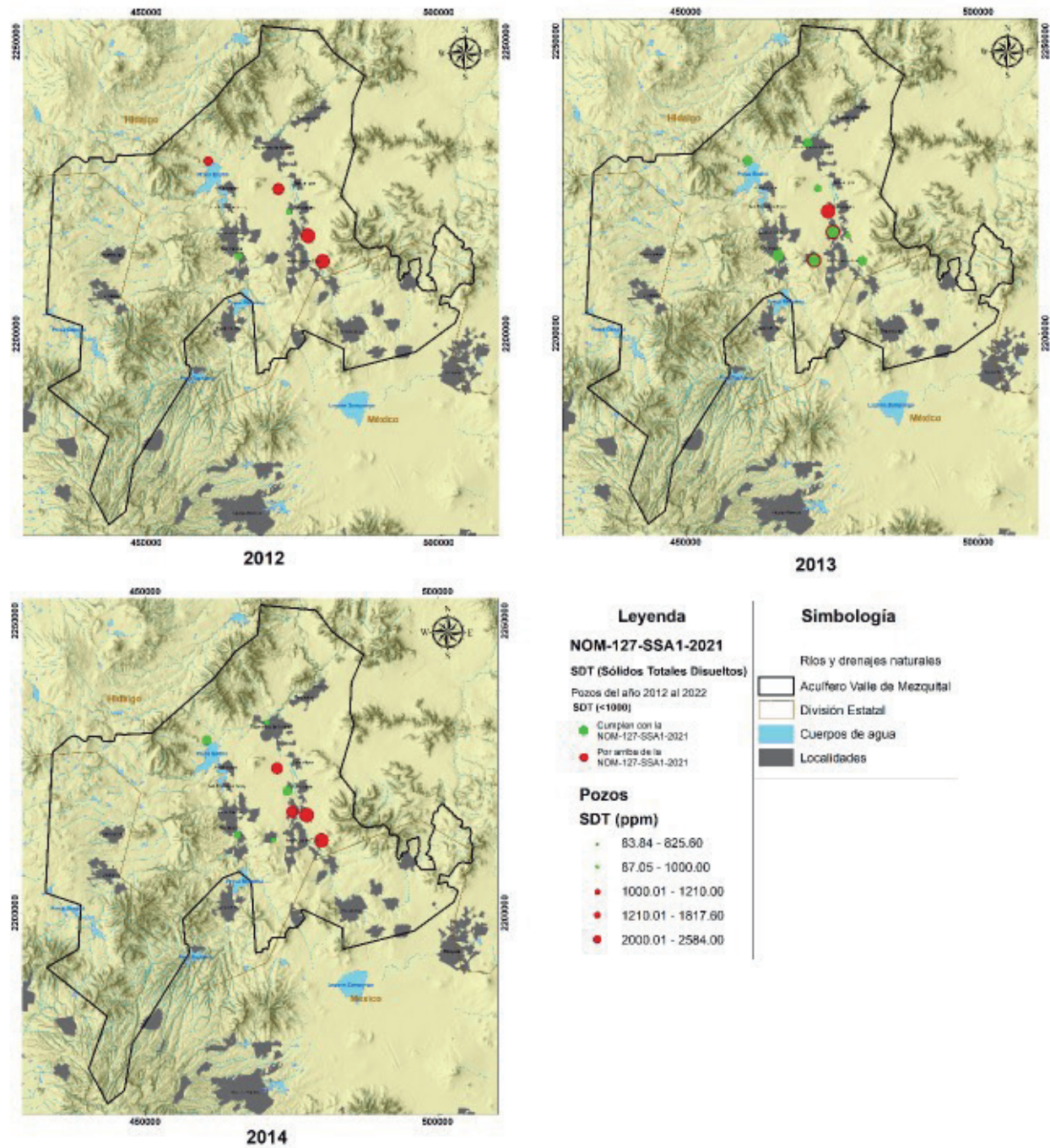


Figura 7.12. Concentración de pH en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022



**Figura 7.13.** Concentración de SDT en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022





**Figura 7.14.** Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2012, 2013 y 2014).

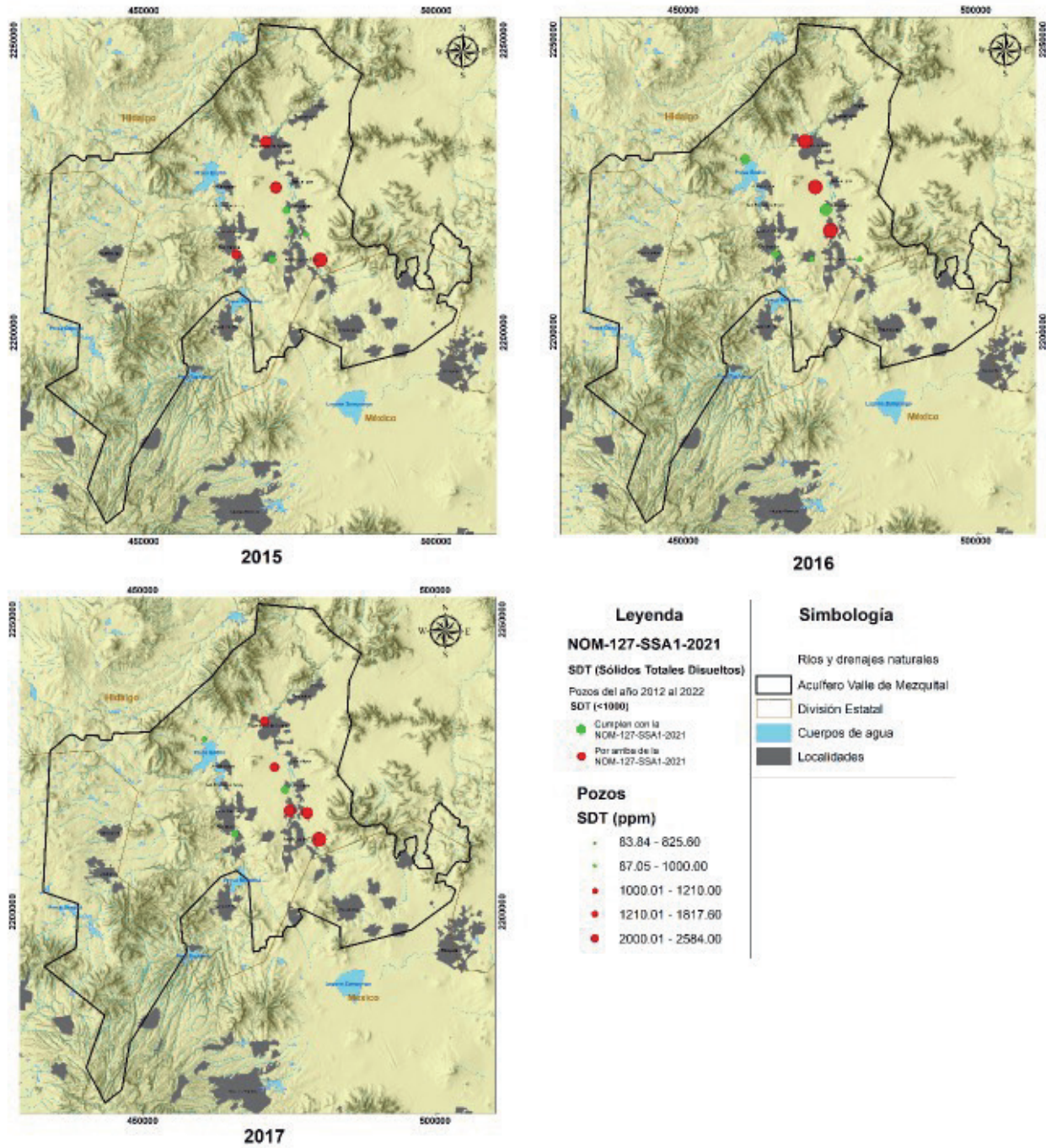


Figura 7.14 b. Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2015, 2016 y 2017).

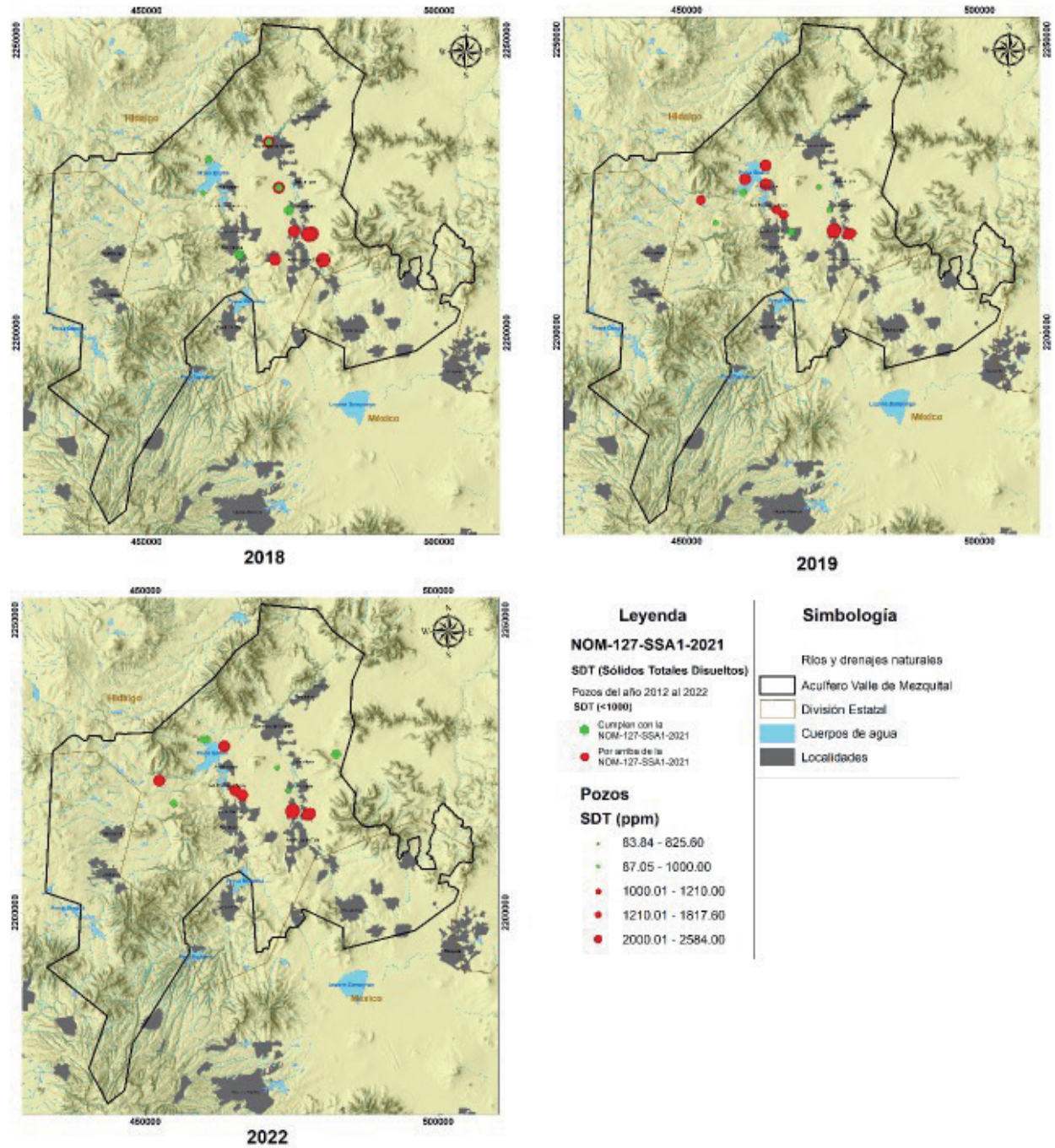


Figura 7.14 c. Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2018, 2019 y 2022).

Las concentraciones de nitratos se observan variables en los pozos analizados durante en el período de año analizados, se pueden observar concentraciones por arriba de los 10 mg/L en varios de los aprovechamientos como el Tablón, Doxey, en los manantiales Damu y Cerro Colorado (Figura 7.15). Las concentraciones que superan la norma mexicana se observan en el centro y noreste y este (Figura 7.16a, b y c). Mientras que los nitros en todos los pozos que se midieron cumplen con el criterio establecido en los criterios ecológicos de Calidad de agua Potable de 20 mg/L (Figura 7.17).

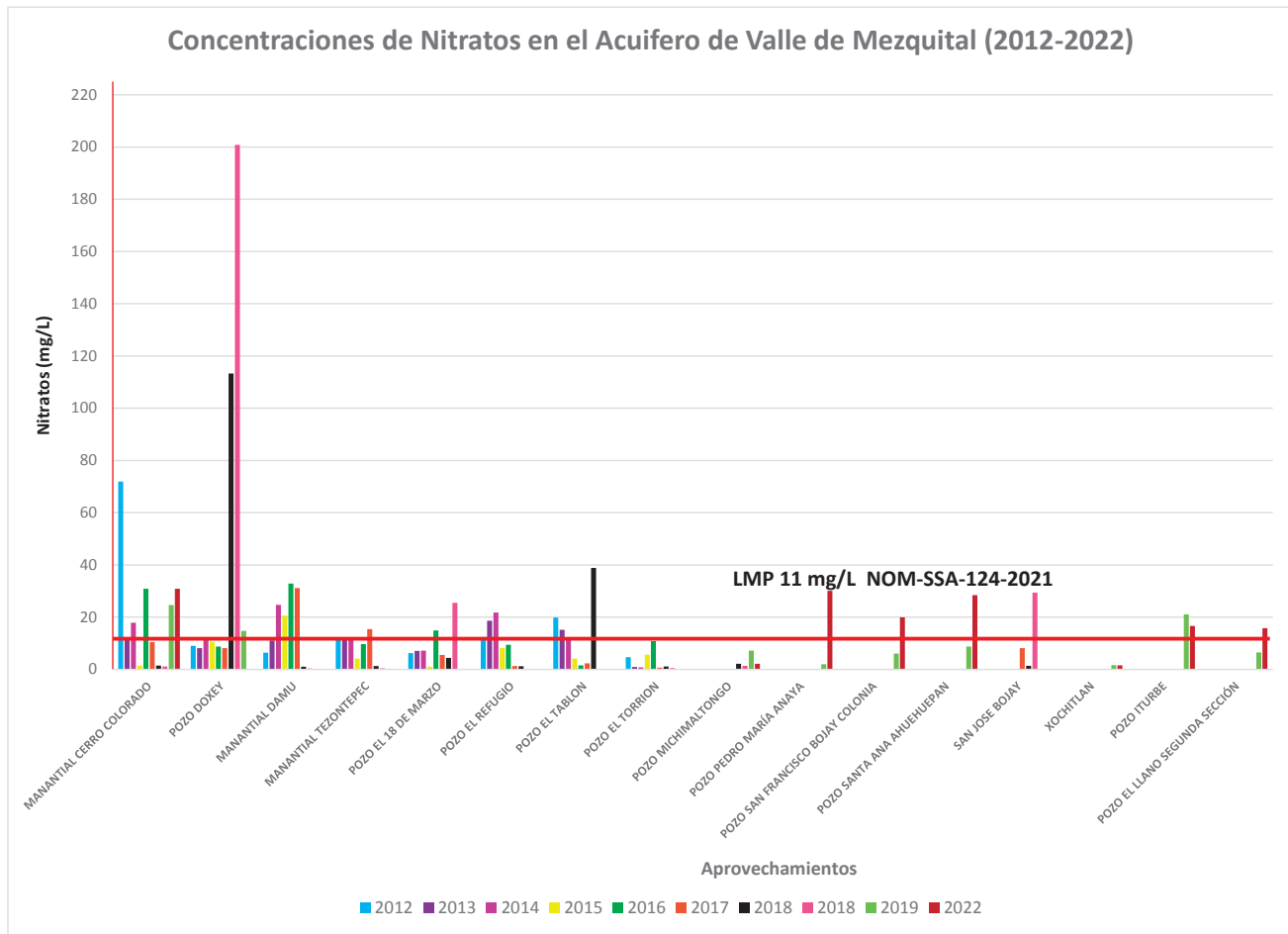
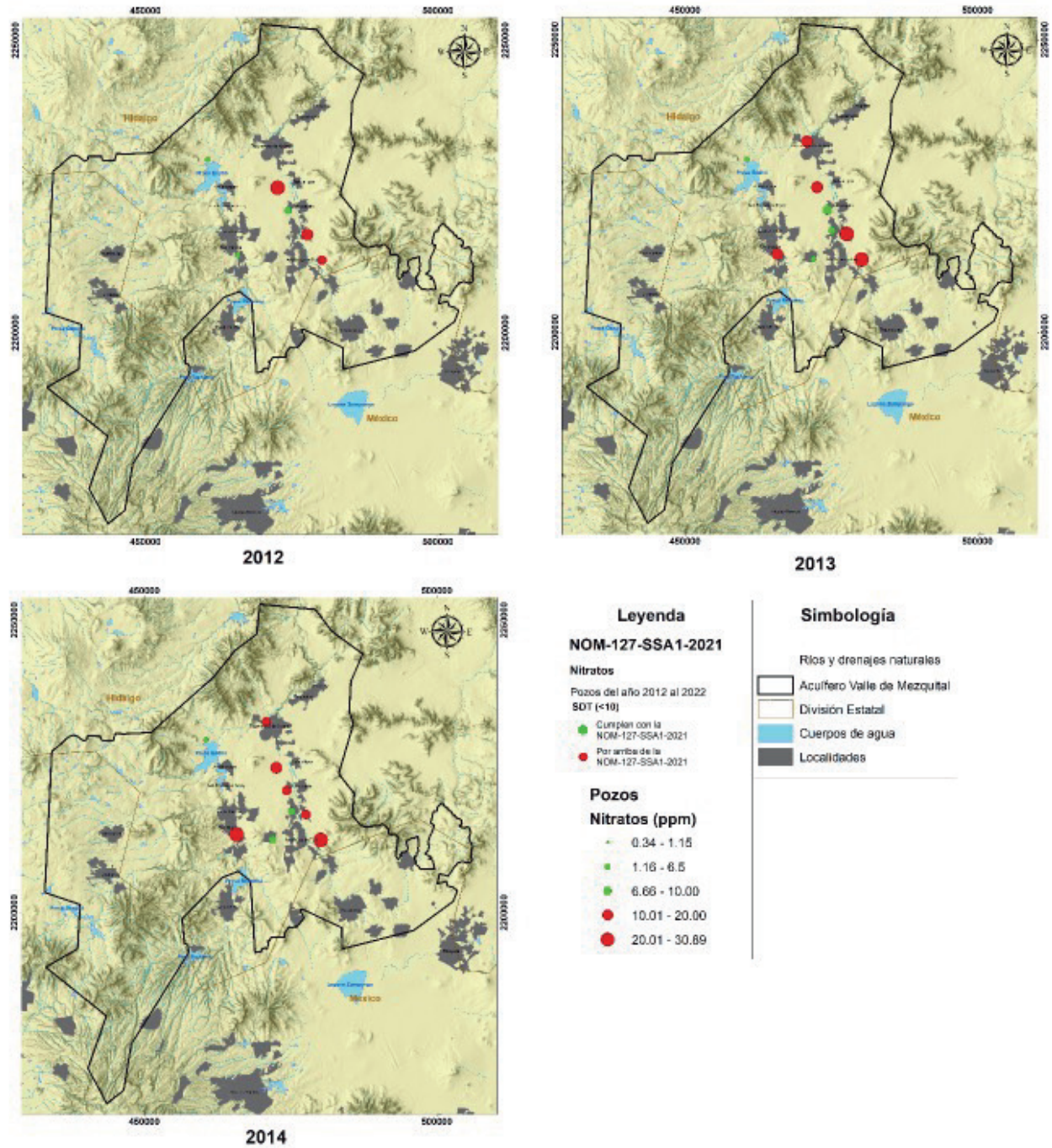
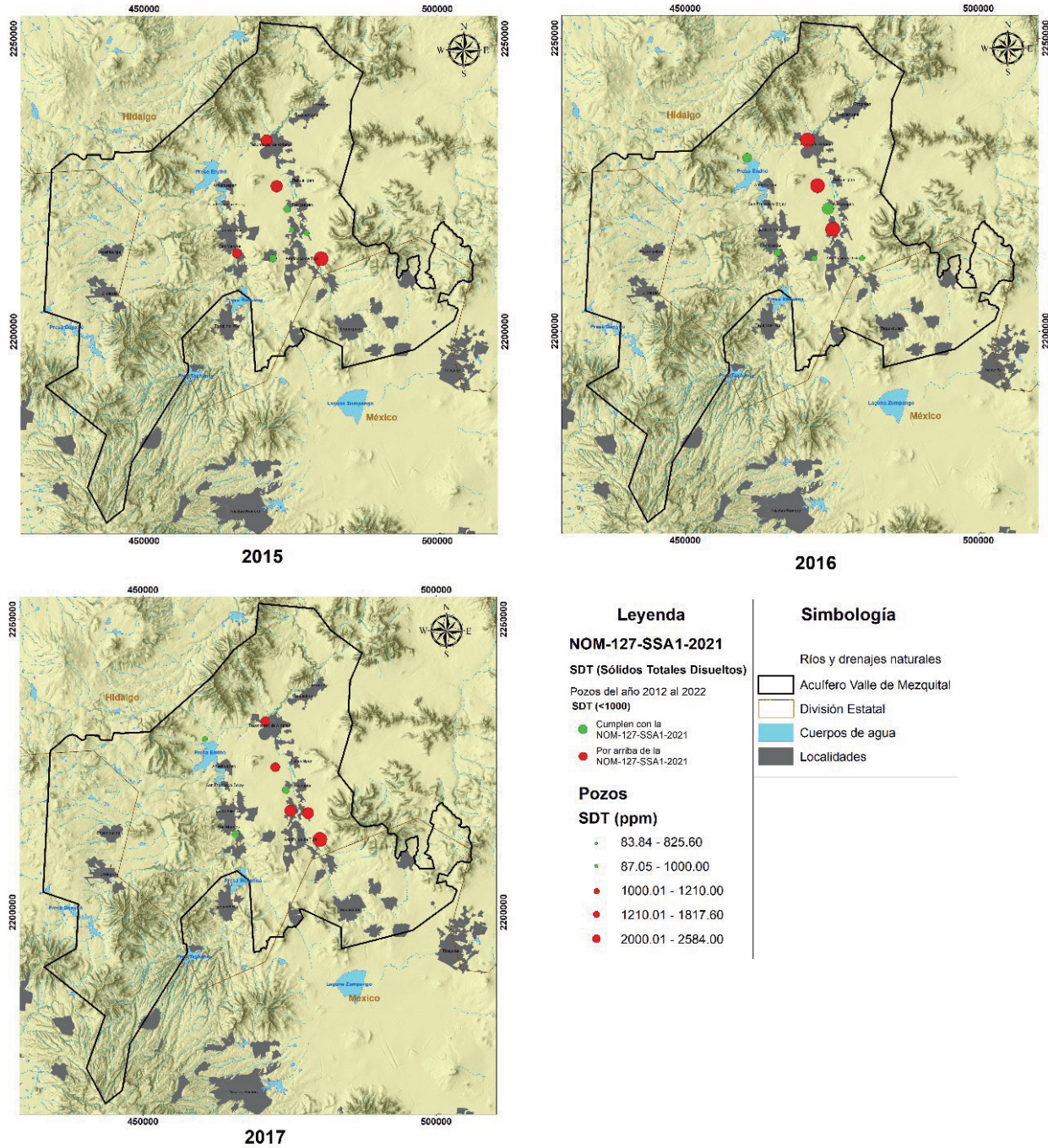


Figura 7.15. Concentración de Nitratos en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022



**Figura 7.16.** Distribución espacial de las concentraciones de Nitratos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2012, 2013 y 2014)



**Figura 7.16 b.** Distribución espacial de las concentraciones de Nitratos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2015, 2016 y 2017).

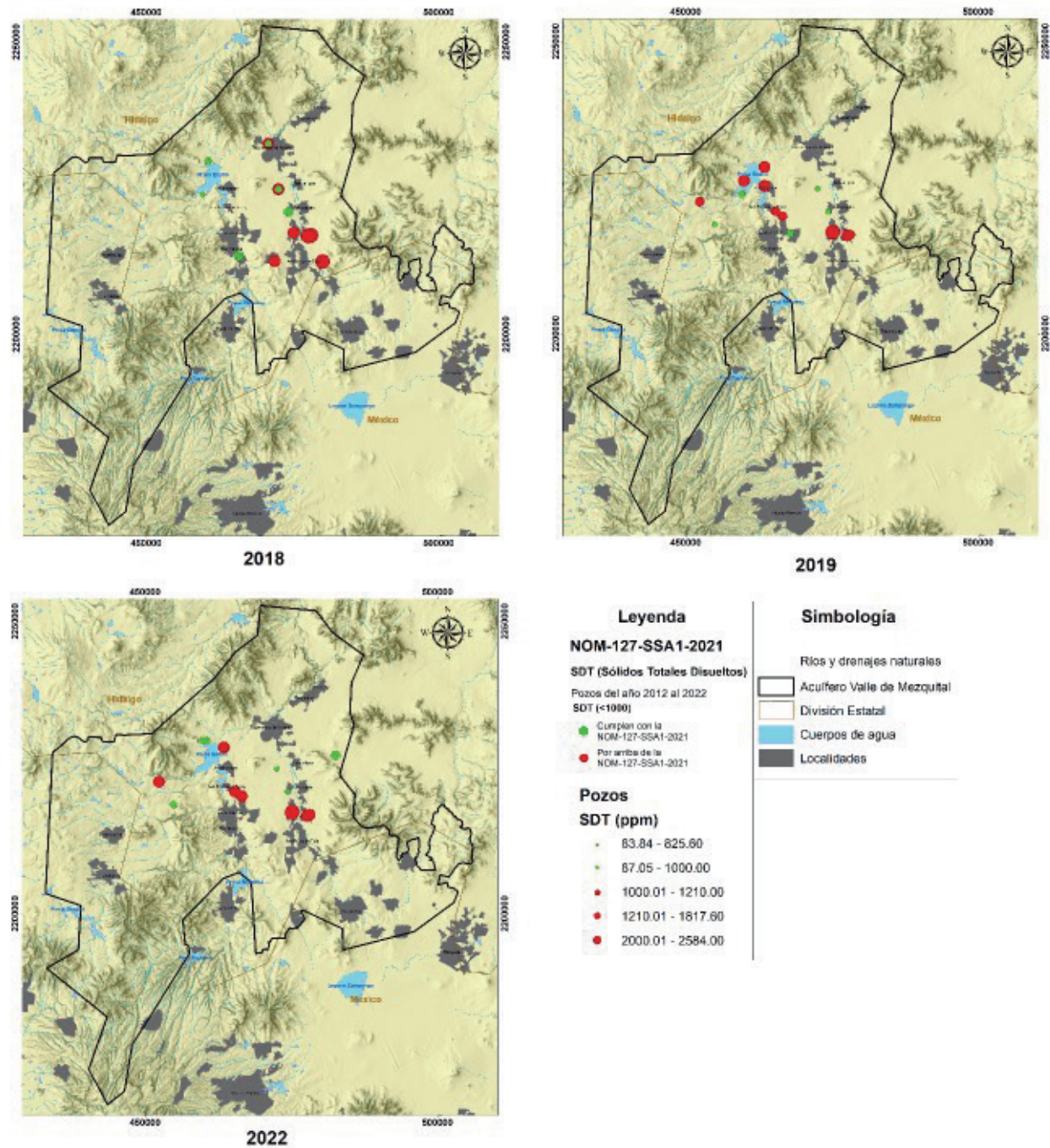
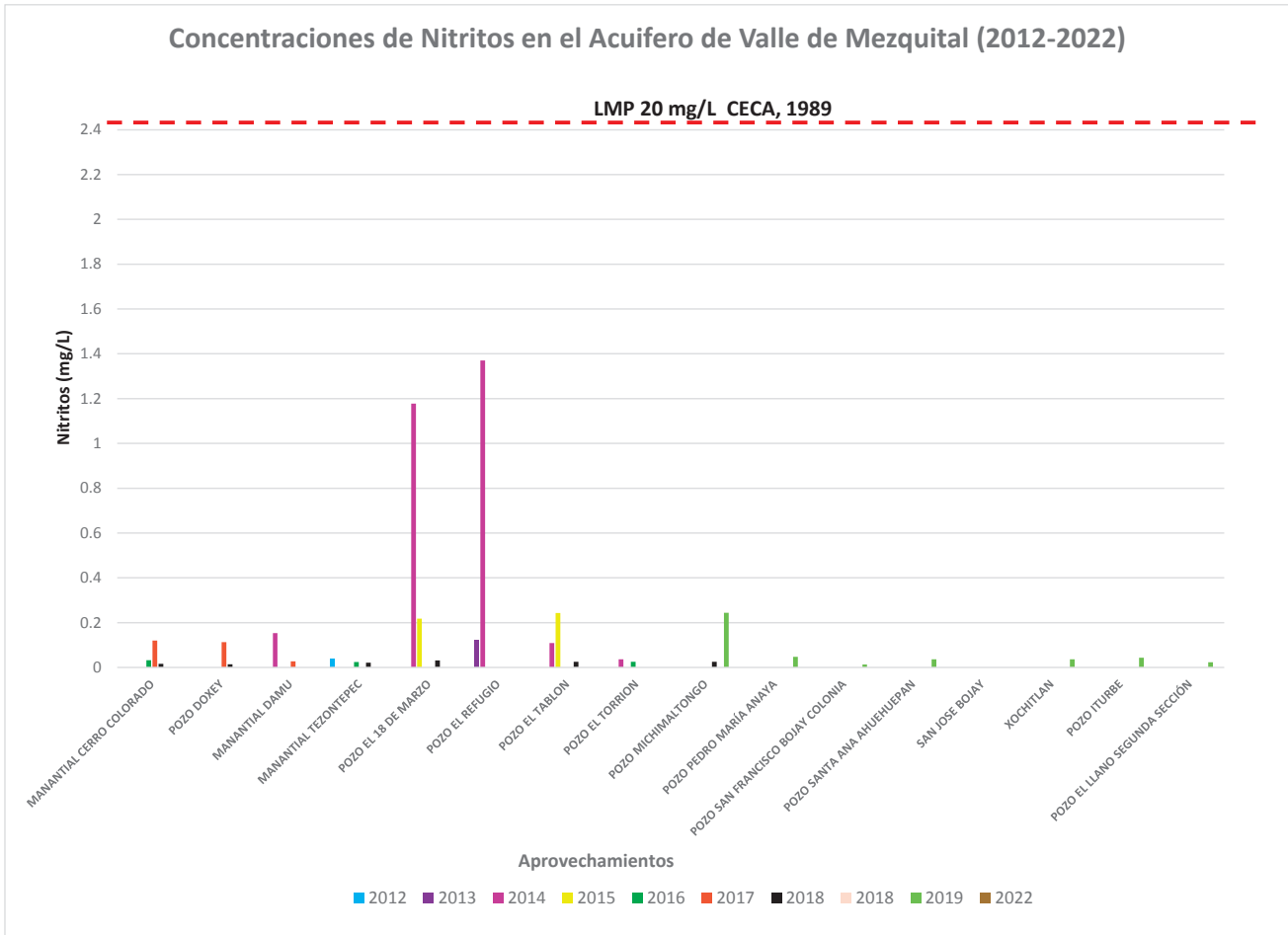


Figura 7.16 c. Distribución espacial de las concentraciones de Nitratos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2018, 2019 y 2022)



**Figura 7.17.** Concentración de nitritos en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022

En el caso de los sulfatos los pozos El Refugio y 18 de marzo evidencian el aumento de sulfatos a valores sobre los 400 mg/L de la norma mexicana y 500 mg/L de los criterios ecológicos como se muestra en las Figura 7.18, Figura 7.19a, Figura 7.19 b y Figura 7.19 c.



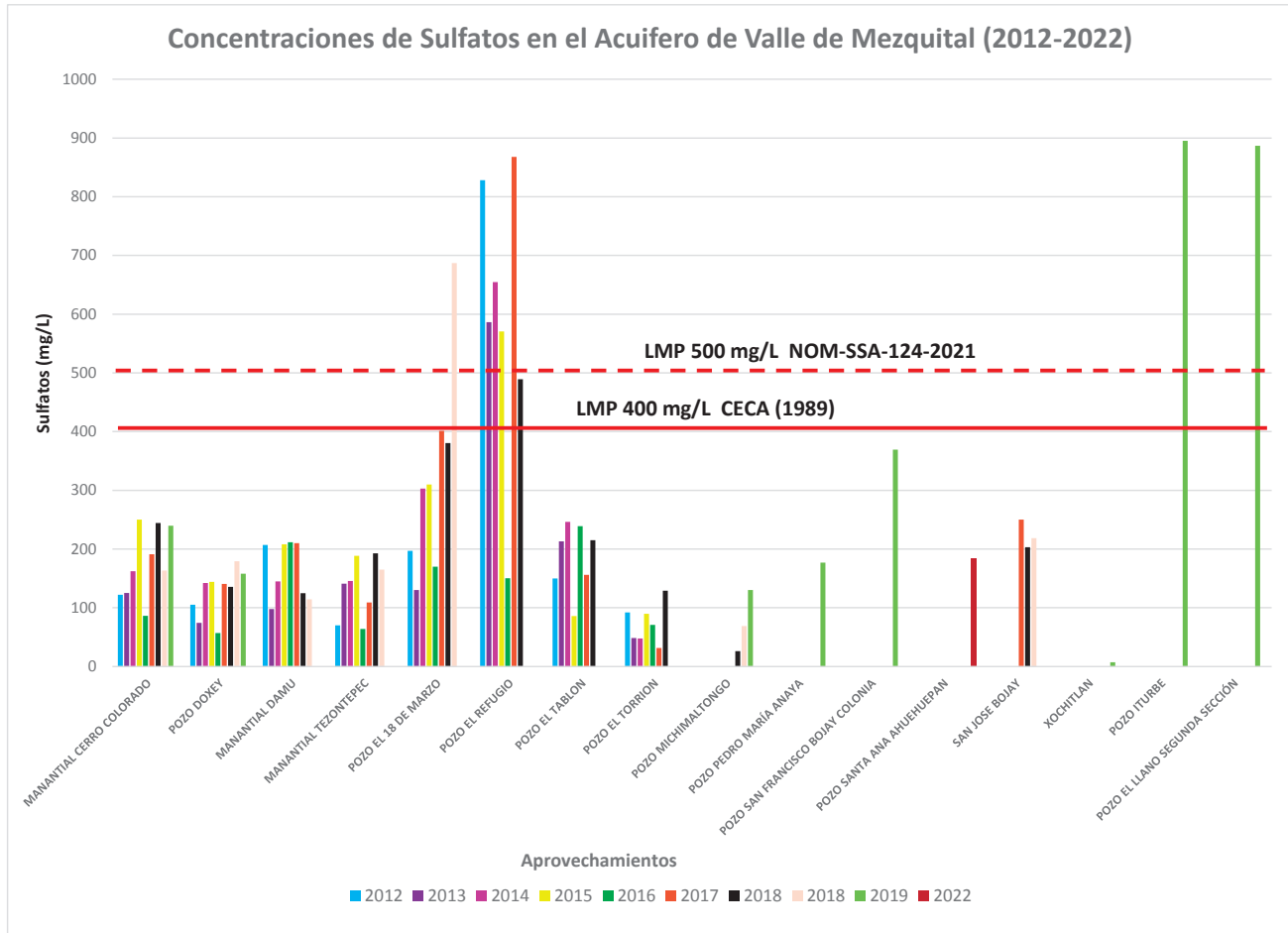


Figura 7.18. Concentración de Sulfatos en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022

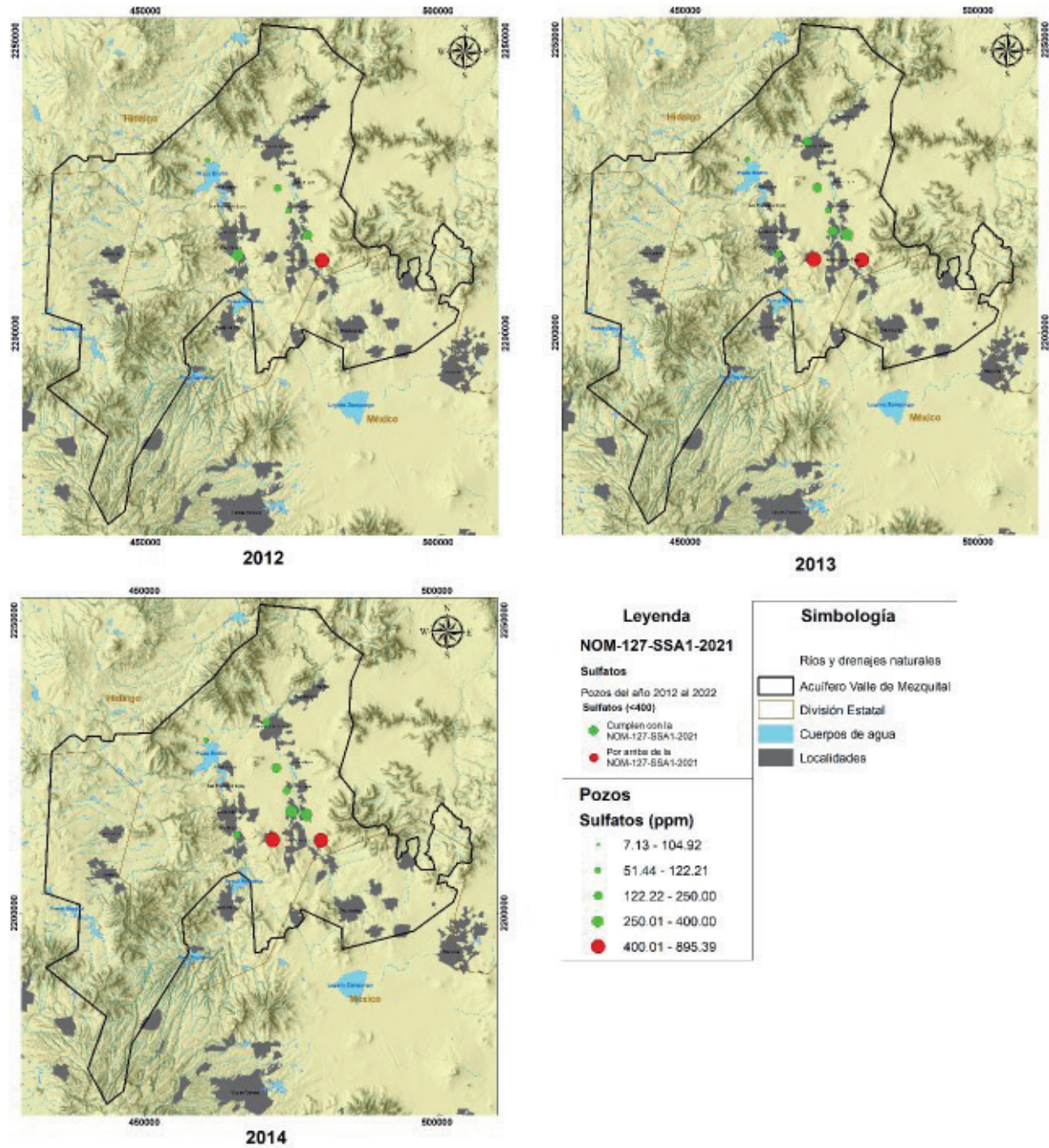
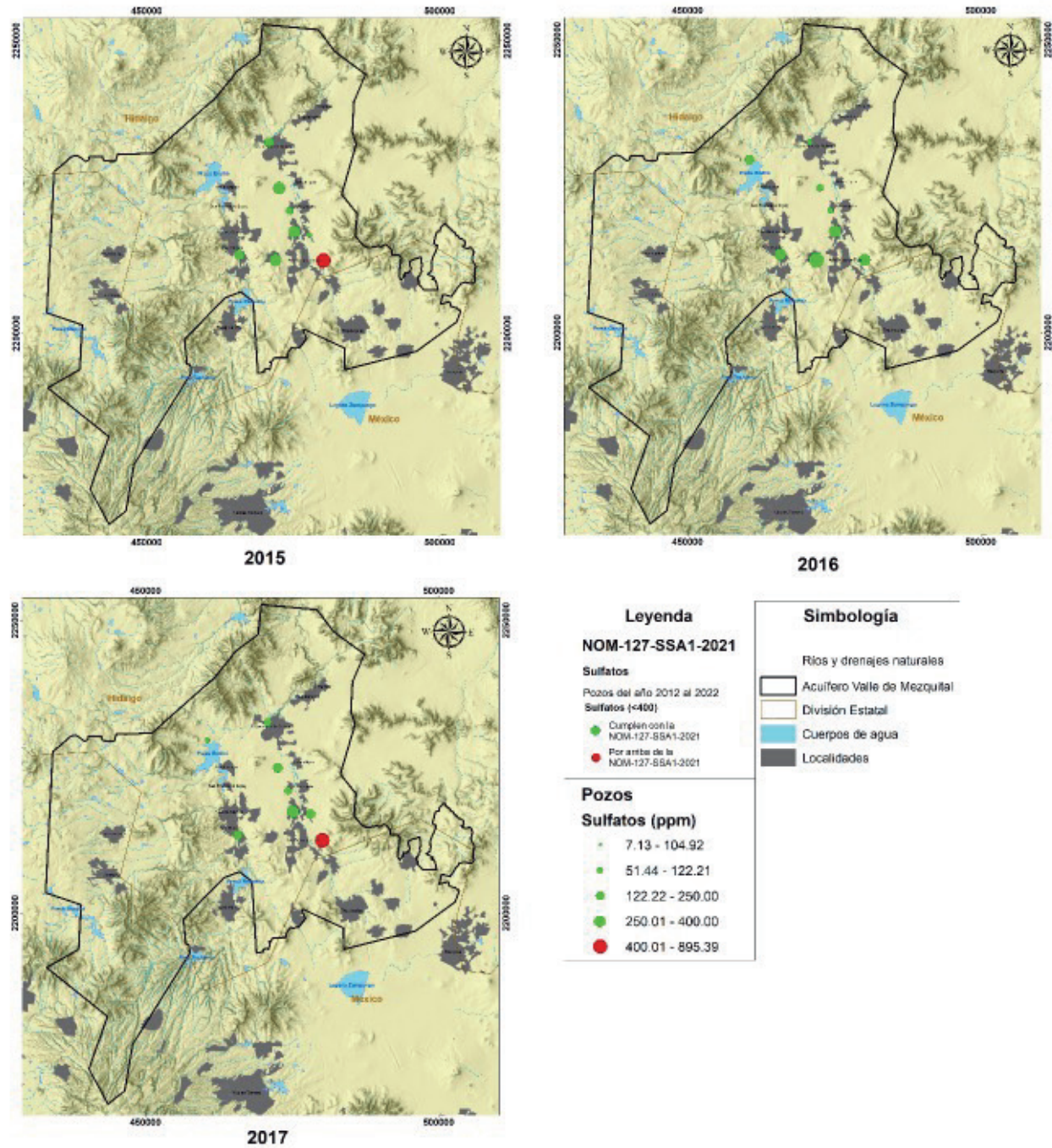
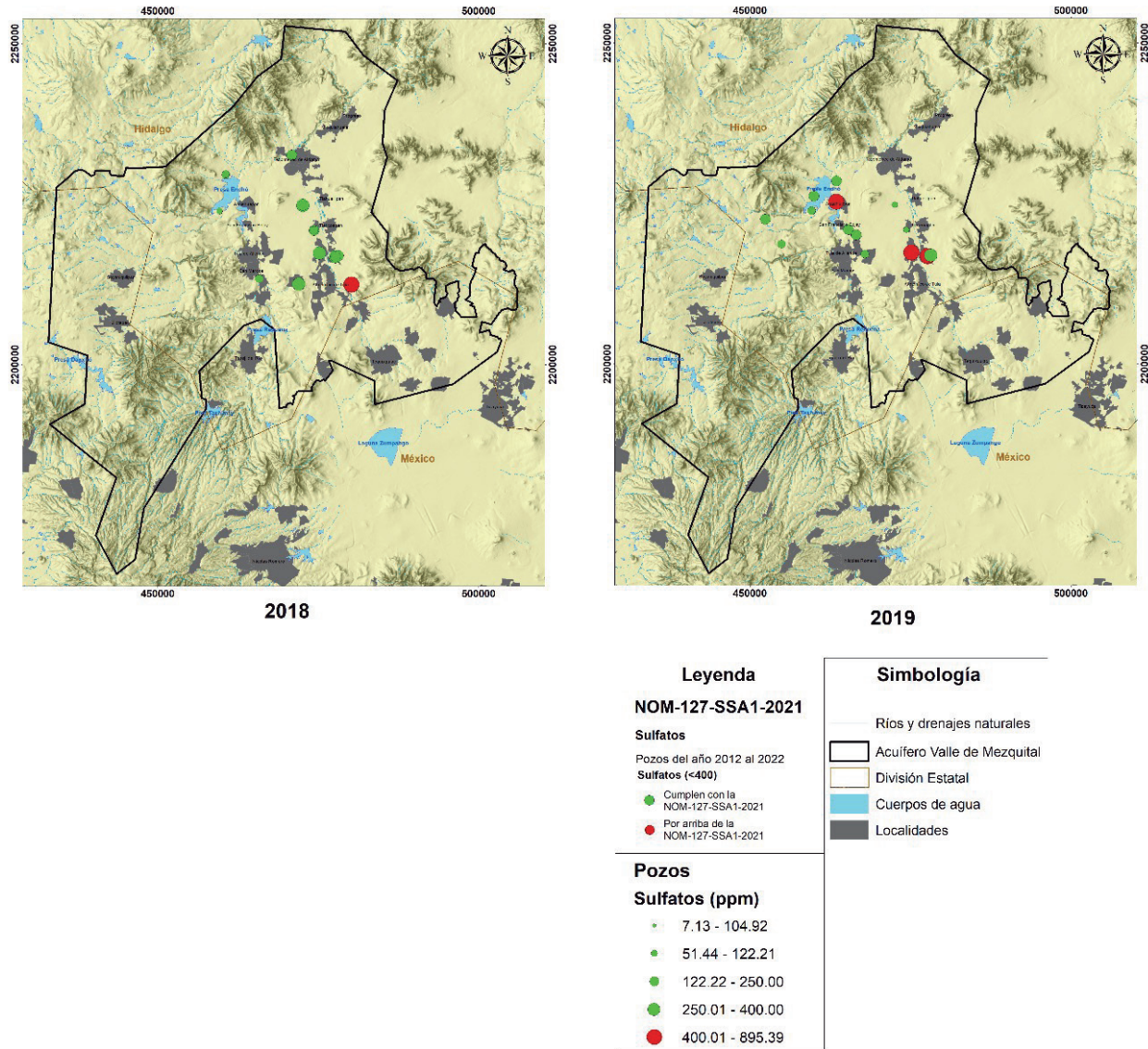


Figura 7.19. a Distribución espacial de las concentraciones de sulfatos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2012, 2013 y 2014).

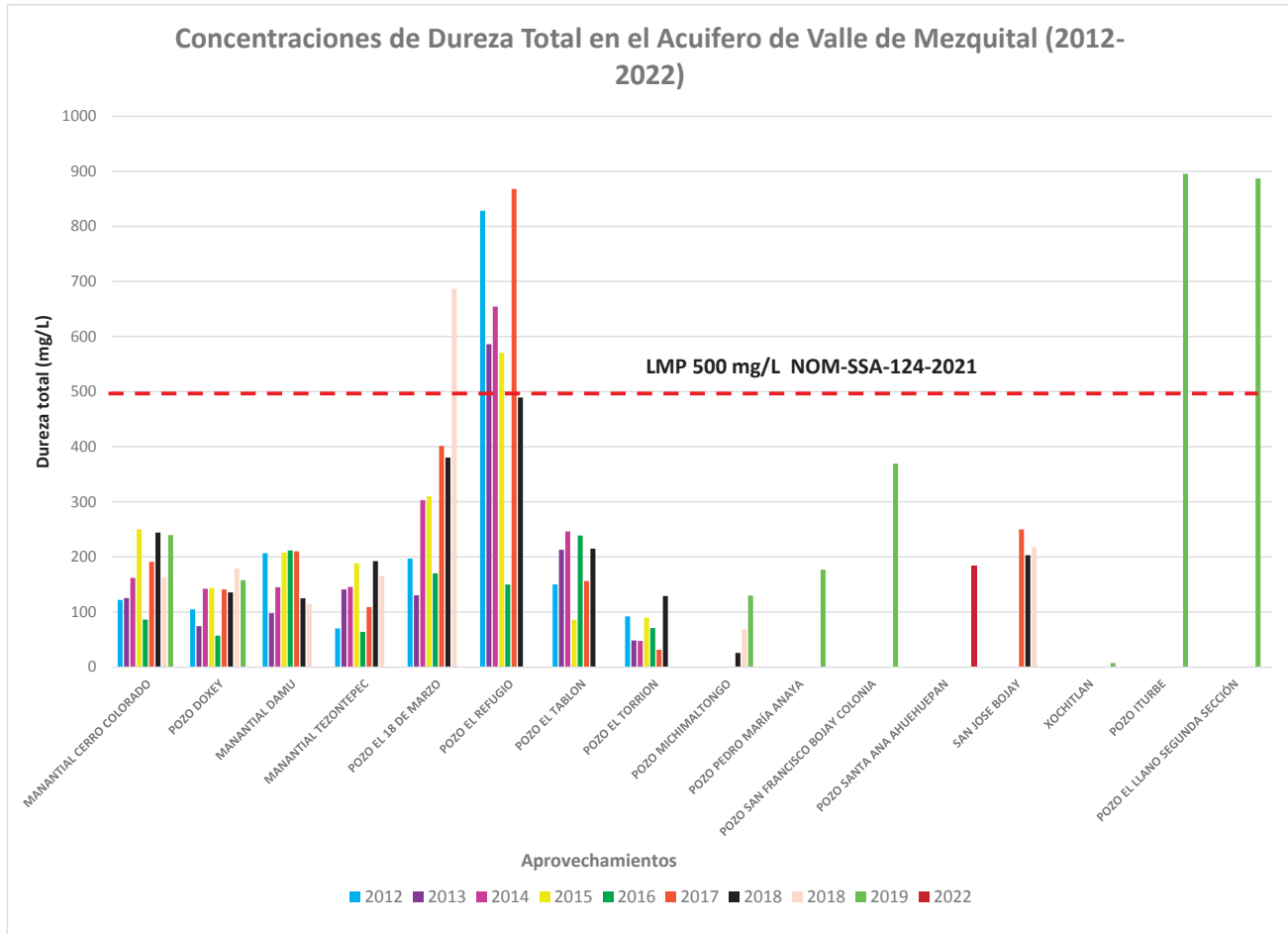


**Figura 7.19 b.** Distribución espacial de las concentraciones de sulfatos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2015, 2016 y 2017).



**Figura 7.19 c.** Distribución espacial de las concentraciones de sulfatos en los aprovechamientos monitoreados de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua del acuífero del Valle del Mezquital (2018 y 2019).

Se puede observar en la Figura 7.20 que los valores de la dureza total presentan un incremento sobre el límite máximo permisible de 500 mg/L referidos en la norma de uso y consumo humano, en los pozos 18 de marzo en el año 2018, en los pozos Iturbe y el Llano segunda sección en 2019 y en el pozo el Refugio en los años de 2012, 2013, 2014, 2015 y 2017.



**Figura 7.20.** Concentración de Dureza total en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022

Se evaluó la alcalinidad total comparando los valores del periodo de 2012 a 2022 con el límite máximo permisible de los criterios ecológicos de calidad del agua para uso de agua potable de 400 mg/L. En los manantiales Damu, Tezontepec y Cerro colorado se puede observar que se supera el límite de 400 mg/L en los años 2012, 2013 y 2016 para el primero, 2013, 2014, 2015, 2016 en el segundo y 2012, 2013, 2019 y 2022 en el tercero. También se puede observar en varios de los pozos se supera el límite de 400 mg/L como en los pozos el Tablón en los años 2012 y 2018 y Doxey 2019, Francisco Bojay Colonia, Iturbe, El Llano segunda sección en los años 2019 y 2022 (Figura 7.21).

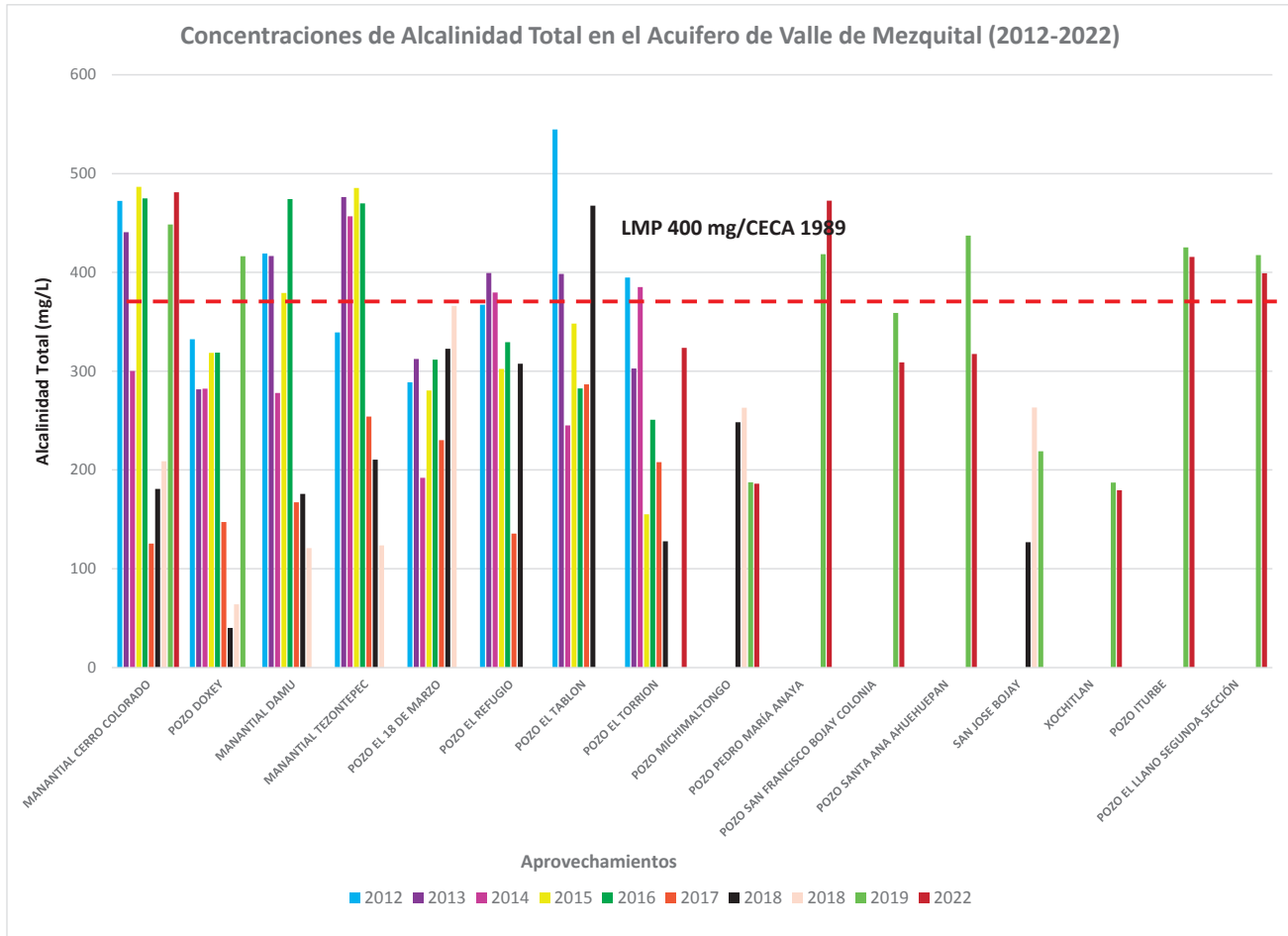
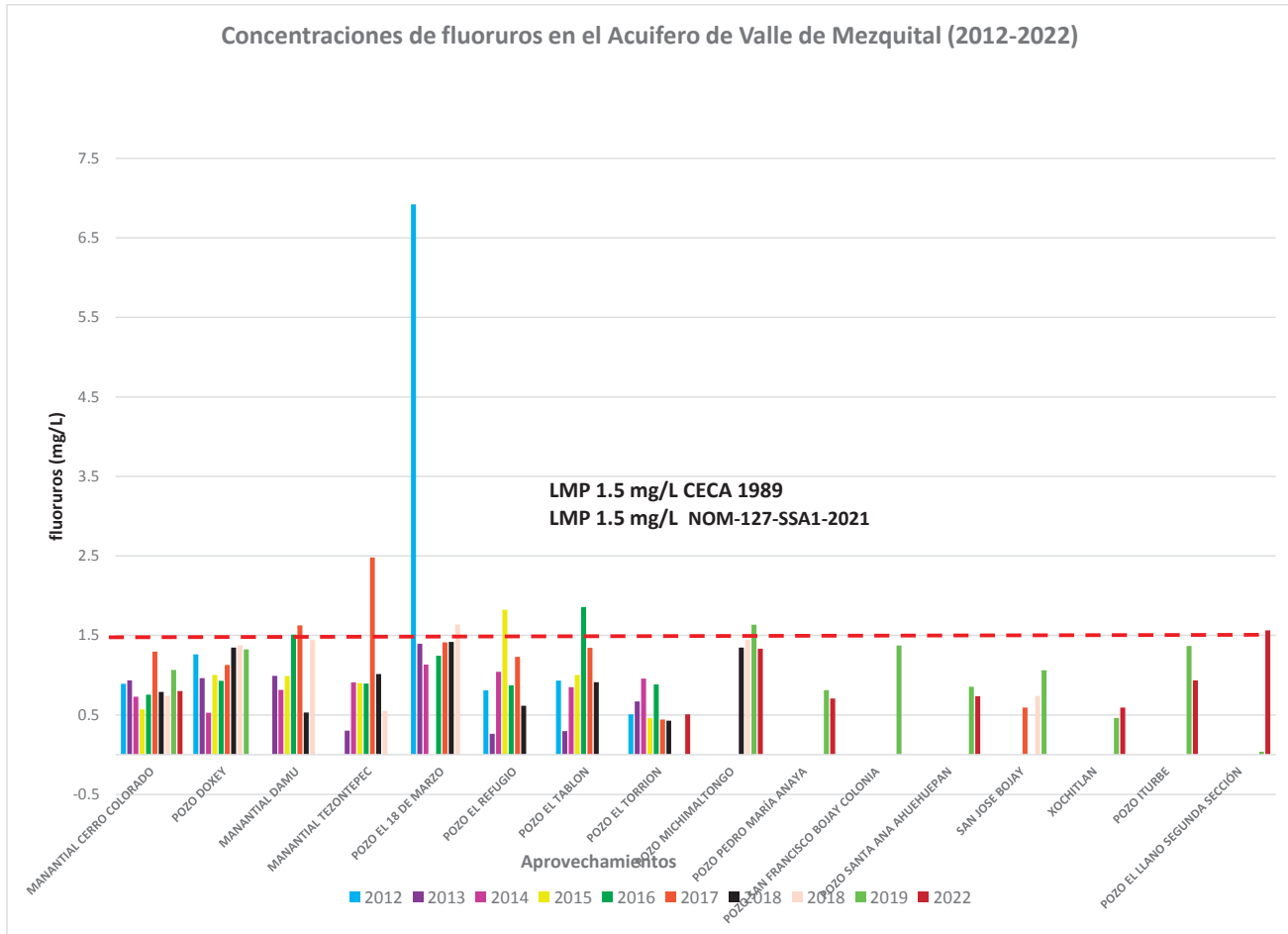


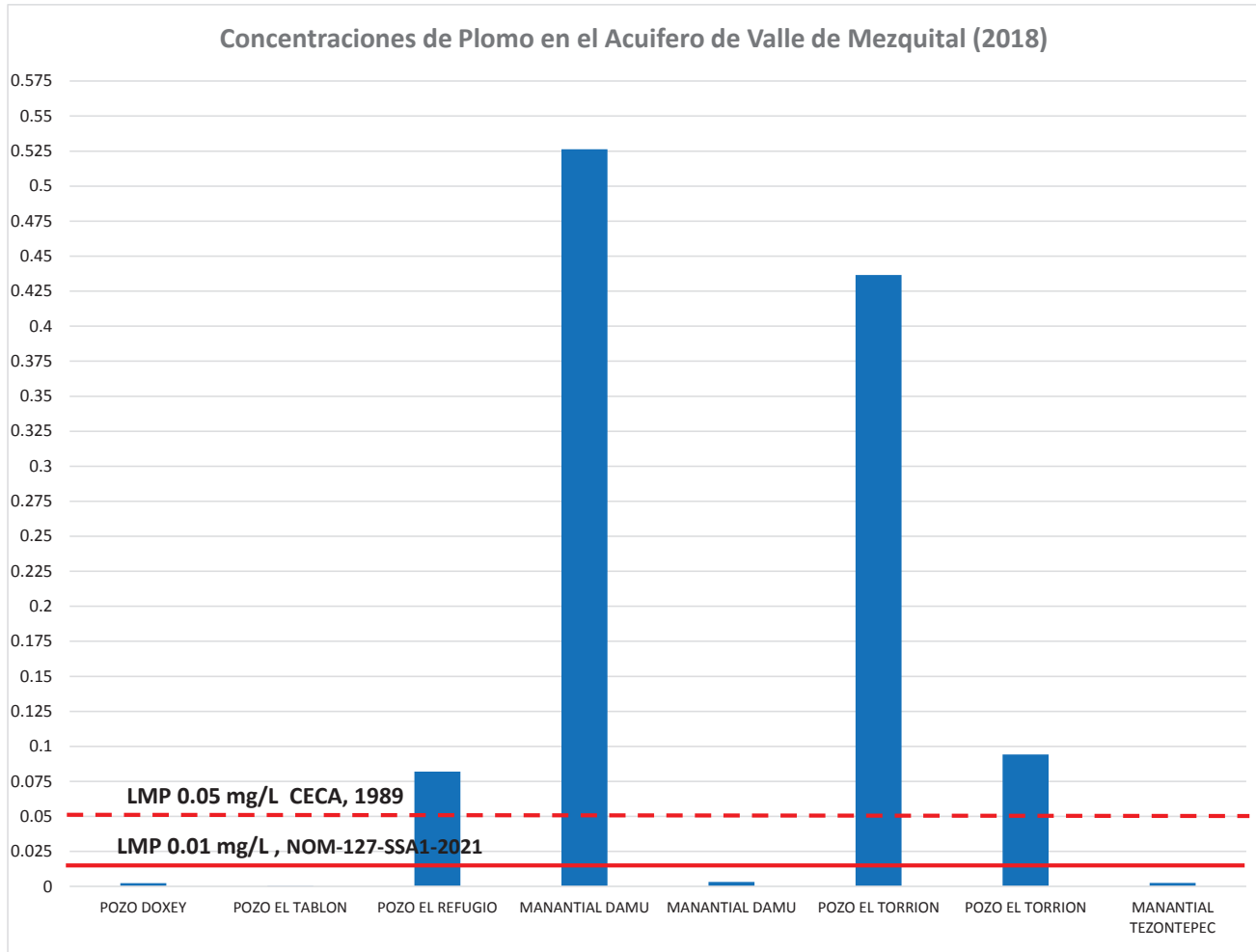
Figura 7.21. Concentración de Alcalinidad total en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022

Se puede observar en la Figura 7.22 como algunos pozos y manantiales sobrepasan el valor límite máximo de 1.5 mg/L citado en los criterios ecológicos con uso de abastecimiento para agua potable y la norma de uso y consumo humano. Los manantiales Damu y Tezontepec en 2017, los pozos como el 18 de marzo en 2012 y 2018, el Refugio en 2015, el Tablón en 2016, el Michimaltongo en 2019 y el pozo el Llano segunda sección en 2022.



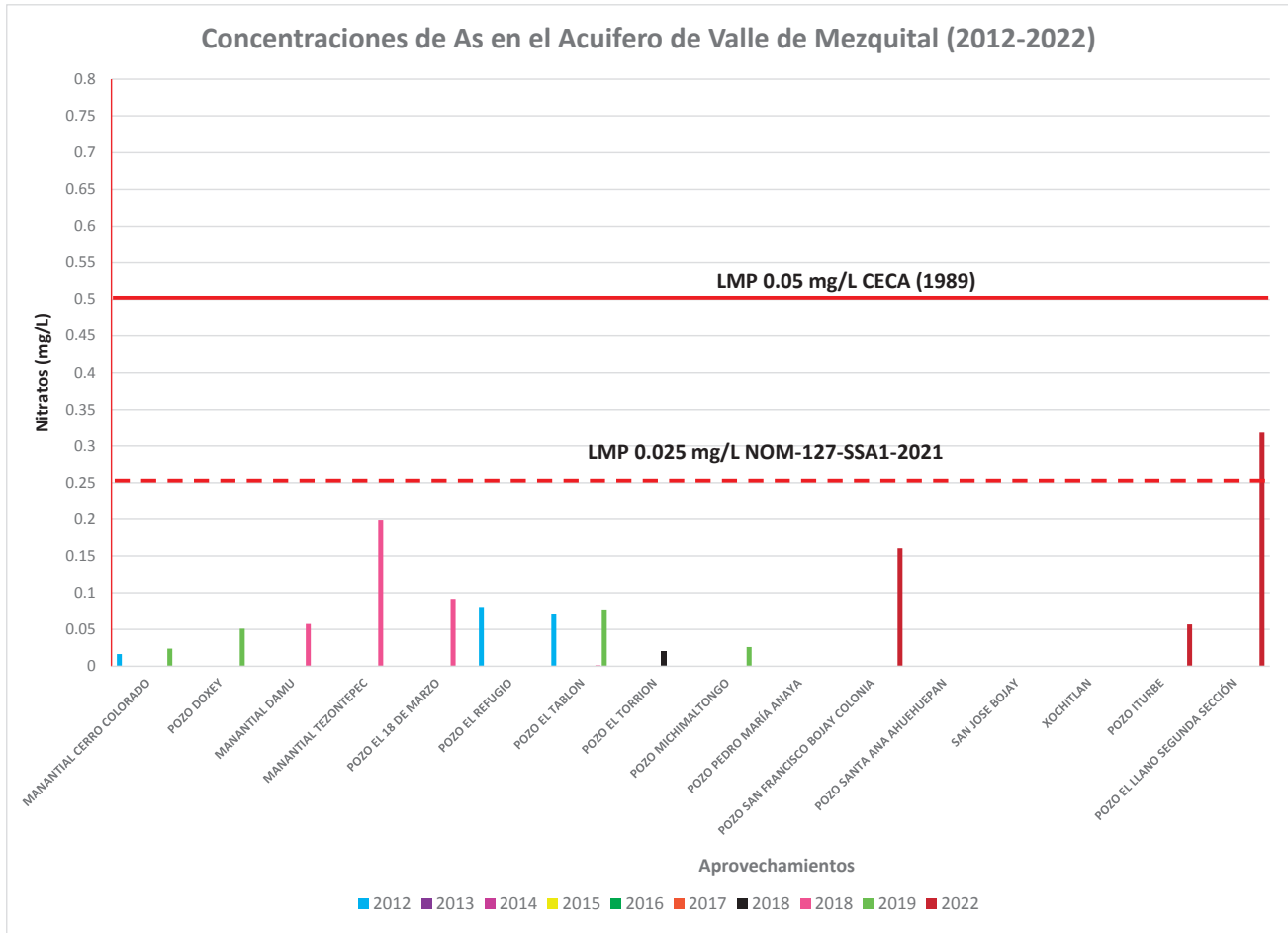
**Figura 7.22.** Concentración de fluoruros en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022

Se puede observar la presencia de plomo en tres de los aprovechamientos en los Pozos Doxey, el Tablón, el Refugio, Damu, El Torreón y el Tezontepec en 2018 todos por arriba del límite de 0.01 mg/L referido en la norma de uso y consumo humano y 0.05 mg/L de los criterios ecológicos como agua de abastecimiento (Figura 7.23). Así mismo se puede observar la presencia de arsénico (Figura 7.24) como el Pozo El Tablón en 2012, en los manantiales Tezontepec, Damu y en pozos el Torreón, el Tablón y el Refugio en 2018 se observaron por arriba de los límites establecidos, así mismo el manantial Cerro Colorado, los pozos Doxey, 18 de marzo, el Torreón y San José Bojay para 2019 están por arriba de los límites de 0.01 y 0.05 mg/L.



**Figura 7.23.** Concentración de plomo en el acuífero de Valle de Mezquital 2018





**Figura 7.24.** Concentración de arsénico en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022

Los valores de cromo total se registraron en el periodo de evaluación por debajo del límite de detección, solo algunos aprovechamientos presentaron concentraciones detectables en 2018 como los manantiales Cerro Colorado, Damu, los pozos Doxey, Tablón, El Torreón, Tezontepec, San José Bojay; y en 2019 el manantial Cerro colorado, los pozos Doxey, Tablón, San José Bojay y 18 de marzo. En 2022 únicamente el manantial Cerro colorado y el pozo Melchor Ocampo presentaron concentraciones detectables de este metal.

Las determinaciones de coliformes fecales solo se realizaron en algunos aprovechamientos, y en la mayor parte no se detectó presencia, los pozos que presentaron la presencia de estas bacterias fueron el Manantial Cerro colorado en los años 2013, 2014 y 2019 (70, 930, 20 NMP/100 ml), el pozo El Tablón (40 NMP/100 ml) en 2013, El refugio (2400 NMP/100 ml) en 2017, casi todos dentro del rango de 1000 NMP/100 ml, excepto el manantial el Refugio (Figura 7.25).

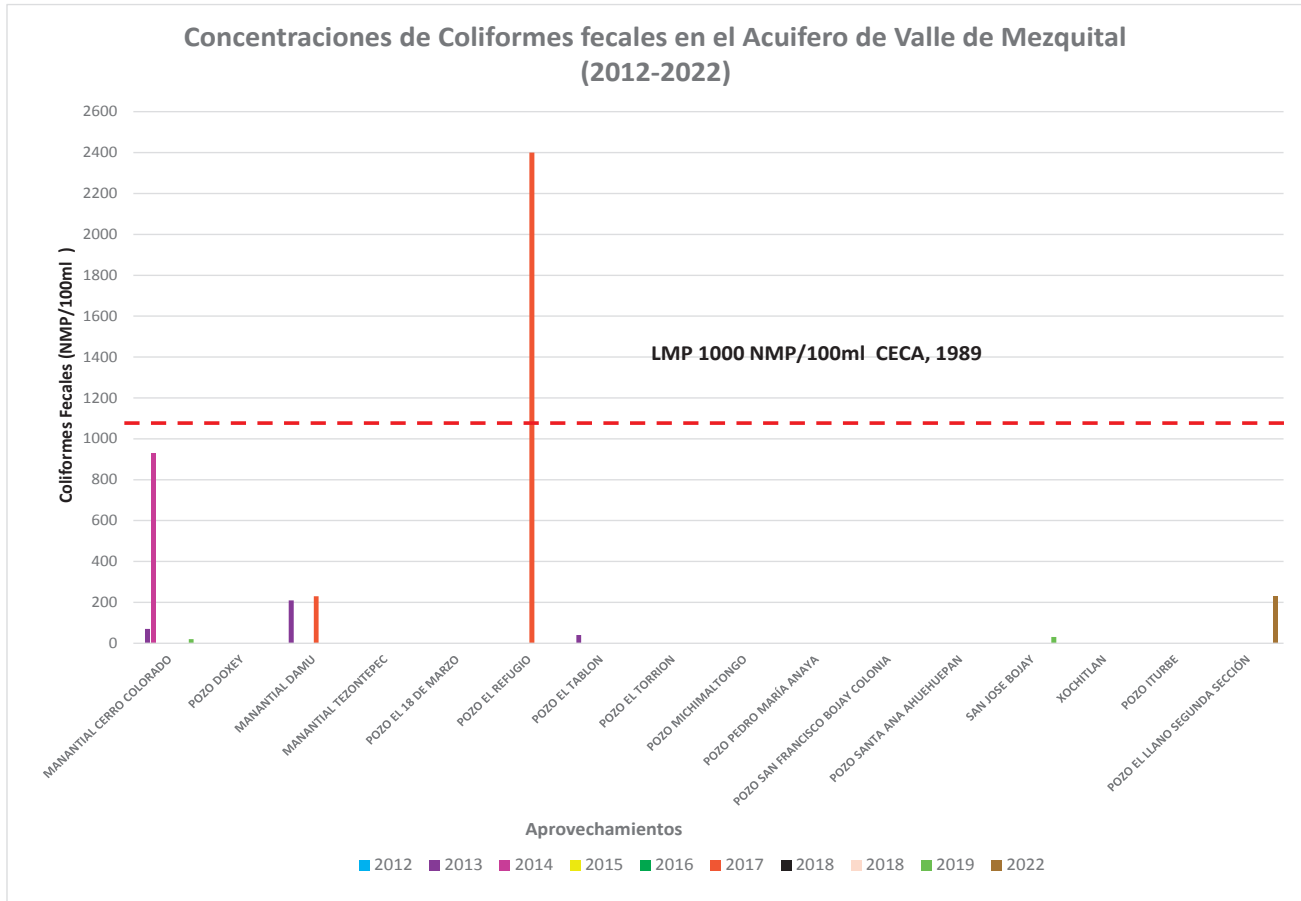


Figura 7.25. Concentración de CF en el acuífero de Valle de Mezquital 2012 al 2022

### Conforme al Índice de Calidad CCME-WQI

La evaluación de calidad del agua se realizó aplicando el índice CCME WQI (CCME, 2001), conforme a los *criterios ecológicos para uso como fuente de abastecimiento de agua potable* (DOF, 1989) en la base de datos conformada por los datos de 2012 a 2019 y los muestreos realizados en 2022 (estiaje y lluvias). El cálculo se realizó utilizando la hoja de cálculo en Excel versión 1.1 (CCME, 2001). Los valores se resumen en 5 clasificaciones de: 95 -100 -Excelente, 0 – 94- Buena; 65 – 79 Regular; 45 – 64 a contaminada; 0 – 44-muy contaminada.

Para el año 2012 se analizaron los resultados de seis aprovechamientos. Los valores del índice para este año presentaron una calidad del agua desde regular a buena. Los parámetros que sobrepasan los límites establecidos para uso de abastecimiento público y que degradan su calidad son los sólidos disueltos totales, nitratos y arsénico.

Para el año 2013 se evaluaron 12 aprovechamientos. La calidad del agua que se observó fue de contaminada a buena. Los parámetros que principalmente sobrepasan los límites para uso de abastecimiento fueron los sólidos disueltos totales, sulfatos, y nitratos.



Nueve aprovechamientos se analizaron en 2014, con calidad de regular a buena. Los sólidos disueltos totales, sulfatos, y nitratos fueron los parámetros que se observaron sobre los límites evaluados de abastecimiento.

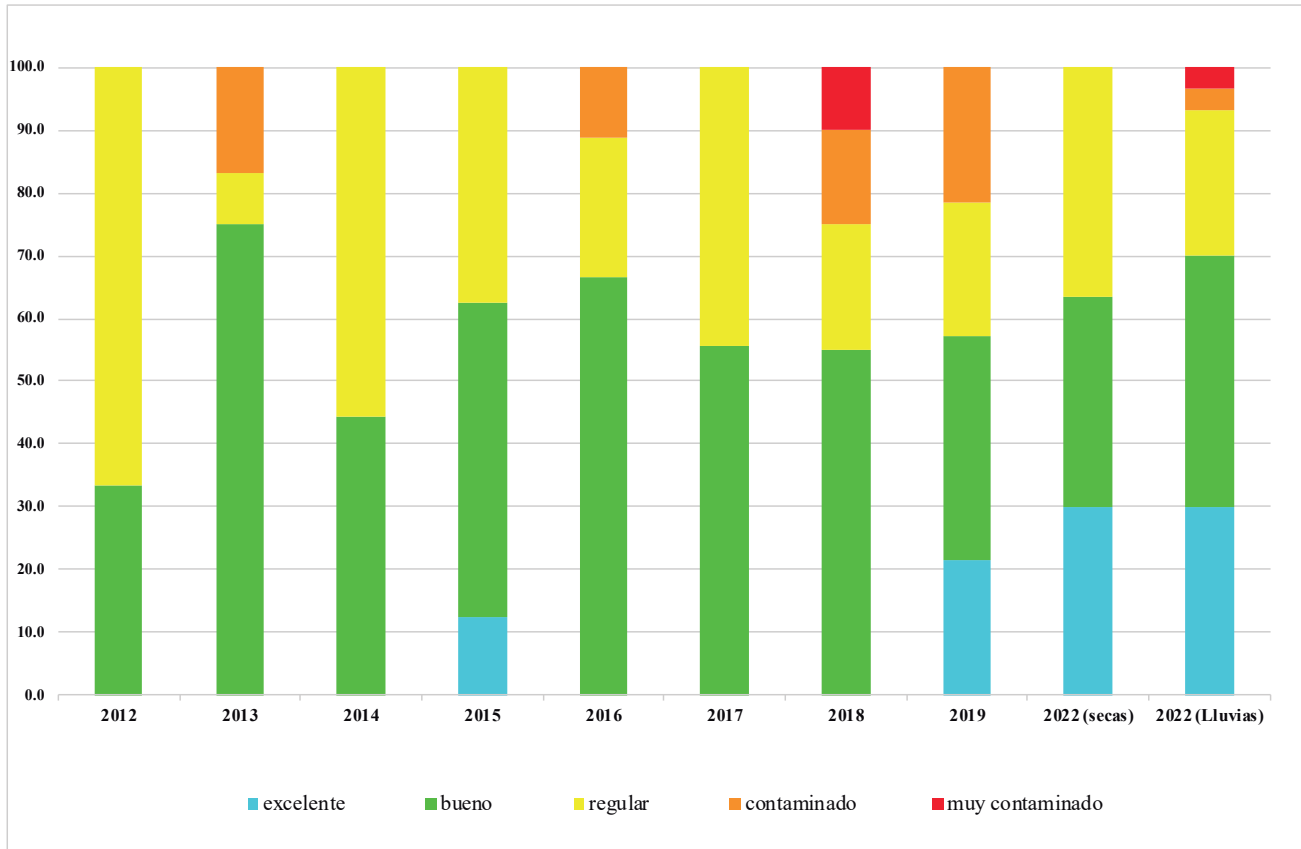
En 2015 se analizaron ocho aprovechamientos. La calidad del agua fue de excelente a regular. Los parámetros de calidad del agua que no cumplen con los límites para uso de abastecimiento fueron sólidos disueltos totales, sulfatos y nitratos.

En 2016 se analizaron nueve aprovechamientos. La calidad del agua que se observó fue de contaminada a buena; los parámetros que sobrepasaron los límites para uso de abastecimiento son los sólidos disueltos totales y nitratos.

Para 2017 se evaluaron nueve aprovechamientos, mismos que presentaron calidad de regular a buena; Los parámetros que sobrepasan los límites máximos permisibles fueron principalmente sólidos disueltos totales, sulfatos; dos aprovechamientos presentaron CF y arsénico.

En 2018 se analizaron veinte aprovechamientos. La clasificación de calidad del agua fue de muy contaminada a buena. Los límites máximos permisibles se exceden en coliformes fecales, sólidos disueltos totales, nitratos, sulfatos, dureza total, sodio, arsénico, plomo, hierro, manganeso y cromo. La calidad del agua en 2019 se evaluó en catorce aprovechamientos. Se clasificó de excelente calidad a contaminada. Los parámetros que sobrepasan los límites máximos permisibles fueron sólidos disueltos totales, sulfatos, sodio, manganeso y arsénico. Para el año 2022 se analizaron 30 aprovechamientos entre pozos y manantiales, estos mostraron en temporada de estiaje calidad del agua regular a excelente, mientras que en temporada de lluvias la calidad fue de muy contaminada a excelente, resaltando que principalmente la calidad del agua para abastecimiento se ve afectada con SDT, nitratos, sulfatos, manganeso, CF y arsénico.

A lo largo de los años analizados se puede observar que el comportamiento de la calidad muestra el aumento en las concentraciones de SDT, nitratos, sulfatos, CF y arsénico.



**Figura 7.26.** Comportamiento de la calidad conforme al índice CCME-WQI de 2012 a 2022.

114

La tendencia de los pozos analizados indica un aumento gradual de los sólidos disueltos totales (SDT), nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y arsénico (As) en 2 de los 6 pozos analizados (2012). En 2013 y 2014 se agrega a estos parámetros la presencia de Sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) en 3 de los 12 pozos. En 2016, se observó la presencia de nitratos y sulfatos en todos los pozos analizados. Para 2017 se agrega a estos parámetros la presencia de coliformes fecales (CF) lo que prevalece hasta el muestreo de 2022 en aproximadamente de un 10% a 20% de los pozos muestreados (SDT,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , CF, As).

El análisis histórico indicó que la tendencia ha sido a partir de la presencia de los sólidos disueltos totales (SDT), nitratos ( $\text{NO}_3$ ), coliformes fecales y arsénico.

## 7.6. Simulación hidrogeoquímica.

Se llevó a cabo un análisis hidrogeoquímico con respecto a las fases minerales relacionadas con los iones presentes y con los parámetros fisicoquímicos de las bases de datos obtenidas de 2017 a 2019 y las campañas de 2022, utilizando el software GWB con la base de datos min-teq.dat, se determinaron los índices de saturación (Tabla 7.5 a la Tabla 7.8).

**Tabla 7.5.** Índices de saturación calculados en el Valle del Mezquital (monitoreo 2017)

	Anhidrita	Calcita	Dolomita	Yeso	Halita	Magnesita
log Q/k						
MANANTIAL CERRO COLORADO	-1.8239	-0.5850	0.1761	-1.7959	-6.3022	-0.7696
POZO DOXEY	-2.3010	-0.4815	0.4771	-2.1249	-6.4943	-0.6778
POZO EL 18 DE MARZO	-1.2840	0.4914	2.3162	-1.3979	-6.5504	0.3617
POZO EL REFUGIO	2.3504	1.6990	4.4377	1.0792	-5.4949	1.8261
MANANTIAL DAMU	-1.2757	0.4150	1.9191	-1.4685	-6.7891	0.0792
POZO EL TORREÓN	-2.3768	-0.9586	-0.5229	-2.2676	-6.9876	-1.1675
MANANTIAL TEZONTEPEC	-1.7696	0.3802	2.0039	-1.8861	-6.1738	0.1461
SAN JOSE BOJAY	-0.7212	0.6721	2.3836	-1.1549	-6.0369	0.4314

**Tabla 7.6.** Índices de saturación calculados en el Valle del Mezquital (monitoreo 2018)

	Anhidrita	Calcita	Dolomita	Yeso	Halita	Magnesita
log Q/k						
MANANTIAL CERRO COLORADO 1	-1.62	-0.31	-0.72	-1.38	-6.47	-2.07
MANANTIAL CERRO COLORADO 2	-1.85	-0.47	-0.82	-1.64	-7.28	-2.02
POZO DOXEY 1	-1.85	-0.01	-0.07	-1.68	-6.65	-1.70
POZO DOXEY 2	-1.70	-0.06	0.26	-1.49	-6.60	-1.32
POZO EL 18 DE MARZO	-1.47	0.04	0.49	-1.28	-6.40	-1.20
POZO EL TABLÓN 2	-1.77	0.40	1.34	-1.54	-6.13	-0.72
POZO EL REFUGIO	-1.19	-0.24	-0.59	-1.00	-6.08	-2.00
MANANTIAL DAMU 1	-2.04	-0.28	-0.39	-1.80	-6.75	-1.77
MANANTIAL DAMU 2	-2.11	-0.17	-0.14	-1.89	-6.99	-1.62
POZO EL TORREÓN 1	-2.44	0.46	0.99	-2.24	-6.91	-1.11
POZO EL TORREÓN 2	-1.92	-0.40	-0.60	-1.74	-6.96	-1.82
POZO BOXFI	-1.42	0.65	1.45	-1.23	-6.39	-0.85
MANANTIAL TEZONTEPEC 1	-1.70	0.00	-0.14	-1.48	-6.45	-1.80
MANANTIAL TEZONTEPEC 2	-1.92	-0.27	0.08	-1.70	-6.29	-1.32
POZO MICHIMALTONGO 1	-2.60	-0.43	-0.59	-2.46	-7.12	-1.77
POZO MICHIMALTONGO 2	-2.18	0.45	1.11	-1.96	-7.05	-1.02
SAN JOSE BOJAY	-1.68	0.56	1.45	-1.49	-6.17	-0.74

**Tabla 7.7.** Índices de saturación calculados Valle del Mezquital (monitoreo 2019)

	Calcita	Magnesita	Mg <sub>2</sub> Cl(OH) <sub>3</sub> ·4H <sub>2</sub> O	MgCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	MgOHCl	MgSO <sub>4</sub> (c)
log Q/K						
XOCHITLÁN	0.38	-0.21	-11.62	-25.01	-13.96	-12.33
EL CHABACANO	0.38	-1.14	-13.06	-25.80	-14.77	-12.24
POZO EL LLANO SEGUNDA SECCIÓN	-0.89	-1.96	-16.17	-24.15	-15.43	-10.40
POZO ITURBE	0.04	-0.96	-14.03	-24.22	-14.74	-10.52
POZO SAN FRANCISCO BOJAY COLONIA	0.04	-0.89	-13.72	-24.46	-14.70	-10.89
POZO MICHIMALTONGO.	-0.17	-0.92	-13.85	-26.19	-15.22	-11.37
POZO SANTA ANA AHUEHUEPAN	0.60	-0.24	-12.09	-24.20	-14.10	-11.21
POZO SANTA MARÍA DAXTHO	0.45	-0.38	-12.50	-24.51	-14.41	-11.55
POZO PEDRO MARÍA ANAYA	0.11	-0.77	-13.47	-24.48	-14.72	-11.36
MANANTIAL CERRO COLORADO	0.38	-0.68	-13.00	-24.70	-14.70	-11.52
POZO DOXEY	-0.04	-1.10	-14.32	-24.92	-15.13	-11.57
POZO EL 18 DE MARZO	0.18	-1.01	-14.05	-24.91	-14.92	-10.89
POZO EL TABLÓN	-0.19	-1.44	-14.70	-24.41	-15.14	-11.80
SAN JOSE BOJAY	0.32	-0.89	-12.23	-24.25	-14.26	-11.77

**Tabla 7.8.** Índices de saturación calculados en el Valle del Mezquital (monitoreo 2022 llluvias)

	Anhidrita	Calcita	Yeso	Halita	Hidromagnesita	Magnesita
log Q/K						
VMEZ-12 (San Francisco Bojay)	-1.54	0.18	-1.34	-6.39	-14.24	-0.82
Presa Endhó (Tula)	-2.29	0.49	-2.10	-6.43	-11.04	-0.28
VMEZ-10 (Santa María Michimalton)	-2.03	0.28	-1.89	-7.72	-11.08	-0.41
VMEZ-08 (La Loma)	-3.22	0.28	-3.08	-8.70	-10.96	-0.41
VMEZ-7A (Nanzha)	-2.51	0.20	-2.33	-8.00	-12.87	-0.68
VMEZ-19 (San Lucas Teacalco)	-1.66	-0.51	-1.48	-6.79	-17.89	-1.46
El Llano primera sección	-1.55	0.15	-1.36	-6.68	-14.96	-0.96
VMEZ-90 (San José Ajoculco)	-2.59	0.11	-2.39	-6.90	-11.96	-0.44
VMEZ-95 (Paseos de la pradera)	-2.54	0.41	-2.36	-7.54	-10.14	-0.12
MZ-326 (El Refugio)	-1.10	-0.05	-0.89	-5.82	-16.03	-1.14



	Anhidrita	Calcita	Yeso	Halita	Hidromagnesita	Magnesita
log Q/K						
VMEZ-78 (Tlamaco)	-1.89	0.36	-1.70	-6.69	-12.28	-0.51
VMEZ-73 (Col. Dendho)	-0.77	-0.17	-0.59	-6.04	-16.51	-1.42
VMEZ-85 (Bojay 2)	-1.64	0.45	-1.44	-5.68	-12.17	-0.39
VMEZ-106 (Xochitlan)	-2.28	0.28	-2.10	-5.96	-11.31	-0.34
MZ-3B (Manantial Progreso)	-2.16	0.20	-1.96	-6.00	-10.64	-0.11
VMEZ-109 (Galeria Tezontepec)	-1.68	0.43	-1.52	-6.82	-10.92	-0.26
VMEZ-108 (Manantial Tezontepec)	-1.85	0.46	-1.64	-6.07	-10.60	-0.13
VMEZ-49 (Col. Cuahutemoc)	-1.92	0.23	-1.70	-6.07	-13.60	-0.68
Pozo MiraValle (Tlahuelilpan)	-1.77	0.11	-1.59	-6.04	-12.81	-0.57
VMEZ-62 (San José piedra gorda)	-3.64	-1.52	-3.48	-6.50	-22.01	-2.32
VMEZ-55 (Barracas)	-3.07	0.11	-2.89	-8.48	-12.86	-0.68
VMEZ-59 (Dos Peñas)	-2.37	0.20	-2.18	-6.65	-11.66	-0.41
VMEZ-56 (Tlaxinacalpan)	-3.30	0.18	-3.16	-8.46	-13.44	-1.00
Pozo El Caracol	-3.16	0.30	-2.96	-8.49	-12.06	-0.57
VMEZ-64 (Santa Ana)	-2.74	0.04	-2.54	-8.51	-14.11	-0.85
VMEZ-103 (Manantial El Banco)	-3.75	0.57	-3.53	-9.16	-11.80	-0.46
VMEZ-80 (Teltipan de Juárez)	-1.82	0.15	-1.62	-5.96	-13.82	-0.72
MZ-312 (Tlaxcoapan)	-1.89	0.11	-1.66	-5.85	-13.89	-0.72
VMEZ-29 (Hueypoxtla)	-2.64	0.11	-2.48	-6.20	-15.24	-1.17
VMEZ-33 (Noria)	-2.82	0.30	-2.62	-8.22	-13.70	-0.82



Como resultado se obtienen los minerales que dan origen a los solutos y su correspondiente condición hidrogeoquímica (disuelto o precipitado) de acuerdo con los parámetros obtenidos para cada muestra. Este análisis se realizó para los años 2017 a 2019 y en todas las muestras de 2022. La información iónica utilizada para la modelación tuvo un porcentaje de error en el balance iónico de cargas menor al 5 %, lo cual indica verosimilitud en los resultados de la modelación.





# 8. MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA E INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA

## 8.1. Monitoreo de aprovechamientos

Se realizó un monitoreo de la calidad del agua subterránea de 30 pozos distribuidos en el acuífero Valle del Mezquital y en la presa Endhó. Los pozos se seleccionaron con base en la información recopilada para realizar un análisis de la variabilidad histórica de calidad del agua (Tabla 8.1 y Figura 8.1). Los puntos muestreados se seleccionaron para verificar y comparar la tendencia y evolución de la calidad del agua que ha llevado el acuífero.

Para el monitoreo de calidad del agua se consideró la medición de parámetros de campo y toma de muestras para el análisis en laboratorio de parámetros fisicoquímicos, cationes y aniones y microbiológicos (coliformes fecales y totales). Las muestras de agua se recolectaron siguiendo los procedimientos expuestos en la norma NOM-230-SSA1-2002 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo (DOF 2003).

**Tabla 8.1.** Aprovechamientos considerados para la evaluación de calidad del agua 2022 (estiaje y lluvias)

ID	No.	TIPO	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD
1	V MEZ-7A	POZO	TULA	20° 03' 15.8094" N	99° 22' 00.1441" W
2	V MEZ-1	POZO	TEPETITLÁN	20° 11' 57" N	99° 23' 51" W
3	V MEZ-33	NORIA	TEQUIXQUIAC	19° 56' 47.448" N	99° 08' 12.49" W
4	V MEZ-10	POZO	TULA	20° 06' 42.7590" N	99° 23' 11.9519" W
5	V MEZ-103	MANANTIAL	TEPEJI DEL RÍO	19° 57' 41.4" N	99° 27' 27.3240" W
6	V MEZ-95	POZO	ATOTONILCO	19° 53' 32" N	99° 14' 01" W
7	V MEZ-109	GALERÍA	TEZONTEPEC	20° 10' 59.75" N	99° 18' 47.95" W
8	V MEZ-106	POZO	PROGRESO	20° 17' 59.74" N	99° 10' 54.16" W
9	V MEZ-71	POZO	ATITALAQUIA	20° 04' 3.177" N	99° 3' 18.7287" W
10	V MEZ-64	POZO	TEPEJI DEL RÍO	19° 57' 01.6452" N	99° 23' 01.9284" W
11	V MEZ-90	POZO	ATOTONILCO	19° 58' 23" N	99° 18' 18" W
12	V MEZ-85	POZO	ATITALAQUIA	20° 02' 45" N	99° 12' 18" W
13	V MEZ-49	POZO	TLAHUELILPAN	20° 08' 14.0183" N	99° 14' 30.7881" W
14	V MEZ-41	POZO	TULA	20° 04' 7.3068" N	99° 19' 7.8293" W
15	V MEZ-59	POZO	TEPEJI DEL RÍO	19° 55' 27.5520" N	99° 17' 42.5148" W
16	V MEZ-54	POZO	TEPEJI DEL RÍO	19° 52' 9.0152" N	99° 20' 56.49" W
17	MZ-21	POZO	MIXQUIAHUALA	20° 09' 13" N	99° 20' 58" W
18	MZ-424	NORIA		20° 06' 29" N	99° 16' 49" W
19	MZ-27	POZO		20° 19' 30" N	99° 15' 38" W
20	IN-4	POZO	FCO. I. MADERO	20° 14' 10" N	99° 01' 37" W
21	MZ-326	POZO	ATOTONILCO	20° 00' 32" N	99° 11' 22" W
22	MZ-312	POZO	TLAXCOAPAN	20° 04' 30" N	99° 11' 51" W
23	AJ-1	POZO	TETEPANGO	20° 06' 12" N	99° 09' 17" W
24	MZ-3B	Manantial		20° 03' 30" N	99° 16' 07" W
25	AJ-12	POZO	AJACUBA	20° 08' 22" N	99° 06' 13" W
26	IN-13-BIS	POZO	San Salvador	20° 10' 17.50" N	99° 19' 44.40" W
27	MZ-1	POZO	Mixquiahuala	20° 11' 24.00" N	99° 10' 5.00" W
28	MZ-301	POZO	Tlahuelilpan	20° 7' 53.00" N	99° 12' 19.00" W
29	FIP-183-BIS	POZO	Mixquiahuala	20° 15' 48.00" N	99° 8' 42.70" W
30	FIP-176	POZO	Fco. y Madero	20° 13' 26.10" N	99° 5' 2.90" W

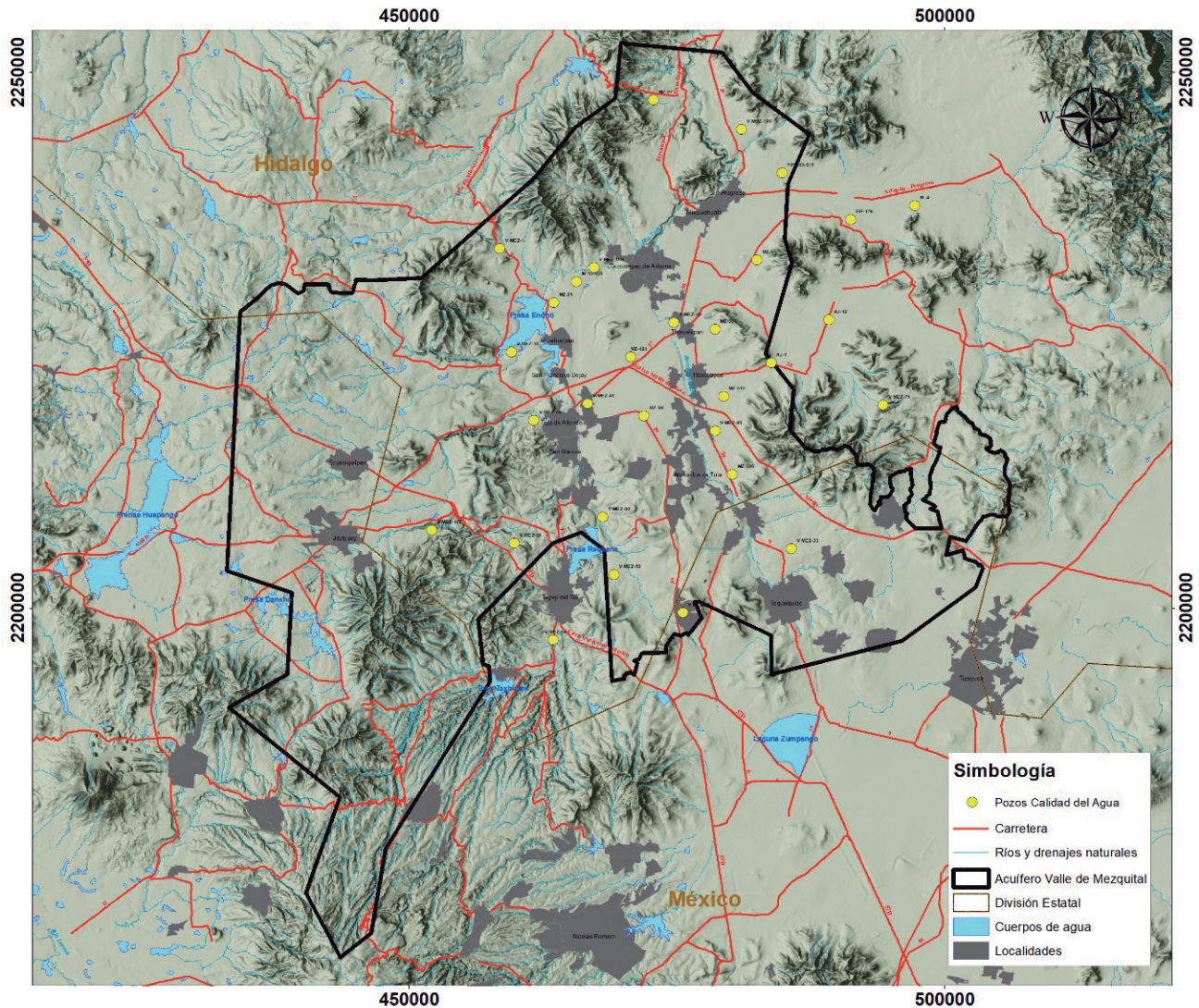


Figura 8.1. Ubicación de los pozos monitoreados en las campañas de 2022.

## 8.2. Evaluación de la calidad del agua

La evaluación de la calidad del agua se llevó a cabo considerando los criterios para uso y consumo humanos establecidos en la NOM-SSA-127-2021 (DOF, 2022) y los criterios ecológicos de Calidad del Agua para uso como fuente de agua potable en los treinta aprovechamientos (CECA, 1989). La temperatura se encontró en un rango en estiaje de 21 a 32 °C con un promedio de 25.6°C, mientras que en lluvias el rango fue de 20 a 29°C con un promedio de 24.1°C. El pH del agua de los manantiales presentó un rango que oscila de 6.1 a 8.3 con un promedio de 7.3 en época de estiaje y un valor mínimo de 6.2 y máximo de 8.1 en época de lluvias con un promedio de 7.3, valores que lo muestran dentro de la clasificación de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Al compararlo con los criterios ecológicos este se encuentra dentro del rango establecido de 5 a 9 unidades de pH (Tabla 8.2 y la Tabla 8.4).

En el caso de los sólidos disueltos totales (SDT) en época de estiaje tienen un valor promedio de 822 mg/L, con un valor mínimo de 174 mg/L y un valor máximo de 2094 mg/L, mientras que en lluvias 110 a 2298 mg/L y un promedio 812.4 mg/L. En temporada de estiaje, los aprovechamientos que no cumplen el criterio de 1000 mg/L de la norma son VMEZ12, VMEZ19, VMEZ78, VMEZ73, VMEZ106, VMEZ108, VMEZ49, VMEZ80, El llano primera sección, MZ-326, MZ3B, Pozo MiraValle, MZ-312, mientras que VMEZ12, VMEZ19, VMEZ78, VMEZ73, VMEZ106, VMEZ108, VMEZ49, VMEZ80, El llano primera sección, MZ-326, MZ3B, Pozo MiraValle, MZ-312, Presa Endó, VMEZ90, VMEZ109, VMEZ62, VMEZ59 y VMEZ29 no cumplen los criterios ecológicos para uso de agua potable de 500 mg/L.

Para temporada de lluvias aprovechamientos que no cumplen el criterio de 1000 mg/L de la norma son VMEZ12, VMEZ73, VMEZ106, VMEZ108, VMEZ12, VMEZ19, VMEZ78, VMEZ73, VMEZ106, VMEZ108, VMEZ49, VMEZ80, El llano primera sección, MZ-326, MZ3B, Pozo MiraValle, MZ-312, mientras que VMEZ12, VMEZ19, VMEZ78, VMEZ73, VMEZ106, VMEZ108, VMEZ49, VMEZ80, El llano primera sección, MZ-326, MZ3B, Pozo MiraValle, MZ-312, Presa Endó, VMEZ90, VMEZ109, VMEZ62, VMEZ59, VMEZ29 y VMEZ85 no cumplen los criterios ecológicos para uso de agua potable de 500 mg/L.

La concentración de sulfato varía de 0 a 1179 mg/L con un promedio 182 mg/L en la época de estiaje, mientras que en época de lluvias el rango varía de 4 a 1308 mg/L. Los pozos MZ-326 (El Refugio), VMEZ-78 (Tlamaco) y VMEZ-73 (Col. Dendhó) superan en temporada de estiaje los límites de 400 mg/L de la Norma y 500 mg/L de los criterios ecológicos.

122

La dureza total durante la época de estiaje se presentó en un rango de 39.4 a 894 mg/L con un promedio de 347.5 mg/L los pozos que superan los 500 mg/L son VMEZ-12 (San Francisco Bojay), VMEZ-19 (San Lucas Teacalco), El llano primera sección, MZ-326 (El Refugio), VMEZ-78 (Tlamaco), VMEZ-73 (Col. Dendhó) y VMEZ-85 (Bojay 2); en lluvias se presentó un valor promedio de 339.8 mg/L con un valor mínimo de 32.6 a 339.8 mg/L.

En el caso de los nitratos, estos juegan un papel importante en la aparición de enfermedades como la metahemoglobinemia en infantes. Su presencia se relaciona con actividades antropogénicas, tales como la agricultura, descargas de aguas residuales, fuga e infiltración de drenajes urbanos (Yu *et al.*, 2022). Las concentraciones de nitratos se observaron en el mes de marzo entre 0 y 141 mg/L, con un promedio de 13.1 mg/l, mientras que, para octubre, los valores se encuentran entre 0.2 y 19 6 mg/L, con 8.5 mg/L de promedio. Durante la época de estiaje los pozos que no cumplen con el criterio de la norma mexicana de 11 mg/L son MZ-326 (El Refugio), VMEZ-85 (Bojay 2), VMEZ-106 (Xochitlán), MZ-3B (Manantial Progreso), VMEZ-108 (Manantial Tezontepec), VMEZ-49 (Col. Cuauhtémoc), pozo MiraValle (Tlahuelilpan), VMEZ-80 (Teltipán de Juárez) y MZ-312 (Tlaxcoapan) y VMEZ-12 (San Francisco Bojay). Los pozos que no cumplen el límite de 5 mg/L establecido en los criterios ecológicos son MZ-326 (El Refugio), VMEZ-85 (Bojay 2), VMEZ-106 (Xochitlán), MZ-3B (Manantial Progreso), VMEZ-108 (Manantial



Tezontepec), VMEZ-49 (Col. Cuauhtémoc), pozo MiraValle (Tlahuelilpan), VMEZ-80 (Teltipán de Juárez), MZ-312 (Tlaxcoapan), VMEZ19, El Llano, VMEZ73, VMEZ59, VMEZ82 y VMEZ33. En época de lluvias, los pozos que sobrepasan el límite máximo permisible de la norma de nitratos de 11 mg/l son: El Llano, primera sección, MZ-326 (El Refugio), VMEZ-85 (Bojay 2), MZ-3B (Manantial Progreso), VMEZ-108 (Manantial Tezontepec), VMEZ-49 (Col. Cuauhtémoc), Pozo MiraValle (Tlahuelilpan), VMEZ-59 (Dos Peñas), VMEZ-80 (Teltipán de Juárez), VMEZ-12 (San Francisco Bojay) y MZ-312 (Tlaxcoapan). Los aprovechamientos que no cumplen el valor de 5 mg/L de los criterios ecológicos son El Llano, primera sección, MZ-326 (El Refugio), VMEZ-85 (Bojay 2), MZ-3B (Manantial Progreso), VMEZ-108 (Manantial Tezontepec), VMEZ-49 (Col. Cuauhtémoc), Pozo MiraValle (Tlahuelilpan), VMEZ-59 (Dos Peñas), VMEZ-80 (Teltipán de Juárez), VMEZ-12 (San Francisco Bojay), Z-312 (Tlaxcoapan), VMEZ109, VMEZ93, VMEZ59 y VMEZ33.

En estiaje, los valores observados en la presa Endhó (Tula) y los pozos VMEZ-19 (San Lucas Teacalco), VMEZ-73 (Col. Dendhó), pozo El Caracol, mostraron la presencia de coliformes fecales en estiaje, mientras que lluvias, la presa Endhó (Tula) y los aprovechamientos VMEZ-33 (Noria), VMEZ-103 (manantial El Banco), VMEZ-62 (San José Piedra Gorda) y VMEZ-64 (Santa Ana) en época de lluvias, la presa Endhó es la que presentó las concentraciones más altas de estas bacterias. La presa Endhó no cumple con el límite de 1000 NMP/100 ml establecido en los criterios ecológicos como uso de fuente de abastecimiento en ambas temporadas muestreadas (estiaje y lluvias). Los coliformes fecales (CF) están considerados como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua destinada al consumo humano. Los niveles altos de CF se asocian con un riesgo elevado a la salud por el contacto y/o consumo del agua, debido a que su presencia está relacionada con enfermedades como la gastroenteritis, la disentería, la fiebre tifoidea, y la hepatitis A.

Se analizaron As, Ba, Fe, Sr, B, Zn, Pb, Cr, Co, Cu, Mo, Bi, Sb, Se, Sn y Ti durante las dos campañas. Casi todos estos valores se reportaron por debajo del límite de detección del método analítico utilizado. Se encontraron concentraciones detectables de As, Fe, Mn, F, casi todos por debajo de los límites máximos permisibles en los criterios ecológicos de agua potable y de consumo humano de la norma 127. Los aprovechamientos VMEZ-12 (San Francisco Bojay), VMEZ-19 (San Lucas Teacalco), El Llano primera sección, MZ-326 (El Refugio), VMEZ-78 (Tlamaco) y VMEZ-73 (Col. Dendhó) exceden el límite de la norma mexicana para arsénico de 0.025mg/L y el de 0.05 de los criterios ecológicos para fuente de abastecimiento. La exposición prolongada al arsénico a través del consumo de agua y alimentos contaminados puede causar cáncer y lesiones cutáneas. También se ha asociado a enfermedades cardiovasculares y diabetes. La exposición intrauterina y en la primera infancia se ha relacionado con efectos negativos en el desarrollo cognitivo y un aumento de la mortalidad en jóvenes adultos.

Los aprovechamientos que superan el límite de manganeso de 0.15 mg/L de la norma y 0.10 mg/l de los criterios ecológicos son los pozos VMEZ-19 (San Lucas Teacalco) y VMEZ-62 (San José Piedra Gorda). Y VMEZ-19 (San Lucas Teacalco) y VMEZ-62 (San José Piedra Gorda)



sobrepasan el límite de la norma 127 y de los criterios ecológicos de hierro de (0.3 mg/L). El manganeso no presenta riesgos para la salud en las concentraciones en las que se encuentra en el agua subterránea, pero se ha descubierto que beber agua con altos niveles puede dañar el desarrollo del cerebro en bebés y niños pequeños, afectando la memoria, atención o problemas motores a través del consumo de agua potable.

**Tabla 8.1.** Resultados fisicoquímicos, elementos potencialmente tóxicos y microbiológicos de los aprovechamientos muestreados en temporada de estiaje (marzo) 2022.

Aprovechamientos muestreados	Temp.	pH	SDT	N-NO2	N-NO3	Mg	SO4	Dureza total	Ca	Na	HCO3	K	Mn	As	Pb	Fe	Cr	Zn	F	Sr	Coliformes fecales	Coliformes totales
	°C	unid.																			UFC/100 mL	UFC/100 mL
NOM-SSA-127-2021		6.5-8.5	1000	0.9	11		400	500					0.15	0.025	0.01	0.3	0.05				ausencia	
CECA -Agua Potable		5-9	500	20	5		500						0.10	0.05	0.05	0.3	0.05	5			1000	
VMEZ-12 (San Francisco Bojay)	23	7	1074	<0.010	16	36.96	290	507	140.8	136.57	434	30.69	<0.050	0.1453	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	3.14	<3	<3	<3
Presa Endhó (Tula)	23	8.3	724	<0.010	0	27.28	116	264	59.18	165.06	515	26.73	0.21	0.0085	<0.0050	0.17	<0.0050	<0.10	0.71	<3	75000	75000
VMEZ-10 (Santa María Michimalton)	28	7.7	444	<0.010	2.62	23.21	132	190	38.39	47.87	212	18.76	<0.050	0.0050	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.59	<3	<3	<3
VMEZ-08 (La Loma)	30	7.8	234	<0.010	1.72	13.42	16	110	22.33	31.78	216	8.62	<0.050	0.0031	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.19	<3	<3	<3
VMEZ-7A (Nanzha)	25	7.5	398	<0.010	4.22	16.06	40.5	183	45.76	38.64	275	21.67	<0.050	0.0032	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.38	43	<3	<3
VMEZ-19 (San Lucas Teacalco)	28	6.3	1458	<0.010	141	50.49	361	735	211.75	242.55	758	27.17	0.171	0.0741	<0.0050	0.76	<0.0050	<0.10	3.39	<3	43	43
El Llano primera sección	23	6.9	1054	<0.010	16.6	36.96	265	631	187.83	83.04	472	35.64	<0.050	0.0195	<0.0050	0.12	<0.0050	<0.10	3.99	<3	<3	<3
VMEZ-90 (San José Ajoculco)	24	7.3	504	<0.010	4.44	27.17	47	212	39.05	99.12	403	16.01	<0.050	0.0055	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.81	<3	<3	<3
VMEZ-95 (Paseos de la pradera)	27	7.6	418	<0.010	2.8	33.99	47.7	240	39.82	63.67	386	9.15	<0.050	0.0023	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.38	<3	<3	<3
MZ-326 (El Refugio)	24	7	1842	<0.010	17.1	44.55	689	693	198.83	297.88	458	63.53	<0.050	0.1116	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	4.22	<3	<3	<3
VMEZ-78 (Tlamanca)	28	7.3	1054	<0.010	4.51	32.01	493	504	141.08	116.05	245	24.2	<0.050	0.0917	<0.0050	0.16	0.0071	<0.10	2.82	23	<3	<3
VMEZ-73 (Col. Dendhó)	27	7	2094	<0.010	7.76	60.78	1179	894	247.23	311.74	253	42.46	<0.050	0.0855	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	5.48	<3	23	23
VMEZ-85 (Bojay 2)	25	7	1410	<0.010	16.2	52.25	283	135	175.45	254.1	648	21.78	<0.050	0.0219	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	3.12	<3	<3	<3
VMEZ-106 (Xochitlán)	27	7.5	1006	<0.010	14.4	20.57	148	168	31.24	308.11	517	19.25	<0.050	0.0119	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.57	<3	<3	<3
MZ-3B (Manantial Progreso)	23	7.3	1056	<0.010	19.3	76.73	156	468	55.99	230.01	615	31.24	<0.050	0.0232	<0.0050	0.13	<0.0050	<0.10	1.7	<3	<3	<3
VMEZ-109 (Galería Tezontepec)	27	7.4	804	<0.010	8.96	49.61	191	482	105.6	66.32	375	19.58	<0.050	0.0040	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	1.08	<3	<3	<3
VMEZ-108 (Manantial Tezontepec)	25	7.3	1050	<0.010	18.4	61.05	185	480	84.04	191.9	582	33.99	<0.050	0.0207	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	2.08	<3	9	9



Aprovechamientos muestrados	Temp.	pH	SDT	N-NO2	N-NO3	Mg	SO4	Dureza total	Ca	Na	HCO3	K	Mn	As	Pb	Fe	Cr	Zn	F	Sr	Coliformes		
	°C																				unid.	Coliformes fecales	Coliformes totales
mg/L																							
NOM-SSA-127-2021		6.5-8.5	1000	0.9	11		400	500					0.15	0.025	0.01	0.3	0.05					ausencia	
CECA-Agua Potable		5-9	500	20	5		500						0.10	0.05	0.05	0.3	0.05	5				1000	
VMEZ-49 (Col. Cuauhtémoc)	23	7.1	1074	<0.010	16.9	39.27	136	427	99.55	203.56	595	28.27	<0.050	0.0214	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	2.48	<3	<3	<3	<3
Pozo MiraValle (Tlahuelilpan)	26	7.1	1162	<0.010	17.2	50.88	192	502	108.08	192.83	547	32.23	<0.050	0.0188	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	2.55	<3	<3	<3	<3
VMEZ-62 (San José piedra gorda)	27	6.1	526	<0.010	0.184	13.09	3	325	29.48	105.96	267	19.2	0.106	0.0050	<0.0050	0.45	<0.0050	<0.10	0.26	<3	<3	<3	<3
VMEZ-55 (Barracas)	25	7.6	236	<0.010	1.19	14.36	11.5	146	33.44	27.72	256	8.62	<0.050	0.0012	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.26	<3	<3	<3	<3
VMEZ-59 (Dos Peñas)	23	7.5	702	<0.010	9.07	33.77	79.8	270	48.29	145.15	522	20.13	<0.050	0.0039	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.74	<3	<3	<3	<3
VMEZ-56 (Tlaxinalpan)	29	8.1	174	<0.010	0.343	2.21	4.77	39.4	11.22	30.05	137	6.75	<0.050	0.0063	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.13	<3	<3	<3	<3
Pozo El Caracol	29	7.6	288	<0.010	1.93	12.32	6.38	138	33.55	35.79	285	17.71	<0.050	0.0022	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.33	<3	<3	<3	23
VMEZ-64 (Santa Ana)	25	7.2	188	<0.010	1.72	13.64	22.4	147	38.39	27.6	243	5.67	<0.050	<0.0010	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.32	<3	<3	<3	<3
VMEZ-103 (Manantial El Banco)	26	7.4	188	<0.010	0.419	6.69	0	79.4	19.36	13.01	137	5.06	<0.050	<0.0010	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.12	<3	<3	<3	<3
VMEZ-80 (Teltipan de Juárez)	22	7	1142	<0.010	20.9	38.28	198	455	109.45	222.37	529	21.56	<0.050	0.0163	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	2.35	<3	<3	<3	<3
MZ-312 (Tlaxcoapan)	21	7	1312	<0.010	24.9	59.4	116	691	166.65	206.53	717	38.85	<0.050	0.0012	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	2.34	<3	<3	<3	<3
VMEZ-29 (Hueypoxtla)	32	7.3	648	<0.010	1.45	7.28	23.2	191	58.3	126.12	169	18.87	<0.050	0.0087	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.88	<3	<3	<3	<3
VMEZ-33 (Noria)	24	7.5	416	<0.010	5.44	7.37	27.5	119	32.01	88.62	382	16.06	<0.050	0.0381	<0.0050	<0.10	<0.0050	<0.10	0.5	<3	<3	<3	<3
Min.	21.0	6.1	174.0	0.0	0.0	2.2	0.0	39.4	11.2	13.0	137.0	5.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	23.0	9.0	9.0	9.0
Max.	32.0	8.3	2094.0	0.0	141.0	76.7	1179.0	894.0	247.2	311.7	758.0	63.5	0.2	0.1	0.0	0.8	0.0	0.0	5.5	43.0	75000.0	75000.0	75000.0
Promedio	25.6	7.3	822.7	0.0	13.3	32.1	182.0	347.5	87.1	137.0	405.0	23.0	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	1.6	33.0	18768.8	15019.6	15019.6



**Tabla 8.2.** Resultados fisicoquímicos, elementos potencialmente tóxicos y microbiológicos de los aprovechamientos muestreados en temporada de lluvias (octubre) 2022.

Aprovechamientos muestreados	Temp. °C	pH	SDT	N-NO <sub>2</sub>	N-NO <sub>3</sub>	Mg	SO <sub>4</sub>	Dureza total	Ca	Na	HCO <sub>3</sub>	K	Mn	As	Pb	Fe	Cr	Zn	F	Sr	UFC/100 ml		
																					Coliformes fecales	Coliformes totales	
mg/L																							
NOM-SSA-127-2021		6.5-8.5	1000	0.9	11		400	500					0.15	0.025	0.01	0.3	0.05					ausencia	
CECA -Agua Potable																							
VMEZ-12 (San Francisco Bojay)	22	7.1	1090	<0.010	12.3	37.84	272	504	122.93	141.57	424	30.59	0.05	0.1236	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.912	2.92		<3	
Presa Endhó (Tula)	24	7.6	658	<0.010	5.99	24.64	83.9	196	48.51	145.59	495	24.64	0.191	0.0063	0.005	0.25	<0.005	<0.1	0.462	0.5		240000	
VMEZ-10 (Santa María Michimalton)	28	7.7	456	<0.010	2.03	24.2	132	182	41.91	45.58	215	18.15	0.05	0.0043	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	1.64	0.59		<3	
VMEZ-08 (La Loma)	29	7.8	258	<0.010	1.36	14.52	10.3	94.9	25.63	32.48	213	8.67	0.05	0.0027	0.005	<0.1	<0.005	0.11	0.367	0.19		<3	
VMEZ-7A (Nanzha)	25	7.5	408	<0.010	3.52	17.6	4.11	177	46.31	38.23	276	20.35	0.05	0.0028	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.934	0.39		<3	
VMEZ-19 (San Lucas Teacalco)	25	6.4	952	<0.010	2.92	38.72	171	494	115.5	94.26	550	14.25	0.061	0.0316	0.005	0.21	<0.005	<0.1	0.646	1.47		<3	
El Llano primera sección	23	6.9	1106	<0.010	14.1	42.46	195	641	165.83	81.46	467	33.77	0.05	0.0179	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.498	4.01		<3	
VMEZ-90 (San José Ajoculco)	23	7.4	512	<0.010	3.81	35	46.8	203	39.6	96.76	388	16.12	0.05	0.0053	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.53	0.82		<3	
VMEZ-95 (Paseos de la pradera)	25	7.6	494	<0.010	2.84	35.09	49.9	241	39.71	64.34	438	9.06	0.05	0.0027	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.593	0.38		<3	
MZ-326 (El Refugio)	23	6.8	1852	<0.010	13.2	44.88	662	689	190.3	288.92	456	57.97	0.05	0.089	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.908	3.99		<3	
VMEZ-78 (Tlamaco)	23	7.4	836	<0.010	17.9	35.56	148	382	88	95.12	388	31.9	0.05	0.0131	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.706	2.04		<3	
VMEZ-73 (Col. DEndhó)	25	7.1	2298	<0.010	6.97	38.83	1308	897	243.1	313	129	40.81	0.05	0.0685	0.005	<0.1	0.0063	<0.1	0.8611	5.17		<3	
VMEZ-85 (Bojay 2)	23	7.1	1572	<0.010	19.6	67.65	206	674	162.8	283.42	684	18.92	0.05	0.0111	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.732	2.91		<3	
VMEZ-106 (Xochitlan)	25	7.6	1080	<0.010	10.3	21.78	153	161	32.01	294.75	508	18.26	0.05	0.0099	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.503	0.6		<3	
MZ-3B (Manantial Progreso)	22	7.3	1200	<0.010	17.9	85.25	152	458	57.97	240.19	603	30.03	0.05	0.0193	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	1.03	1.71		<3	
VMEZ-109 (Galería Tezontepec)	26	7.4	856	<0.010	8.39	54.56	205	475	92.68	68.24	374	19.58	0.05	0.003	0.005	0.17	<0.005	0.42	0.368	1.11		<3	

Aprovechamientos muestreados	Temp.	pH	SDT	N-NO <sub>2</sub>	N-NO <sub>3</sub>	Mg	SO <sub>4</sub>	Dureza total	Ca	Na	HCO <sub>3</sub>	K	Mn	As	Pb	Fe	Cr	Zn	F	Sr	Coliformes fecales	Coliformes totales	
	°C	unid.																			UFC/100 ml		
NOM-SSA-127-2021		6.5-8.5	1000	0.9	11		400	500					0.15	0.025	0.01	0.3	0.05					ausencia	
VMEZ-108 (Manantial Tezontepec)	22	7.4	1160	<0.010	14.9	67.38	205	471	86.13	215.82	576	32.45	0.05	0.0164	0.005	<0.1	<0.005	0.15	0.745	2.11	<3	<3	
VMEZ-49 (Col. Cuahutemoc)	22	7.1	110	<0.010	15.3	38.83	141	408	100.32	215.11	577	27.06	0.05	0.0179	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.646	2.19	<3	<3	
Pozo MiraValle (Tlahuelilpan)	25	7.1	1184	<0.010	15	56.1	201	497	97.35	205.98	438	30.69	0.05	0.0156	0.005	<0.1	0.0066	<0.1	0.527	2.13	<3	<3	
VMEZ-62 (San José piedra gorda)	27	6.2	510	<0.010	0.17	13.48	4	119	27.61	124.47	318	17.66	0.074	0.0033	0.005	0.4	<0.005	<0.1	0.432	0.24	<3	15	
VMEZ-55 (Barracas)	25	7.5	322	<0.010	1.6	15.51	14.2	144	31.9	31.45	296	8.46	0.05	0.0011	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.312	0.25	<3	<3	
VMEZ-59 (Dos Peñas)	24	7.5	734	<0.010	14.8	31.46	84.7	251	43.89	145.31	388	20.46	0.05	0.0034	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.488	0.69	<3	<3	
VMEZ-56 (Tlaxinalcalpan)	29	8.1	190	<0.010	0.408	2.31	15	32.6	12.03	35.44	172	6.81	0.05	0.0052	0.005	<0.1	<0.005	0.13	0.211	0.12	<3	<3	
Pozo El Caracol	25	7.7	288	<0.010	1.82	13.97	11.1	134	33.44	36.52	270	17.16	0.05	0.0017	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.355	0.32	<3	<3	
VMEZ-64 (Santa Ana)	23	7.3	284	<0.010	1.91	15.95	28	157	38.61	27.91	390	55.66	0.05	0.001	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.253	0.34	<3	4	
VMEZ-103 (Manantial El Banco)	21	7.9	190	<0.010	0.328	7.66	4	65.8	23.76	14.33	501	4.87	0.05	0.001	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.275	0.12	<3	43	
VMEZ-80 (Telitipan de Juárez)	22	7.1	1248	<0.010	17	40.04	186	445	97.08	230.29	508	21.12	0.05	0.0139	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.507	2.03	<3	<3	
MZ-312 (Tlaxcoapan)	20	7	1434	<0.010	19.2	67.65	122	712	150.7	201.27	463	36.85	0.05	0.0011	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.4	2.07	<3	<3	
VMEZ-29 (Hueypoxtla)	27	7.4	656	<0.010	2.48	8.45	24.7	183	55.22	129.47	227	18.48	0.05	0.0079	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.298	0.89	<3	<3	
VMEZ-33 (Noria)	21	7.7	434	<0.010	6.66	7.9	30.1	105	31.9	91.5	362	16.12	0.05	0.0308	0.005	<0.1	<0.005	<0.1	0.849	0.48	460	930	
Min.	20.0	6.2	110.0	0.0	0.2	2.3	4.0	32.6	12.0	14.3	129.0	4.9	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	460.0	4.0	
Max.	29.0	8.1	2298.0	0.0	19.6	85.3	1308.0	897.0	243.1	313.0	684.0	58.0	0.2	0.1	0.0	0.4	0.0	0.4	1.6	5.2	240000.0	240000.0	
Promedio	24.1	7.3	812.4	0.0	8.5	33.5	163.6	339.8	78.1	134.3	403.1	23.6	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.6	1.4	120230.0	48198.4	

### 8.3. Análisis espacial e interpretación hidrogeoquímica

Los sólidos disueltos totales (SDT) son una medida del contenido combinado de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas contenidas en el agua; generalmente no se consideran como un contaminante primario (es decir, no están asociados con efectos directos a la salud); se utilizan como un indicador de las características estéticas del agua potable y como un indicador de la presencia de una amplia gama de contaminantes químicos. Los SDT en épocas de estiaje y lluvias denotan, en su distribución espacial, que los aprovechamientos ubicados en la parte noroeste y este del acuífero Valle del Mezquital son los que superan los 1000 mg/L establecidos como límite máximo permisible de la norma 127, indicando que hacia esta zona existe una fuente importante de contaminación. En estiaje se observa un valor mínimo de 174 mg/L y un valor máximo de 2094 mg/L mientras que en lluvias los rangos oscilan entre 110 a 2,298 mg/L, valores muy similares a los de estiaje (Figura 8.2 y Figura 8.3).

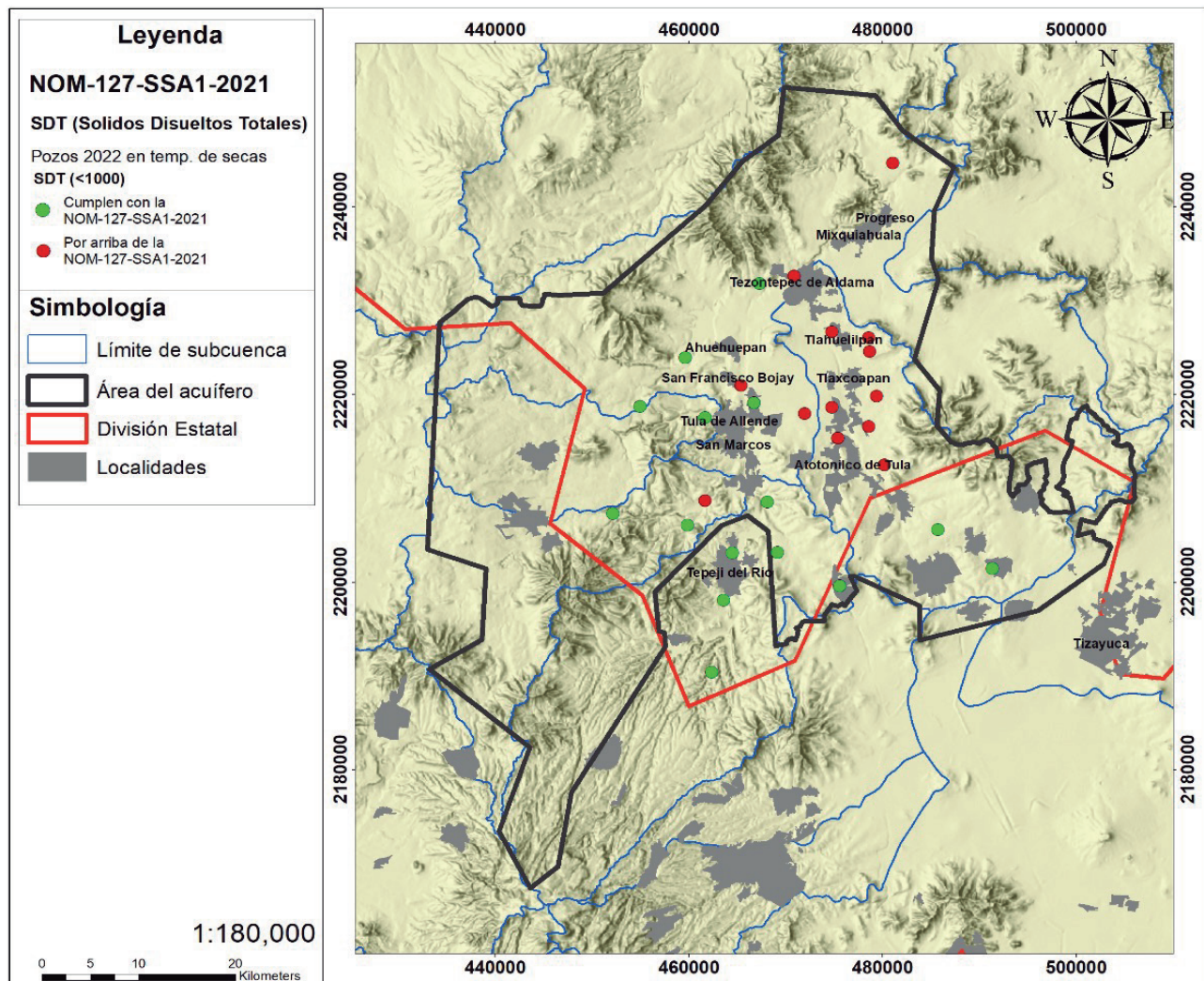
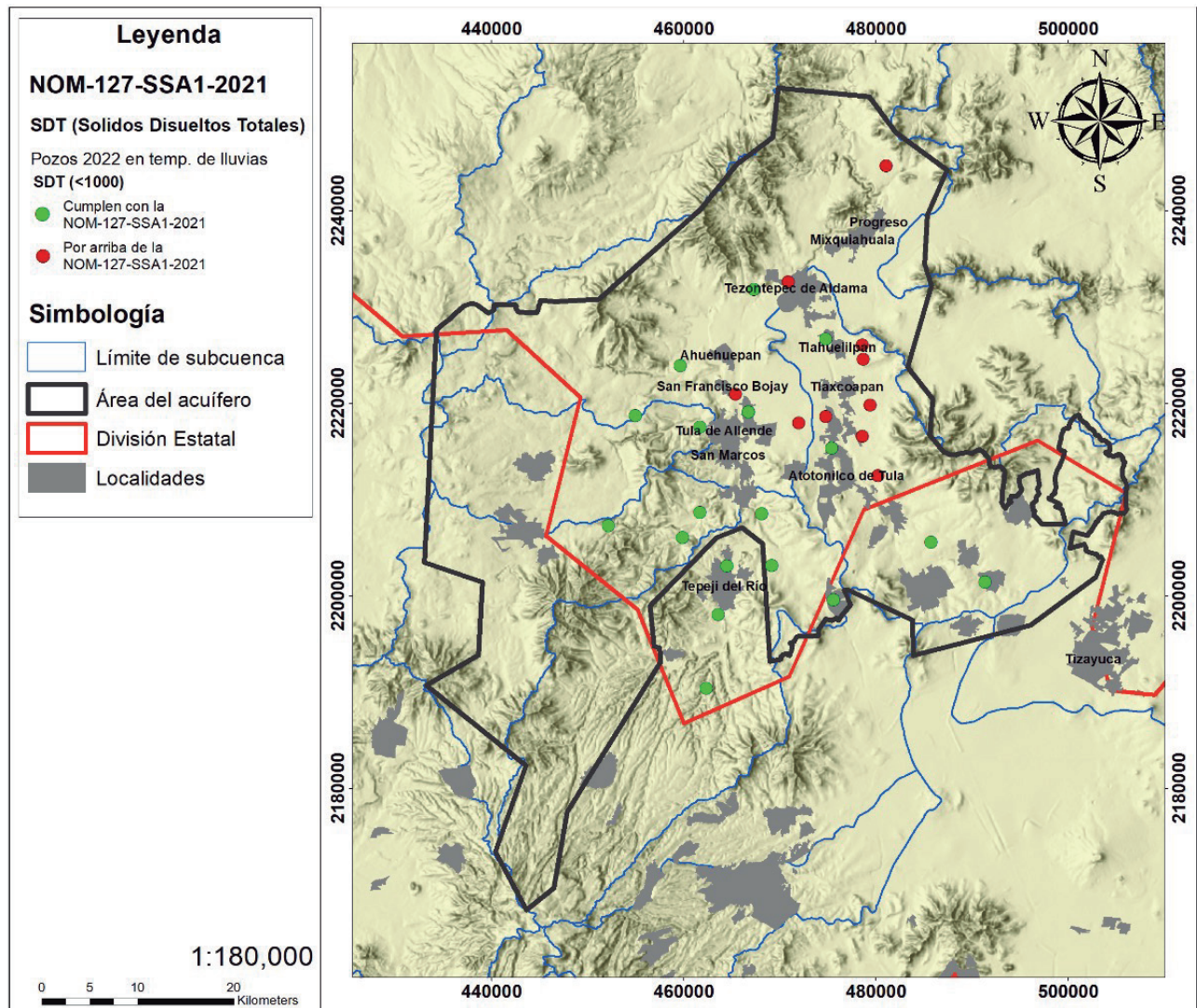


Figura 8.2. Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital en estiaje.



**Figura 8.3.** Distribución espacial de las concentraciones de SDT en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital.

En las zonas noroeste y este del acuífero se observa que las concentraciones más altas de  $\text{NO}_3$  superan los valores permitidos por la NOM-127 de 11 mg/L. La Figura 8.4 y Figura 8.5 muestran en rojo los aprovechamientos que superan el criterio de la norma, y pueden estar relacionadas con la infiltración de efluentes provenientes de las actividades antropogénicas como la agricultura, las descargas de aguas residuales y la fuga e infiltración de drenajes urbanos hacia esta zona.

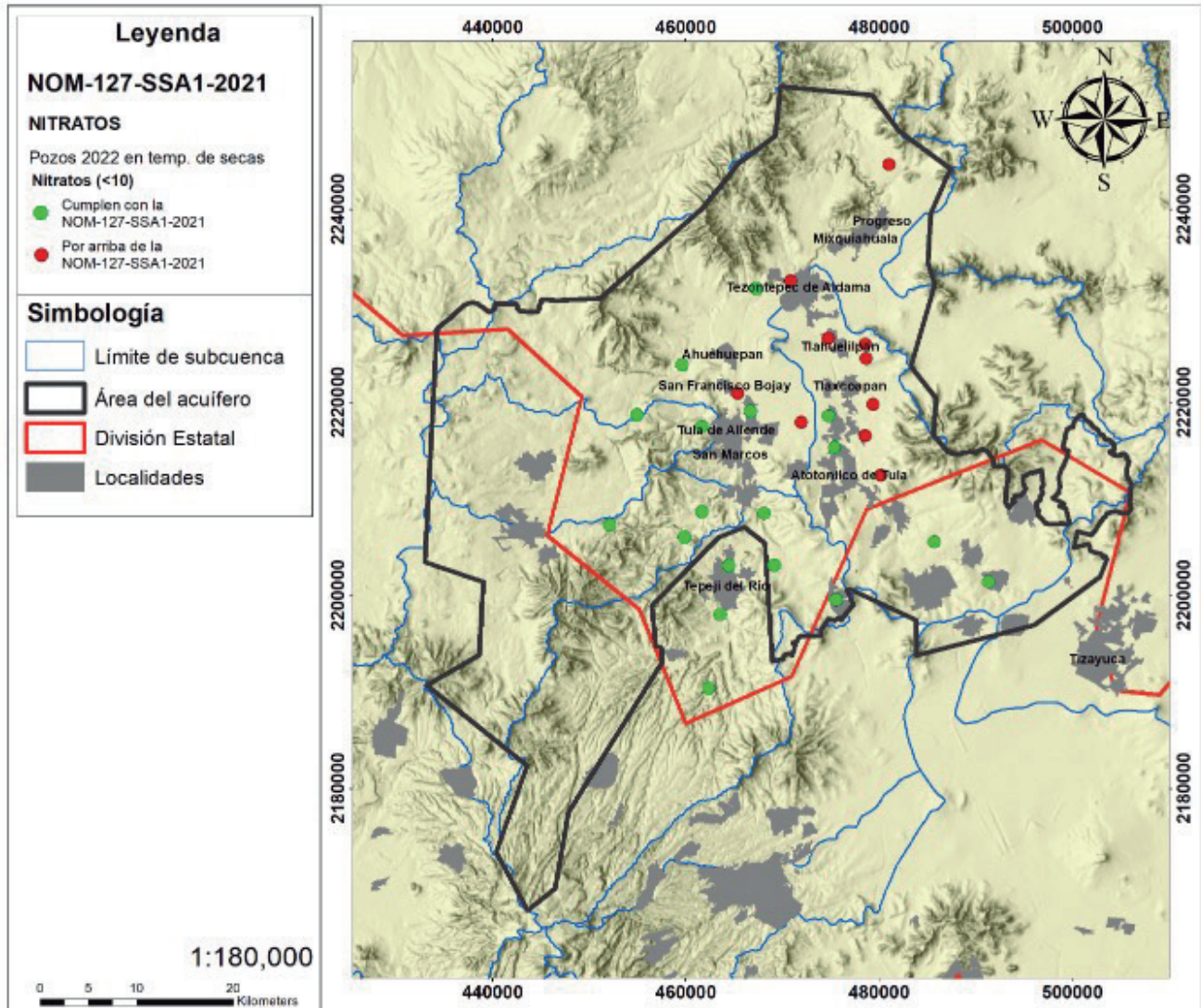
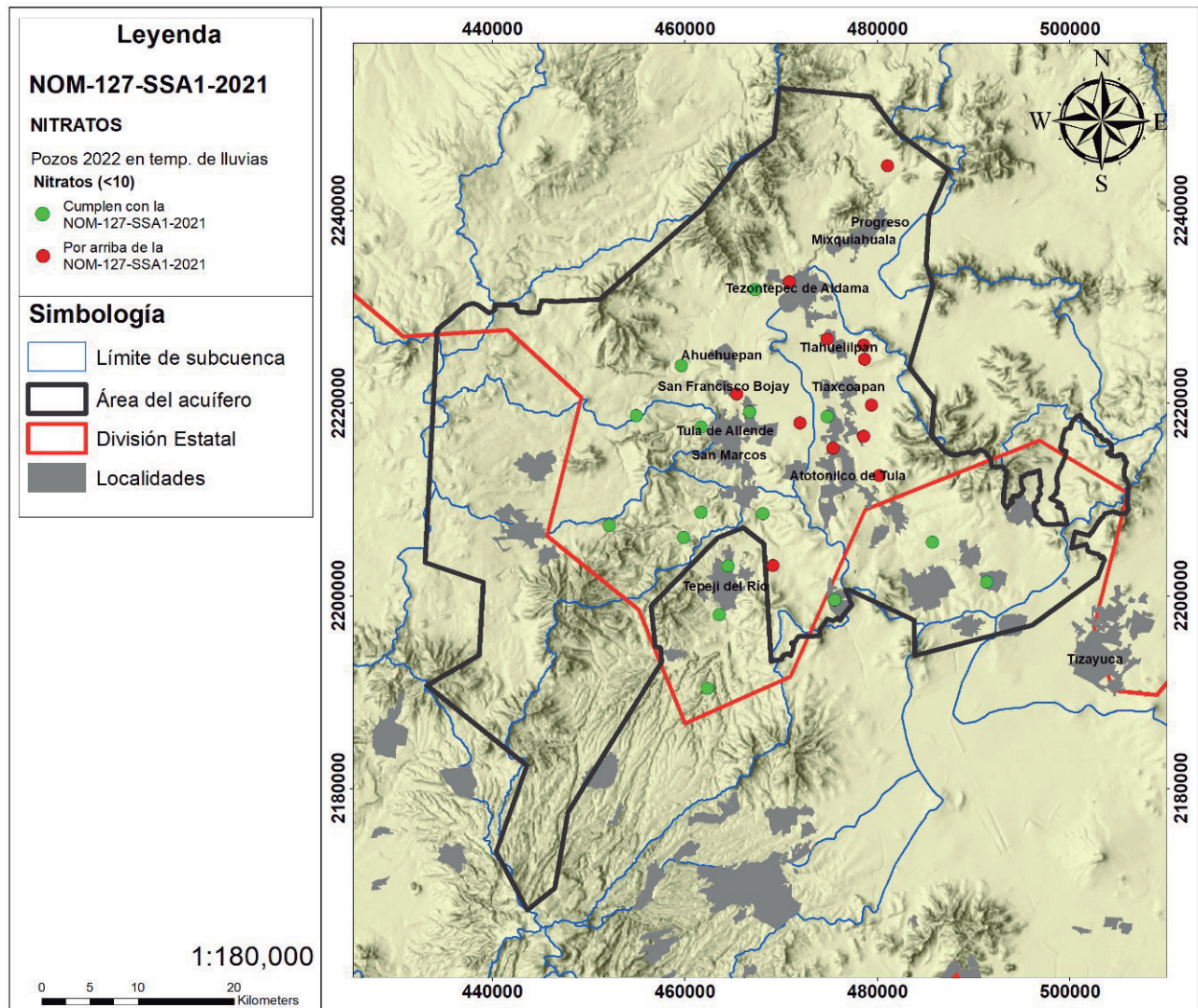
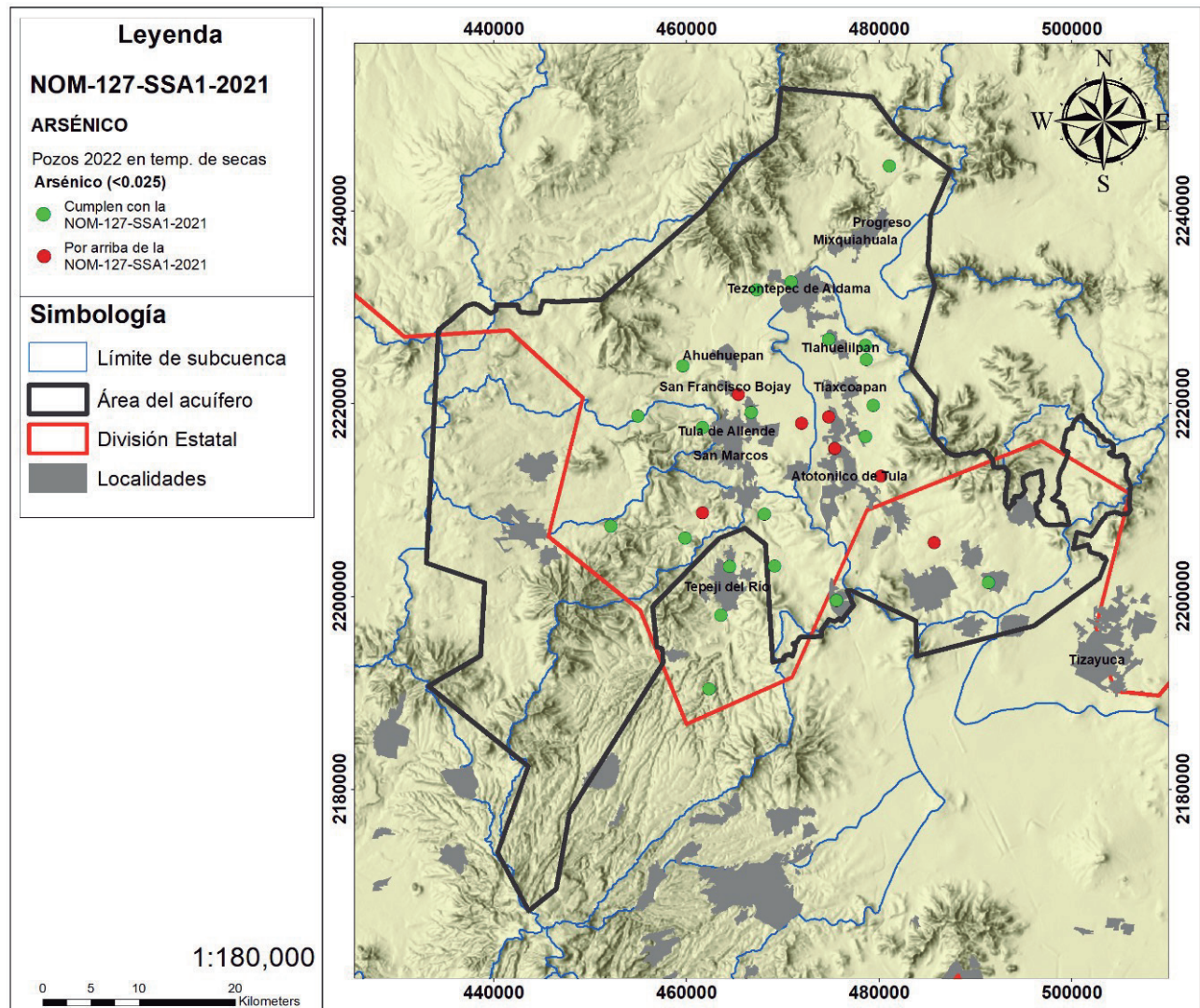


Figura 8.4. Distribución espacial de las concentraciones de  $\text{NO}_3$  en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital, estiaje.

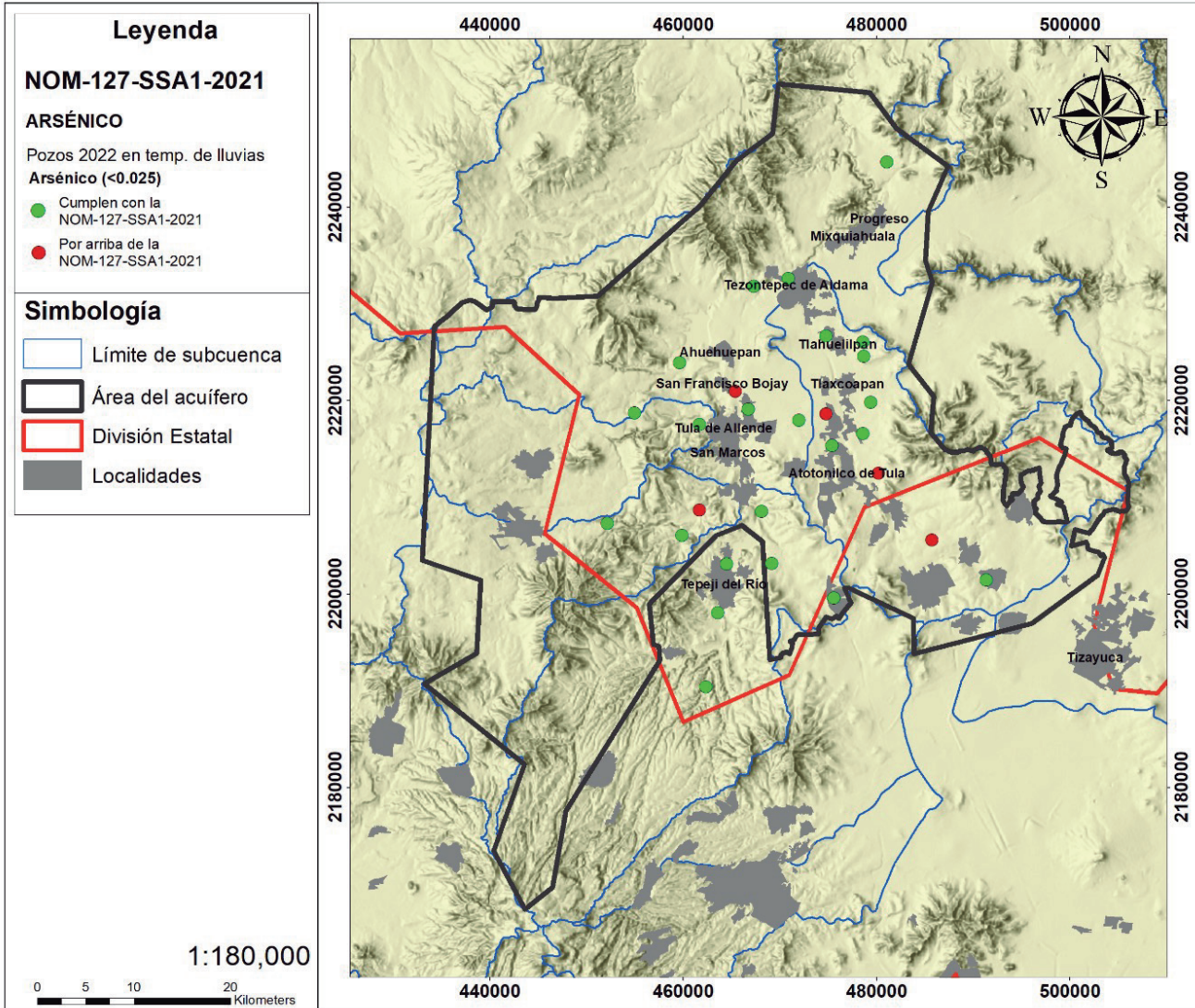


**Figura 8.5.** Distribución espacial de las concentraciones de  $NO_3$  en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital, lluvias.

La Figura 8.6 y la Figura 8.7 muestran que los aprovechamientos que superan el límite de arsénico de 0.025 mg/L son los pozos que se encuentran en el centro del acuífero, lo cual es más evidente en época de estiaje. El arsénico, a través del consumo de agua y alimentos contaminados, puede causar cáncer en la piel y lesiones cutáneas.



**Figura 8.6.** Distribución espacial de las concentraciones de arsénico en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital, estiaje.



**Figura 8.7.** Distribución espacial de las concentraciones de arsénico en los aprovechamientos del acuífero del Valle del Mezquital, lluvias.

Las muestras que sobrepasan el límite máximo permisible para el arsénico pertenecen a un sistema de flujo regional que circula por calizas del Cretácico (Figura 8.8). Las muestras con mayor concentración de arsénico corresponden a la mayor concentración de sulfato (Figura 8.9). Los sulfatos se pueden adsorber en los minerales y competir con  $AsO_4^{3-}$  o  $AsO_3^{3-}$  por los sitios de adsorción en los óxidos de hierro (Zhang and Sparks, 1990; Kinjo and Pratt, 1971). Este proceso induce la desadsorción del arsénico de los sedimentos (Xu *et al.*, 1988; Manning and Goldberg, 1996a, 1996b; Song *et al.*, 2015). Aunado a lo anterior, el sulfato puede ser usado por los microorganismos para promover la liberación del arsénico.



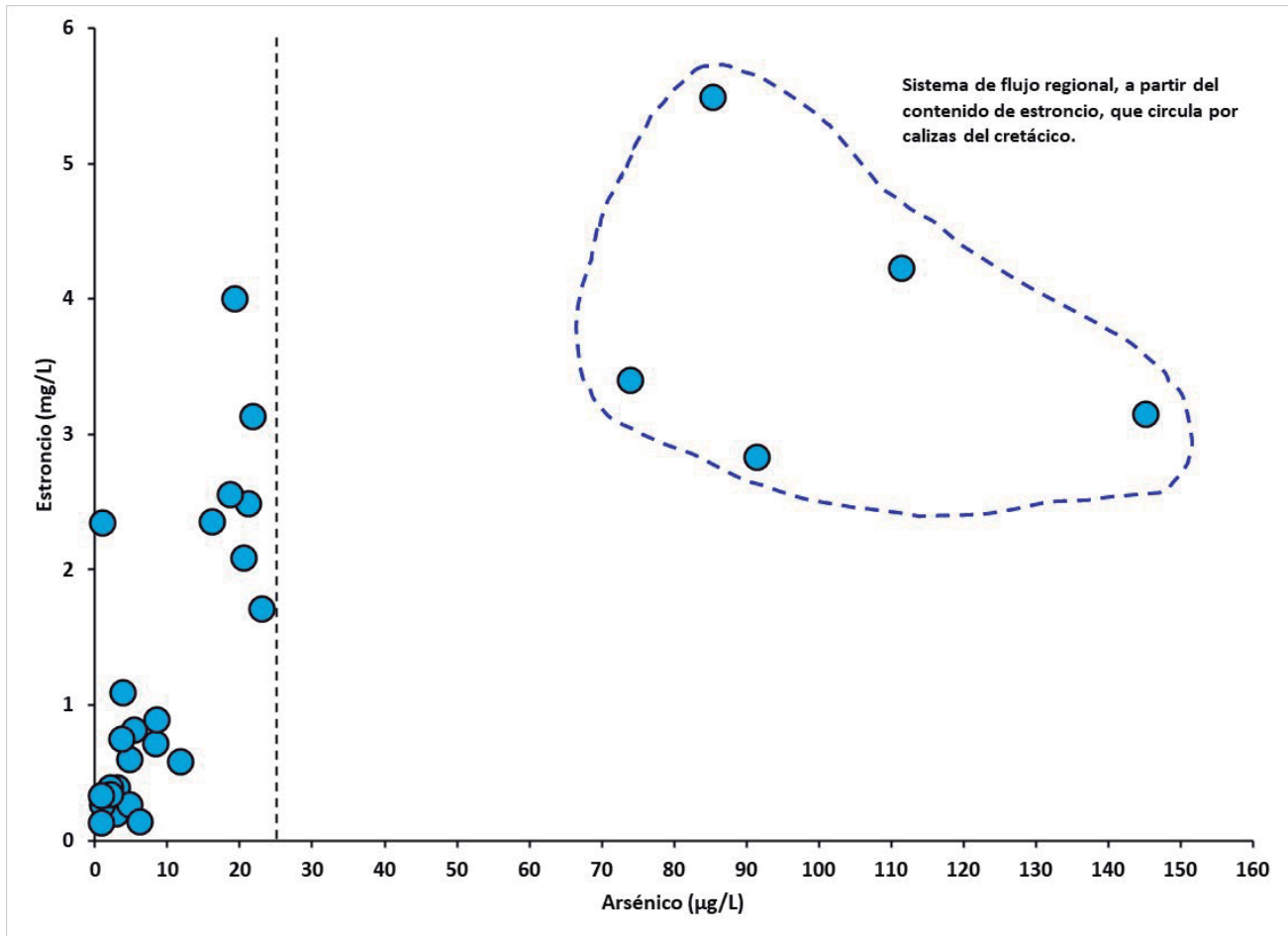
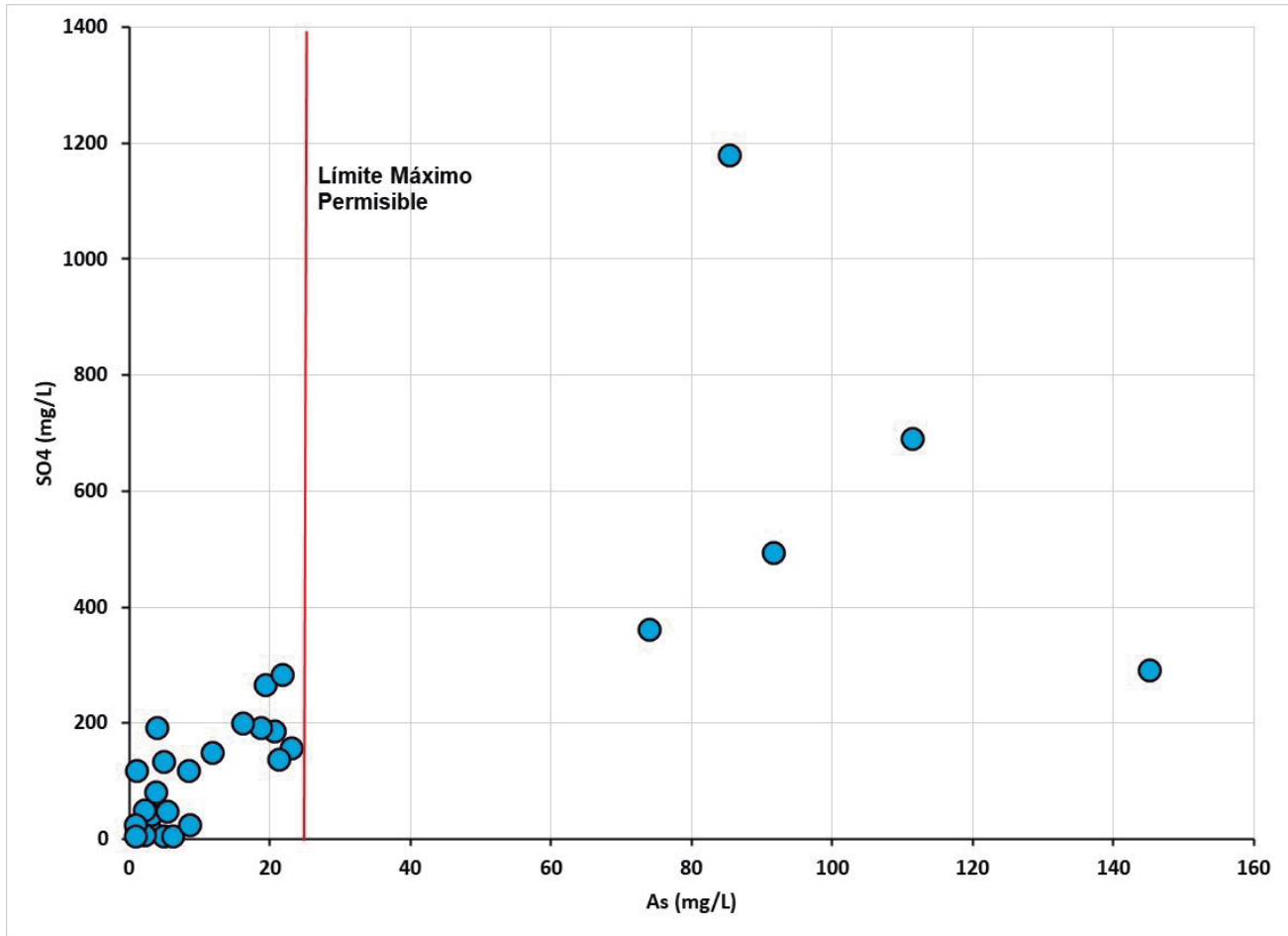


Figura 8.8. Diagrama arsénico vs estroncio

Los microorganismos presentes en el suelo reducen el  $\text{SO}_4^{2-}$  y los óxidos de hierro, produciendo  $\text{FeS}$ . Estos compuestos de sulfuro-hierro tienen una capacidad muy limitada para fijar el As. Como resultado, el arsénico previamente adsorbido en los óxidos de hierro se libera y migra al agua (Kocar *et al.*, 2010; Burton *et al.*, 2011). Es decir, los sulfatos movilizan el arsénico por competición de iones o estimulando la actividad microbiana y sus mecanismos reductores (Li *et al.*, 2018).

Las concentraciones por arriba de la norma de consumo humano para algunos de los pozos y manantiales se deben a que el agua de la presa Endhó que se utiliza para regar las parcelas se infiltra hacia el acuífero durante esta misma acción y también cuando se transporta superficialmente a través de canales.



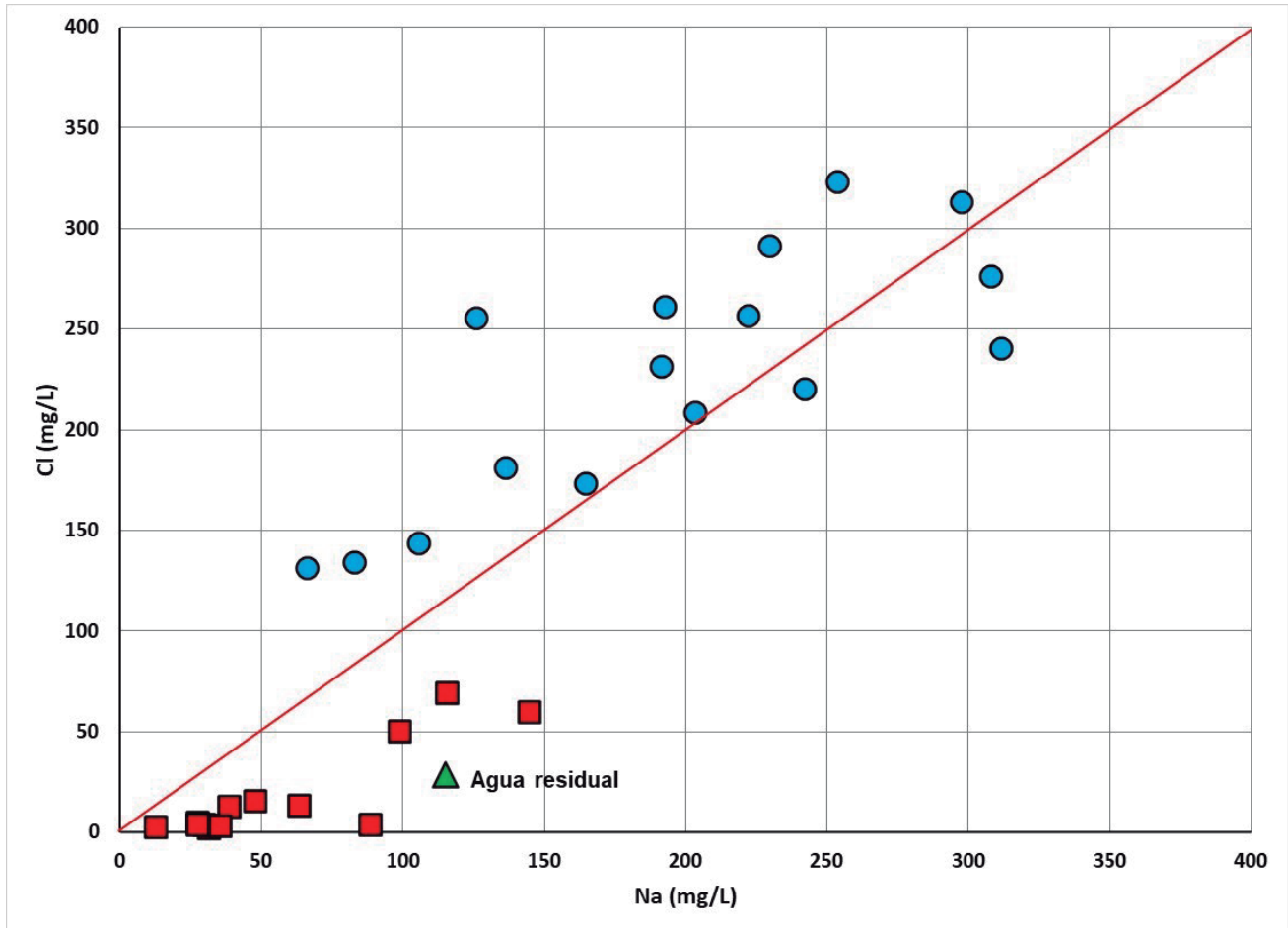


Figura 8.10. Diagrama sodio vs cloro

En la Figura 8.11 se puede observar la similitud que tienen los iones Ca, Na, Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub> de la composición de la presa Endhó con los manantiales Progreso, Tezontepec y Cerro Colorado, indicándonos que su origen está ligado a la infiltración del agua de la presa Endhó a través de los canales de riego o el riego mismo. El manantial El Banco presenta una composición iónica diferente lo que evidencia que su recarga proviene de agua de lluvia.

Por otro lado, se observa que una gran cantidad de pozos están alimentados de la mezcla del agua de la presa Endhó y la de recarga de los frentes montañosos. En la Figura 8.12 se observa que las composiciones de los pozos están entre los límites superior (presa Endhó) e inferior (manantial El Banco), sugiriendo una mezcla de estas aguas.

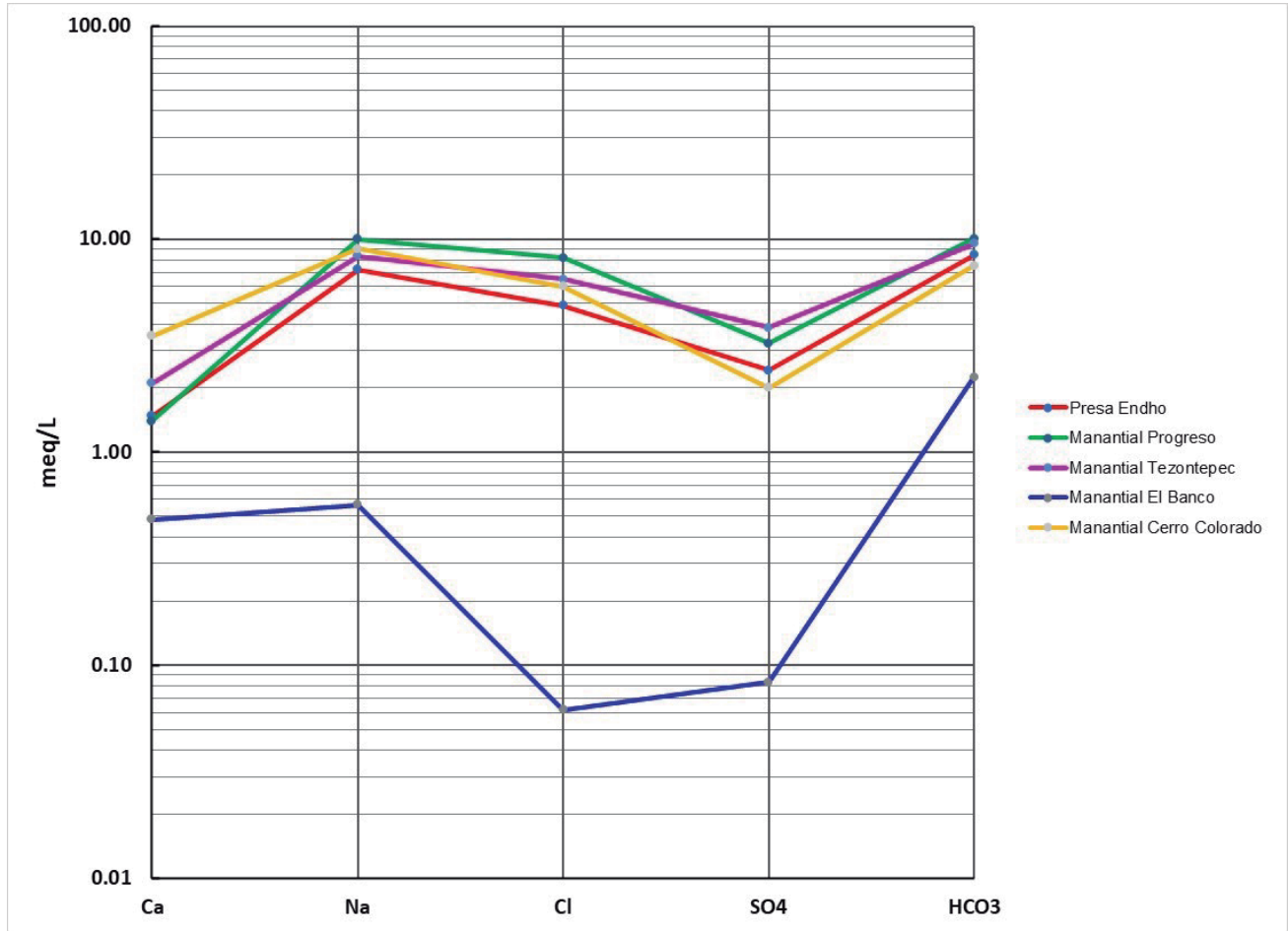


Figura 8.11. Química del agua de los manantiales y la presa Endhó

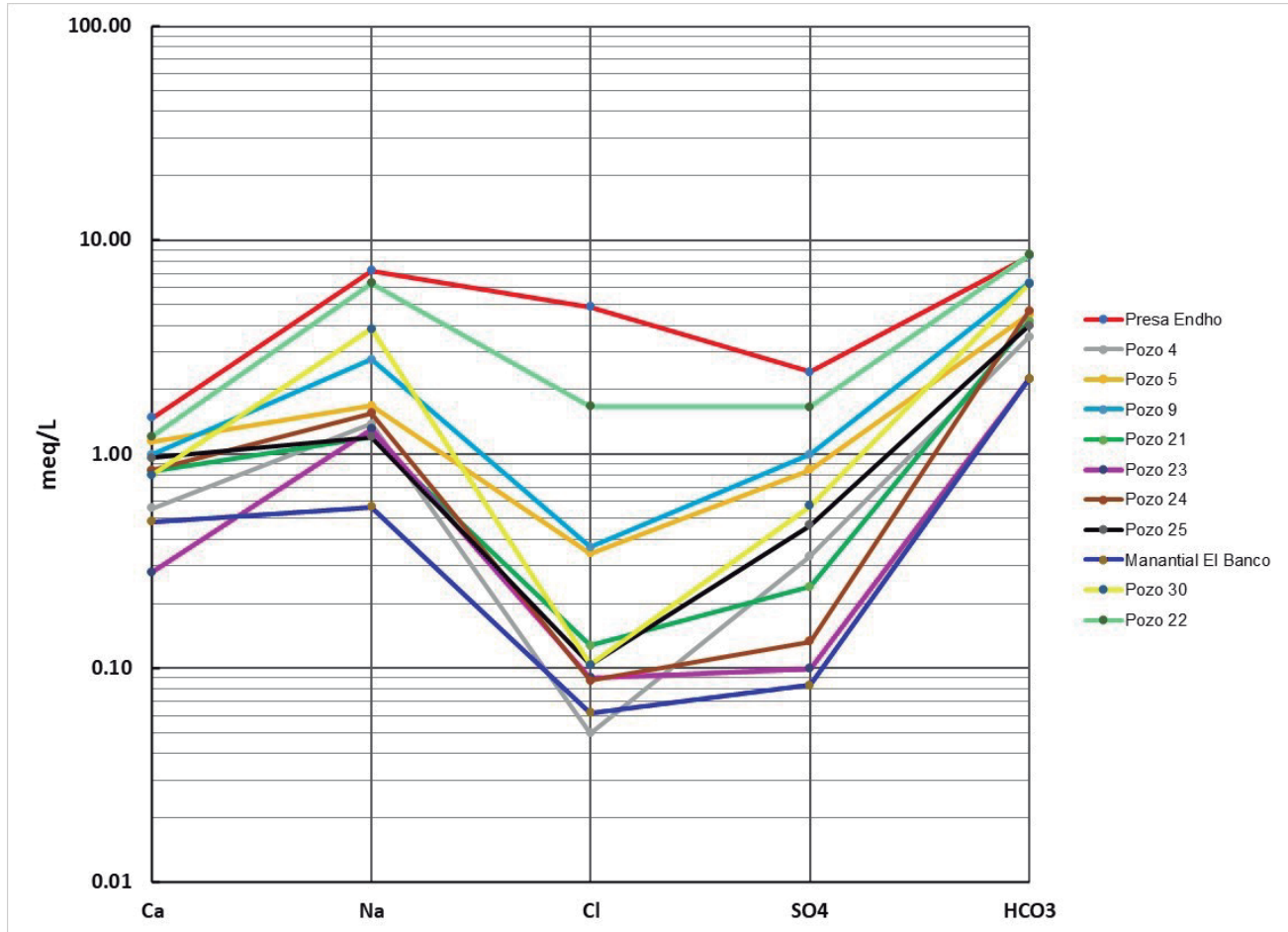


Figura 8.12. Química de las muestras con mezcla de agua superficial y subterránea

Asimismo, mediante la comparación de la composición iónica de las aguas se identificó otro grupo de aprovechamientos que se asemejan a la composición de la presa Endhó (Figura 8.13), lo cual indica que el agua de dicha presa constituye el principal aporte de estos aprovechamientos a través de la infiltración de los canales de riego o la distribución espacial del agua durante el riego de los cultivos.

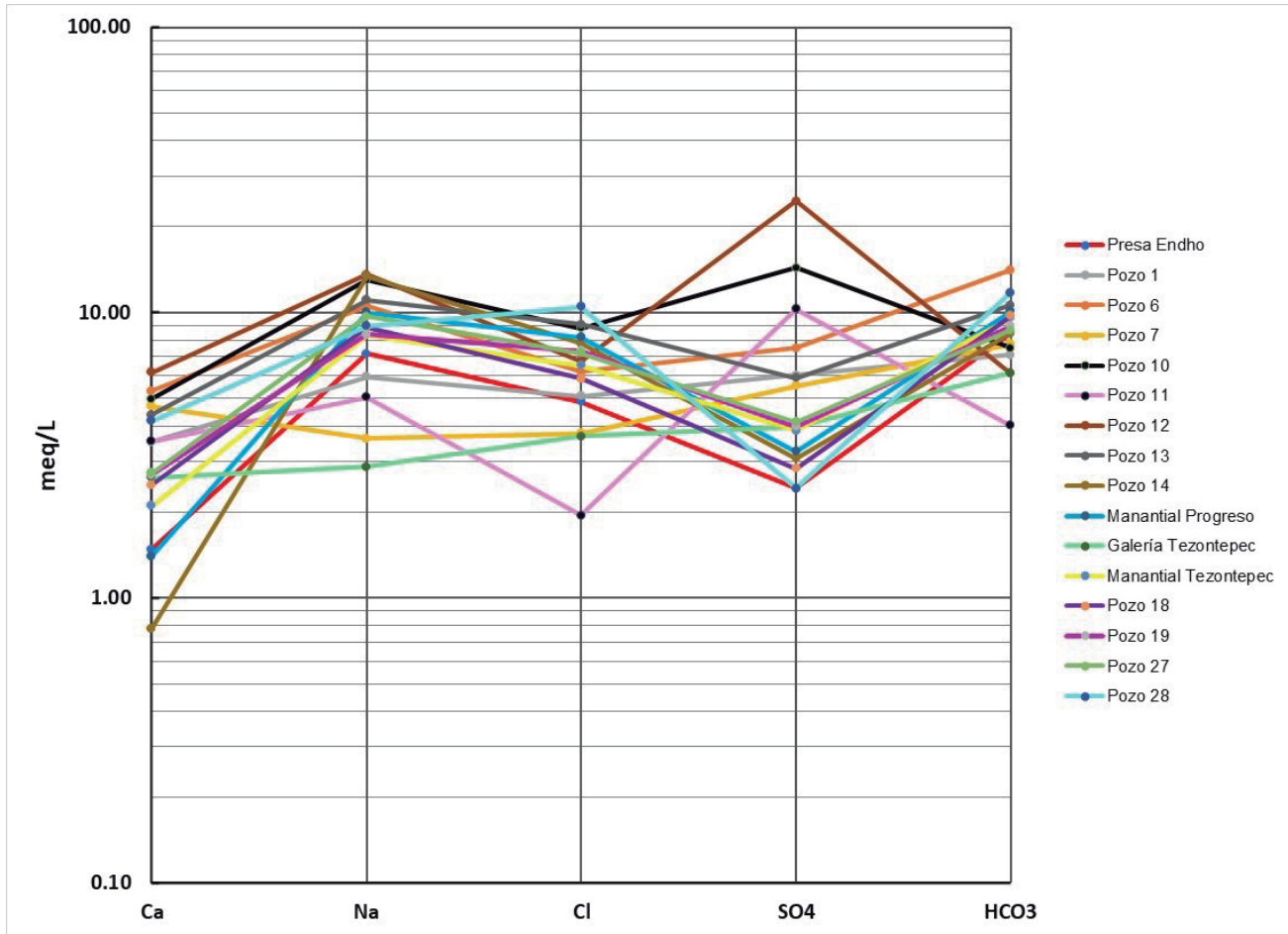


Figura 8.13. Química de las muestras de agua recargadas por la presa Endhó

## 8.4. Isótopos estables

La Línea de Agua Meteorica Mundial tiene un valor de exceso de deuterio de 10‰, definido como  $d = \delta^2H - 8 * \delta^{18}O$  (Dansgaard, 1964). La evaporación produce enriquecimiento de las  $\delta^{18}O$  y  $\delta^2H$ , y decrece el exceso de deuterio de la fase líquida (Froehlich et al., 2008, Stewart, 1975). Después de la evaporación de un cuerpo de agua superficial, el agua remanente tendrá valores de exceso de deuterio menores de 10 (Victoria et al., 1991).

Por lo tanto, la Figura 8.14 indica que todas las muestras de agua, excepto tres, están evaporadas. Las muestras sin evaporar son la 20, 26 y 30. Las muestras con mayor grado de evaporación son la 5, 6, 22 y 24. Los valores isotópicos de los manantiales Tezontepec y Progreso son similares a los de la presa Endhó, lo cual indica que el origen de la recarga de estos manantiales es la presa Endhó (Figura 8.14 y Figura 8.15).

Los valores isotópicos del manantial El Banco son diferentes a los de la presa Endhó. Su contenido isotópico se sitúa sobre la línea meteorica de Pachuca, lo cual advierte que el origen de la recarga de este manantial es la precipitación pluvial.

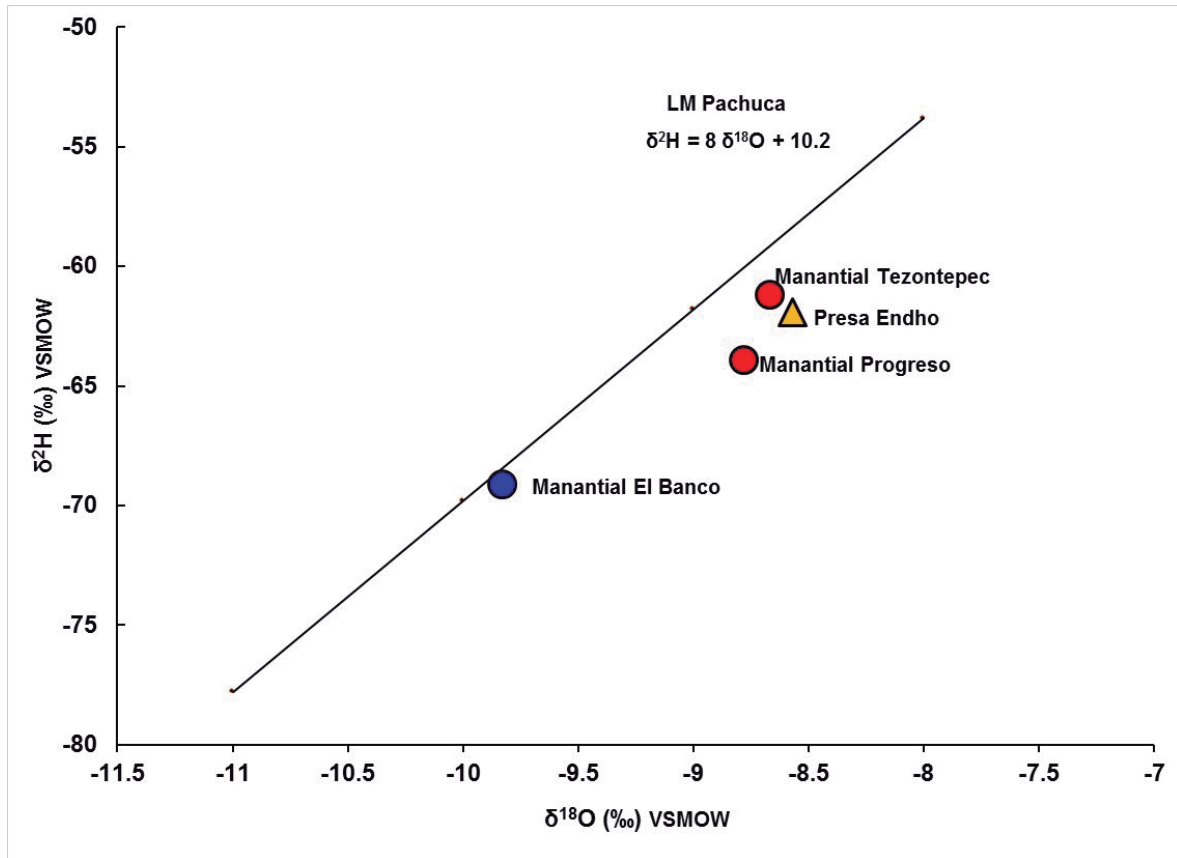


Figura 8.14. Isótopos estables para agua de precipitación y evaporada

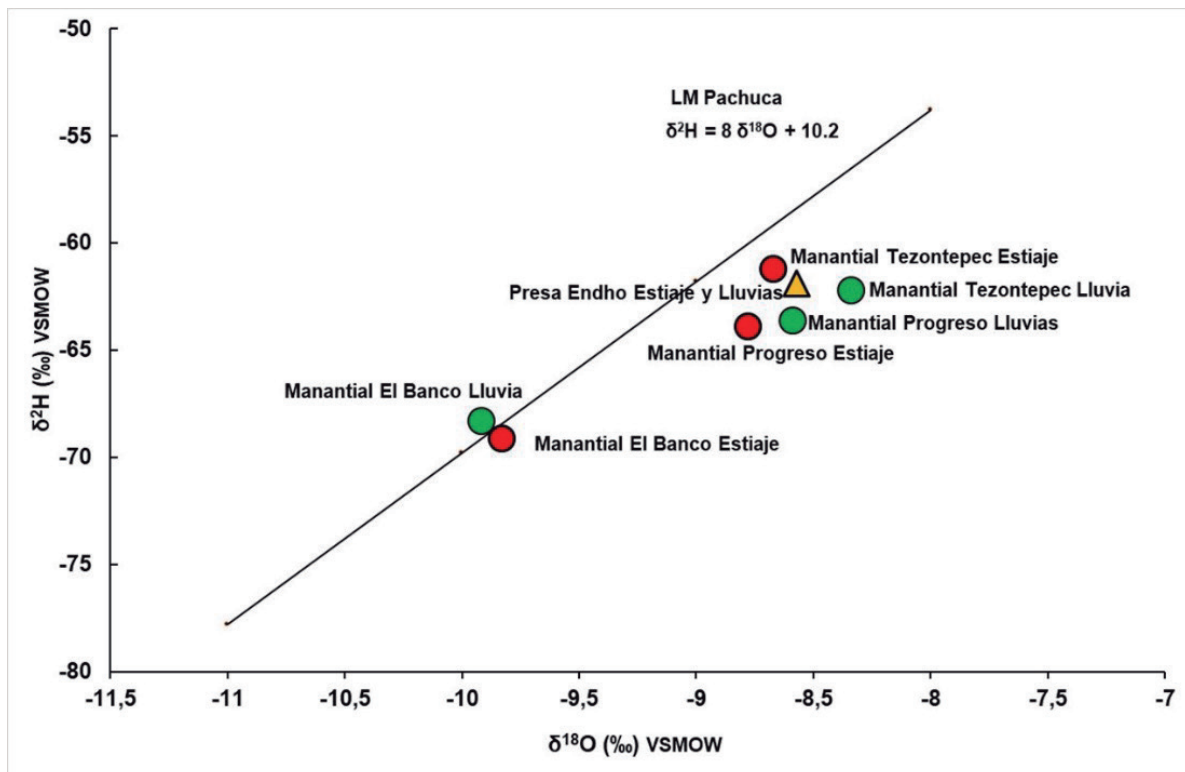


Figura 8.15. Isótopos estables estiaje y lluvias

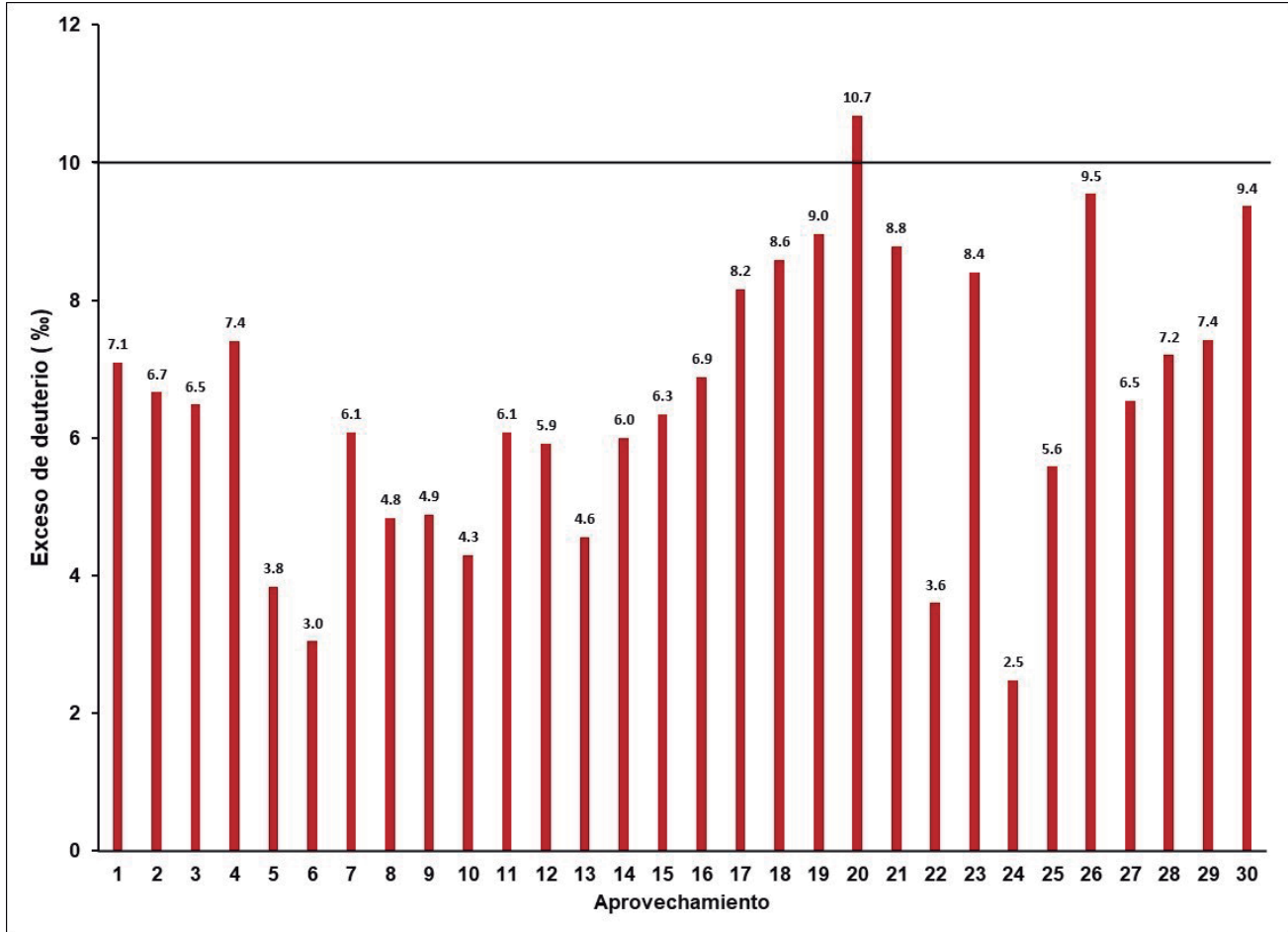


Figura 8.16. Exceso de deuterio de los aprovechamientos subterráneos de el Valle del Mezquital





**Tabla 8.3.** Isótopos estables estiaje

NÚM.	ID LAB.	IDENTIFICACIÓN	$\delta^{18}O$	$1\sigma$	$\delta^2H$	$1\sigma$	$d2H=8d^{18}O+10$
			(‰)	(‰)	(‰)	(‰)	(‰)
1	W-2523	025/2022-01	-9.00	±0.09	-64.9	±0.49	-62.00
2	W-2524	025/2022-02	-8.57	0.05	-61.9	±0.25	-58.56
3	W-2525	025/2022-03	-9.66	0.03	-70.8	±0.31	-67.28
4	W-2526	025/2022-04	-10.15	0.15	-73.8	±0.87	-71.20
5	W-2527	025/2022-05	-9.08	0.06	-68.8	±0.41	-62.64
6	W-2528	025/2022-06	-8.28	0.04	-63.2	±0.19	-56.24
7	W-2529	025/2022-07	-8.51	0.05	-62	±0.37	-58.08
8	W-2530	025/2022-08	-8.93	0.1	-66.6	±0.51	-61.44
9	W-2531	025/2022-09	-9.36	0.07	-70	±0.44	-64.88
10	W-2532	025/2022-10	-9.75	0.04	-73.7	±0.18	-68.00
11	W-2533	025/2022-11	-9.56	0.04	-70.4	±0.51	-66.48
12	W-2534	025/2022-12	-9.74	0.03	-72	±0.22	-67.92
13	W-2535	025/2022-13	-8.97	0.11	-67.2	±0.90	-61.76
14	W-2536	025/2022-14	-9.35	0.03	-68.8	±0.19	-64.80
15	W-2537	025/2022-15	-8.78	0.06	-63.9	±0.34	-60.24
16	W-2538	025/2022-16	-9.21	0.05	-66.8	±0.17	-63.68
17	W-2509	025/2022-17	-8.67	0.05	-61.2	±0.41	-59.36
18	W-2510	025/2022-18	-8.81	0.02	-61.9	±0.38	-60.48
19	W-2511	025/2022-19	-9.22	0.02	-64.8	±0.34	-63.76
20	W-2512	025/2022-20	-9.01	0.05	-61.4	±0.35	-62.08
21	W-2513	025/2022-21	-9.16	0.04	-64.5	±0.25	-63.28
22	W-2514	025/2022-22	-8.60	0.04	-65.2	±0.63	-58.80
23	W-2515	025/2022-23	-8.60	0.04	-60.4	±0.34	-58.80
24	W-2516	025/2022-24	-8.96	0.04	-69.2	±0.25	-61.68
25	W-2517	025/2022-25	-9.01	0.06	-66.5	±0.51	-62.08
26	W-2518	025/2022-26	-9.83	0.04	-69.1	±0.34	-68.64
27	W-2519	025/2022-27	-9.28	0.06	-67.7	±0.27	-64.24
28	W-2520	025/2022-28	-8.85	0.06	-63.6	±0.21	-60.80
29	W-2521	025/2022-29	-9.34	0.03	-67.3	±0.38	-64.72
30	W-2522	025/2022-30	-10.27	0.04	-72.8	±0.33	-72.16

**Tabla 8.4.** Isótopos estables lluvia

NÚM.	ID LAB.	IDENTIFICACIÓN	$\delta^{2}\text{H}$	$1\sigma$	$\delta^{18}\text{O}$	$1\sigma$
			(‰)	(‰)	(‰)	(‰)
1	W-3074	SAN FRANCISCO BOJAY	-65.1	±0.44	-8.86	±0.08
2	W-3075	PRESA ENDHÓ	-62	±0.23	-8.58	±0.15
3	W-3076	SANTA MARÍA MICHIMALTON	-70.8	±0.05	-9.85	±0.08
4	W-3077	LA LOMA	-73	±0.47	-10.38	±0.02
5	W-3078	NANZHA	-68.6	±0.26	-8.92	±0.12
6	W-3079	SAN LUCAS TEACALCO	-61.9	±0.02	-8.42	±0.05
7	W-3080	EL LLANO PRIMERA SECCIÓN	-63.1	±0.20	-8.32	±0.01
8	W-3081	SAN JOSÉ AJOCULCO	-67.5	±0.22	-9.13	±0.06
9	W-3082	PASEOS DE LA PRADERA	-63.6	±0.63	-8.59	±0.14
10	W-3083	EL REFUGIO	-62.2	±0.20	-8.34	±0.09
11	W-3084	TLAMACO	-66.7	±0.66	-8.97	±0.04
12	W-3085	COLONIA DENDHÓ	-62.3	±0.49	-8.69	±0.04
13	W-3086	BOJAY 2	-65.2	±0.65	-9.1	±0.09
14	W-3087	XOCHITLÁN	-67.3	±0.59	-9.05	±0.12
15	W-3088	MANANTIAL PROGRESO	-63.3	±0.03	-8.48	±0.07
16	W-3089	GALERÍA TEZONTEPEC	-72.3	±0.72	-9.41	±0.11
17	W-3090	MANANTIAL TEZONTEPEC	-75	±0.34	-10.26	±0.05
18	W-3091	COLONIA CUAUHTÉMOC	-74.2	±0.75	-9.95	±0.03
19	W-3092	POZO MIRAVALLE TLAHUELILPAN	-65.4	±0.79	-8.79	±0.15
20	W-3093	SAN JOSÉ PIEDRA GORDA	-70.3	±0.86	-9.49	±0.14
21	W-3094	BARRACAS	-67	±0.30	-9	±0.05
22	W-3095	DOS PESTAÑAS	-68.3	±0.21	-9.92	±0.12
23	W-3096	TLAXINACALPAN	-65.6	±0.14	-9.16	±0.04
24	W-3097	POZO EL CARACOL	-68.9	±0.34	-9.25	±0.01
25	W-3098	SANTA ANA	-60.2	±0.59	-8.92	±0.08
26	W-3099	MANANTIAL EL BANCO	-64.6	±0.44	-9.3	±0.11
27	W-3100	TELTIPAN DE JUÁREZ	-61.2	±0.08	-8.53	±0.13
28	W-3101	TLAXCOAPAN	-64.5	±0.13	-8.71	±0.02
29	W-3102	HUEYPOXTLA	-67.2	±0.05	-8.78	±0.06
30	W-3103	NORIA	-72.6	±0.31	-9.89	±0.12

## 8.5. Isotopos de Tritio

El contenido de tritio (UT) de los manantiales Tezontepec y Progreso es similar al de la presa Endhó, lo cual indica un origen común.

El contenido de tritio (UT) del manantial El Banco es menor al de la presa Endhó así como el de los manantiales Tezontepec y Progreso. Esto indica que el tiempo de residencia en el acuífero del agua del manantial El Banco es mayor al de los manantiales Tezontepec y Progreso.

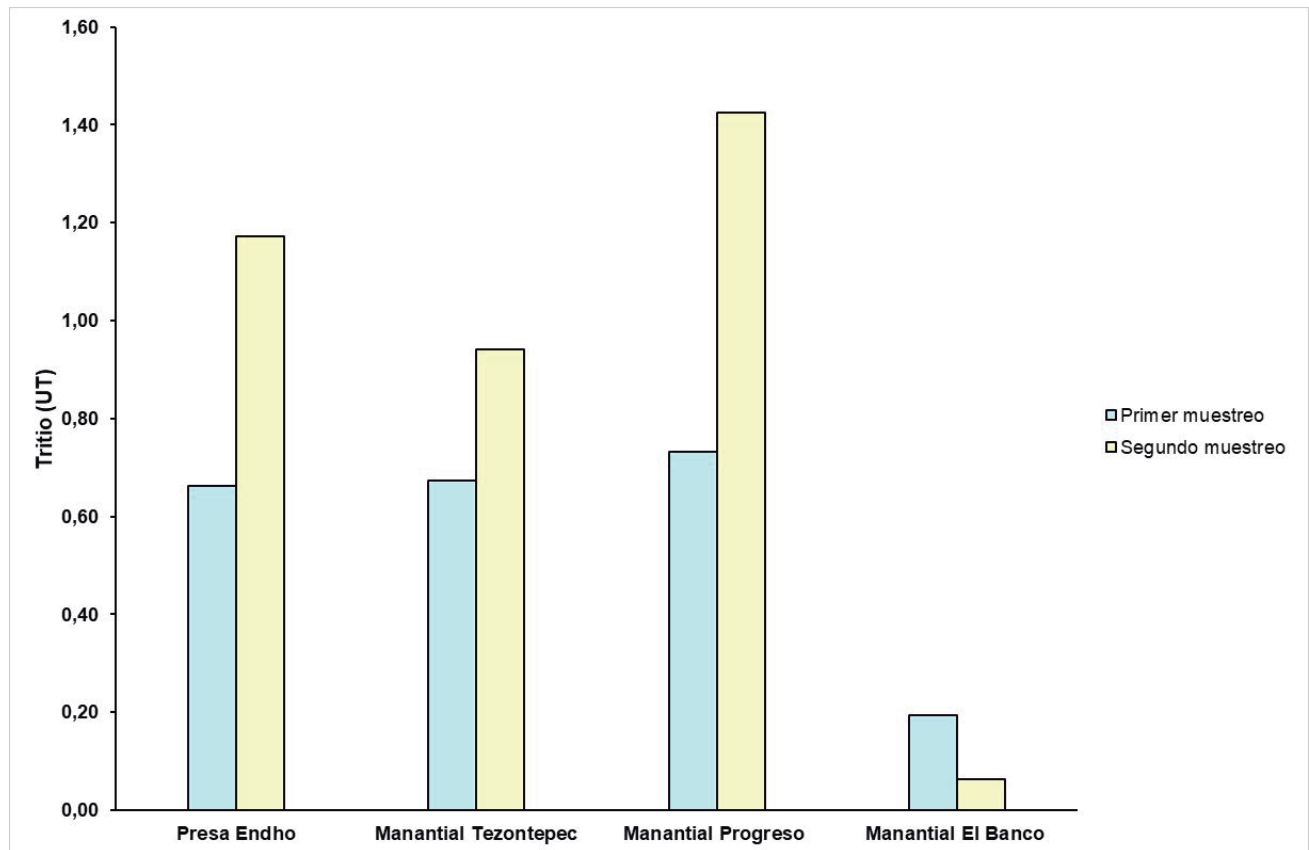


Figura 8.17. Tritio en los manantiales

**Tabla 8.5.** Isótopos de tritio en estiaje

# LAB. IMTA	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	TRITIO *		
		(UT)		
237-13	025/2022-1 TULA, HIDALGO	1.18	±	0.54
237-14	025/2022-2 TULA, HIDALGO	0.66	±	0.54
237-15	025/2022-3 TULA, HIDALGO	0.25	±	0.55
237-16	025/2022-4 TULA, HIDALGO	0.61	±	0.54
237-17	025/2022-5 TULA, HIDALGO	0.36	±	0.54
237-19	025/2022-6 TULA, HIDALGO	-0.06	±	0.51
237-20	025/2022-7 TULA, HIDALGO	0.59	±	0.53
238-1	025/2022-8 TULA, HIDALGO	-0.42	±	0.52
238-2	025/2022-9 TULA, HIDALGO	-0.12	±	0.53
238-3	025/2022-10 TULA, HIDALGO	-0.18	±	0.53
238-4	025/2022-11 TULA, HIDALGO	-0.72	±	0.51
238-6	025/2022-12 TULA, HIDALGO	-0.19	±	0.54
238-7	025/2022-13 TULA, HIDALGO	0.75	±	0.57
238-8	025/2022-14 TULA, HIDALGO	0.00	±	0.53
238-9	025/2022-15 TULA, HIDALGO	0.73	±	0.55
238-10	025/2022-16 TULA, HIDALGO	0.85	±	0.55
238-11	025/2022-17 TULA, HIDALGO	0.67	±	0.55
238-13	025/2022-18 TULA, HIDALGO	0.61	±	0.55
238-14	025/2022-19 TULA, HIDALGO	0.00	±	0.54
238-15	025/2022-20 TULA, HIDALGO	-0.68	±	0.53
238-16	025/2022-21 TULA, HIDALGO	0.56	±	0.56
238-17	025/2022-22 TULA, HIDALGO	0.44	±	0.56
238-18	025/2022-23 TULA, HIDALGO	0.61	±	0.55
238-20	025/2022-24 TULA, HIDALGO	-0.93	±	0.52
239-1	025/2022-25 TULA, HIDALGO	0.18	±	0.53
239-2	025/2022-26 TULA, HIDALGO	0.19	±	0.57
239-3	025/2022-27 TULA, HIDALGO	0.25	±	0.54
239-4	025/2022-28 TULA, HIDALGO	0.62	±	0.56
239-5	025/2022-29 TULA, HIDALGO	0.25	±	0.55
239-7	025/2022-30 TULA, HIDALGO	1.13	±	0.58

\* Los resultados están expresados en unidades de tritio (UT). Una UT se define como un átomo de tritio por cada 10<sup>18</sup> átomos de hidrógeno. El error asociado a la medida corresponde a 1σ. El límite de detección de la metodología utilizada es 0.6 UT. Los valores negativos indican ausencia total de tritio en la muestra.



**Tabla 8.6.** Isótopos de tritio en lluvias

# LAB. IMTA	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	TRITIO *		
		(UT)		
244-1	203/2022-1 TULA, HIDALGO	0.96	±	0.55
244-2	203/2022-2 TULA, HIDALGO	1.17	±	0.57
244-3	203/2022-3 TULA, HIDALGO	-0.48	±	0.53
244-5	203/2022-4 TULA, HIDALGO	0.30	±	0.55
244-6	203/2022-5 TULA, HIDALGO	-0.44	±	0.55
244-7	203/2022-6 TULA, HIDALGO	0.49	±	0.56
244-8	203/2022-7 TULA, HIDALGO	1.01	±	0.55
244-9	203/2022-8 TULA, HIDALGO	0.56	±	0.56
244-10	203/2022-9 TULA, HIDALGO	0.94	±	0.57
244-12	203/2022-10 TULA, HIDALGO	1.42	±	0.58
244-13	203/2022-11 TULA, HIDALGO	0.62	±	0.56
244-14	203/2022-12 TULA, HIDALGO	1.17	±	0.57
244-15	203/2022-13 TULA, HIDALGO	0.06	±	0.56
244-16	203/2022-14 TULA, HIDALGO	0.50	±	0.56
244-18	203/2022-15 TULA, HIDALGO	0.44	±	0.56
244-19	203/2022-16 TULA, HIDALGO	-0.24	±	0.53
244-20	203/2022-17 TULA, HIDALGO	0.24	±	0.55
245-1	203/2022-18 TULA, HIDALGO	-0.12	±	0.53
245-2	203/2022-19 TULA, HIDALGO	0.32	±	0.57
245-4	203/2022-20 TULA, HIDALGO	-0.13	±	0.55
245-5	203/2022-21 TULA, HIDALGO	0.12	±	0.55
245-6	203/2022-22 TULA, HIDALGO	0.06	±	0.56
245-7	203/2022-23 TULA, HIDALGO	0.19	±	0.56
245-8	203/2022-24 TULA, HIDALGO	-0.37	±	0.53
245-9	203/2022-25 TULA, HIDALGO	0.19	±	0.56
245-11	203/2022-26 TULA, HIDALGO	0.44	±	0.57
245-12	203/2022-27 TULA, HIDALGO	-0.24	±	0.54
245-13	203/2022-28 TULA, HIDALGO	-0.12	±	0.54
245-14	203/2022-29 TULA, HIDALGO	-0.82	±	0.55
245-15	203/2022-30 TULA, HIDALGO	1.84	±	0.60

## 8.6. Resultados e impactos

Se identificaron los parámetros fisicoquímicos, iones mayores y elementos traza de los muestreos en aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el acuífero Valle del Mezquital los cuales servirán como referencia para el monitoreo de los aprovechamientos del agua subterránea.

## 8.7. Posibles desviaciones, áreas de oportunidad y riesgos potenciales identificados.

No se identificaron posibles desviaciones de los alcances planteados en los términos de referencia; y por lo tanto a este punto no se percibieron áreas de oportunidad. Los riesgos potenciales son los posibles retrasos a causa de las condiciones de confinamiento debido al COVID-19.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La red piezométrica del Valle del Mezquital no ha funcionado como tal a través de los años, ya que en los estudios históricos no cuentan con mediciones en los mismos sitios de monitoreo.

Los pozos profundos del Valle del Mezquital disponibles para la medición piezométrica son prácticamente dedicados al abastecimiento de agua potable para la población de la región. Por lo que su medición depende del régimen de operación de los mismos.

Se rediseñó una red de monitoreo piezométrico de 60 pozos de tal manera que se capturara la distribución espacial de los niveles del agua subterránea en el Valle del Mezquital.

En la zona de estudio existen dos baterías de pozos que extraen un volumen importante de agua que corresponden a la CFE y PEMEX, sin embargo, su acceso es muy limitado y la operación, es prácticamente durante las 24 horas del día.

La base de datos proporcionada para el análisis histórico no presenta los mismos aprovechamientos analizados siendo variables en número y localización, existen aumentos graduales en los sólidos disueltos totales (SDT), nitratos ( $\text{NO}_3$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4$ ), Dureza total, Alcalinidad Total, Coliformes Fecales, plomo (Pb), cromo (Cr) y arsénico (As).

Del análisis con el cálculo del índice de calidad de la presencia y el aumento gradual de algunos parámetros en los aprovechamientos como los sólidos disueltos totales (SDT), nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y arsénico (As) que fue apareciendo en 2 de los 6 pozos analizados (2012). En 2013 y 2014 se agregan a estos parámetros la presencia de Sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) en 3 de los 12 pozos. En 2016 se observó la presencia de nitratos y sulfatos en todos los pozos analizados. Para 2022 se observó la presencia de SDT,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , la presencia CF y As en tres de los 22 aprovechamientos muestreados.

La información generada en este estudio servirá para establecer las condiciones actuales, tanto de los niveles, como de la calidad del agua del acuífero y servirá para desarrollar modelos de simulación hidrogeoquímicas que permitan establecer las mezclas de agua y la posible interacción agua-roca, así como la posible influencia de la de la presa Endhó en el acuífero del Valle del Mezquital. Los tipos de agua que prevalecen son Ca, Mg-  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ , Na- $\text{HCO}_3$ , Na-Cl, Ca- $\text{SO}_4$  y Na- $\text{SO}_4$ .

Se analizaron As, Ba, Fe, Sr, B, Zn, Pb, Cr, Co, Cu, Mo, Bi, Sb, Se, Sn y Ti durante las dos campañas. Casi todos estos valores se reportaron por debajo del límite de detección del método

analítico utilizado. Se encontraron concentraciones detectables de As, Fe, Mn, casi todos por debajo de los límites máximos permisibles en los criterios ecológicos de agua potable y de consumo humano de la norma (NOM-127-SSA1-2021).

Se observó durante los monitoreos de 2022 que los aprovechamientos VMEZ-12 (San Francisco Bojay), VMEZ-19 (San Lucas Teacalco), El Llano primera sección, MZ-326 (El Refugio), VMEZ-78 (Tlamaco) y VMEZ-73 (Col. Dendhó) exceden el límite de la norma mexicana NOM-127-SSA1-2021 para arsénico de 0.025 mg/L y así como los criterios ecológicos de calidad del Agua como fuente de abastecimiento de agua potable de 0.05 mg/L.

Los aprovechamientos que superan el límite de manganeso de 0.15 mg/L de la norma y 0.10 mg/l de los criterios

ecológicos son los pozos VMEZ-19 (San Lucas Teacalco) y VMEZ-62 (San José Piedra Gorda). Y VMEZ-19 (San Lucas Teacalco) y VMEZ-62 (San José Piedra Gorda) sobrepasan el límite de la norma y de los criterios ecológicos de hierro de (0.3 mg/L).

Las concentraciones por arriba de los criterios para uso como fuente de abastecimiento y de la norma de consumo humano NOM-127-SSA1-2021, para algunos de los pozos y manantiales puede deberse a la infiltración de aguas residuales o aguas superficiales contaminadas hacia el acuífero.

El agua del acuífero evaluada con el índice CCME-WQI utilizando los límites establecidos como fuente de abastecimiento de agua potable de los criterios ecológicos de calidad del agua clasifican el agua de excelente, buena, regular y contaminada, los parámetros asociados a la disminución de la calidad son principalmente sólidos disueltos totales, nitratos y arsénico.

El origen del agua del acuífero es tanto de recarga por lluvia como mezcla de agua proveniente de la presa Endhó que se incorporan al acuífero a través de canales y el riego mismo de las parcelas. Las muestras con mayor concentración de arsénico se corresponden con la mayor concentración de sulfato.

Se recomienda dar seguimiento tanto a la red piezométrica como al muestreo de la calidad del agua del acuífero del Valle del Mezquital.





# REFERENCIAS

- Aqueous Solutions LCC. (2016). The Geochemist's Workbench (Versión 11) [Software]. Department of Geology at the University of Illinois Urbana Champaign 2016. Available Online: <https://www.gwb.com/> (accessed on 15 December 2022).
- Ariel Consultores, 1999, Los recursos hidráulicos del estado de Hidalgo y diagnóstico sobre su aprovechamiento: Estudio para la Comisión Estatal del Agua del estado de Hidalgo, 119 pp.
- Ariel Consultores, 2004. Estudio técnico del impacto por la explotación del agua subterránea de los acuíferos: Valle del Guadiana estado de Durango, Actopan-Santiago de Anaya y Valle del Mezquital, estado de Hidalgo.
- Burton, E.D., Johnston, S.G., Bush, R.T., 2011. Microbial sulfidogenesis in ferrihydrite-rich environments: effects on iron mineralogy and arsenic mobility. *Geochim-Cosmochim. Acta* 75 (11), 3072–3087.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2001), 'Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0', Technical Report, Canadian Council of Ministers of the environment Winnipeg, MB, Canada. Disponible: <http://www.ccme.ca/sourcetotap/wqi.html>.
- Cifuentes, E., U. Blumenthal, G. Ruiz-Palacios, S. Bennett y A. Peasey. 1994. Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México. *Salud Pública en México* 36 (1): 1-7.
- Comisión Federal de Electricidad, 1996, "Estudio Geohidrológico de Factibilidad para la Localización de Tres pozos de Abastecimiento de Agua Subterránea para la Refinería Miguel Hidalgo, en Tula de Allende, Hidalgo", Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua), 2000. Estudio para evaluar la factibilidad de suministrar agua potable al Valle de México a partir del acuífero del Valle del mezquital (Informe final), Instituto de Ingeniería de la UNAM Conagua.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua), 2002, Determinación de la disponibilidad del agua en el Acuífero del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo, Reporte interno, 25 pp.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua), 2009. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (1310) del Valle del mezquital, estado de Hidalgo (publicada en el diario oficial de la federación el 28 de agosto de 2009).
- Comisión Nacional del Agua, 2013, "Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle del Mezquital (1310) estado de Hidalgo, México", subdirección general técnica, 40 p.
- Comisión Nacional del Agua, British Geological Survey, London School of Hygiene and Tropical Medicine y University of Briminham, 1998, "Impact of Wastewater Reuse on Groundwater in The Mezquital Valley, Hidalgo State Mexico", Reino Unido, Department for international development, 156 p.
- Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Calidad del Agua. Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua a partir de 2012.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436-368.
- Del Arenal, C.R. Estudio hidrogeoquímico de la porción centro-oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 1985, 6, 86–97.
- DOF (2000). NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Diario Oficial de la Federación (DOF). 20 de junio de 2000.
- DOF, (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación. Disponible en línea: <https://>

www.dof.gob.mx/nota\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022 (consultada el 15 de abril de 2022).

- Froehlich, K., Kralik, M., Rank, D., & Scheifinger, H. (2008). Deuterium excess in precipitation of Alpine regions - Moisture recycling. *Isotopes in Environmental Health Studies*, Vol. 44, Num. 1: 61–70.
- Geocalli, S.A., 1981, Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital, Hgo. Estudio elaborado para la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 87 pp.
- Guédrón, S.; Duwig, C.; Prado, B.L.; Point, D.; Flores, M.G.; Siebe, C. 2014. (Methyl) Mercury, arsenic, and lead contamination of the world's largest wastewater irrigation system: The Mezquital Valley (Hidalgo State—Mexico). *Water Air Soil Pollut.* 2014, 225, 1–19.
- Hernández-Espriú, A.; Arango-Galván, C.; Reyes-Pimentel, A.; Martínez-Santos, P.; Pita de la Paz, C.; Macías-Medrano, S.; Arias-Paz, A.; Breña-Naranjo, J. Water supply source evaluation in unmanaged aquifer recharge zones: The Mezquital Valle y (Mexico) case study. *Water* 2017, 9, 4.
- IMTA. 2010. Análisis técnico y pruebas de potabilización del agua del acuífero del Valle del mezquital, en diversos municipios del estado de Hidalgo.
- Jiménez, B., Chávez, A., 2004. Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: “El Mezquital Valley” case. *Water Sci. Technol.* 50, 269–276. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0141>.
- Kinjo, T., Pratt, P., 1971. Nitrate adsorption: II. In competition with chloride, sulfate, and phosphate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35 (5), 725–728.
- Kocar, B.D., Borch, T., Fendorf, S., 2010. Arsenic repartitioning during biogenic sulfidization and transformation of ferrihydrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74 (3), 980–994.
- Lesser, L.E., Mora, A., Moreau, C., Mahlknecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A.I., Barrios-Piña, H., 2018. Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere* 198, 510–521. <https://doi.org/10.1016/j.Chemosphere.2018.01.154>.
- Lesser-Carrillo Luis E, Lesser-Illades Juan M., Arellano Islas Santiago, González David, 2011, “Balance Hídrico y Calidad del Agua Subterránea en el Acuífero del Valle del Mezquital, México”, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, volumen 28 núm. 3, pp. 323-336.
- Li, S., Yang, C., Peng, C., Li, H., Liu, B., Chen, C., et al., 2018. Effects of elevated sulfate concentration on the mobility of arsenic in the sediment–water interface. *Ecotoxicol. Environ. Safety* 154, 311–320.
- Manning, B.A., Goldberg, S., 1996a. Modeling arsenate competitive adsorption on kaolinite, montmorillonite and illite. *Clays Clay Miner.* 44 (5), 609–623.
- Manning, B.A., Goldberg, S., 1996b. Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 (1), 121–131.
- Marín Celestino, Ana E.; Ramos Leal, José A.; Martínez Cruz, Diego A.; Tuxpan Vargas, José; De Lara Basulto, Josue; Morán Ramírez, Janete. 2019. “Identification of the Hydrogeochemical Processes and Assessment of Groundwater Quality, Using Multivariate Statistical Approaches and Water Quality Index in a Wastewater Irrigated Region” *Water* 11, no. 8: 1702. <https://doi.org/10.3390/w11081702>.
- Pérez, R., Jiménez B., Jiménez Chávez A: 2000. ¿El agua del Valle del Mezquital, fuente de abastecimiento para el Valle de México? Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Song, Y., Wang, S., Jia, Y., Yuan, Z., Wang, X., Gomez, M.A., 2015. Effects of nutrient and sulfate additions on *As* mobility in contaminated soils: a laboratory column study. *Chemosphere* 119, 902–909.
- Stewart, M.K. (1975). Stable isotope fractionation due to evaporation and isotope exchange of falling water drops: application to atmospheric processes and evaporation of lakes. *Journal of Geophysical Research.* 80, 1133–1146.



- Victoria, R., Martinelli, L., Mortatti, J., & Richey, J. (1991). Mechanisms of Water Recycling in the Amazon Basin: Isotopic Insights. *Ambio*. 20(8), 384-387.
- WHO (2021). Arsénico. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>. 7 de diciembre de 2022.
- WHO. (2017). Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed.; Incorporating 1st and 2nd Addenda; WHO: Geneva, Switzerland, 2017; Volume 1.
- Xu, H., Allard, B., Grimvall, A., 1988. Influence of pH and organic substance on the adsorption of As (V) on geologic materials. *Water Air Soil Pollut.* 40 (3-4), 293-305.
- Yu, G.; Wang, J.; Liu, L.; Li, Y.; Zhang, Y.; Wang, S. (2022). The Analysis of Groundwater Nitrate Pollution and Health Risk Assessment in Rural Areas of Yantai, China. *BMC Public Health* 2020, 20, 437, doi:10.1186/s12889-020-08583-y.
- Zhang, P.C., Sparks, D.L., 1990. Kinetics and mechanisms of sulfate adsorption/ desorption on goethite using pressure-jump relaxation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 (5),1266-1273.

