

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA RECUPERACIÓN DEL OJO DE AGUA LA CIÉNEGA UBICADO EN SAN SEBASTIÁN ZINACATEPEC



Gobierno de Puebla
Hacer historia. Hacer futuro.



Secretaría de
Medio Ambiente,
Desarrollo Sustentable y
Ordenamiento Territorial
Gobierno de Puebla

ENTREGABLE FINAL

Diciembre 2021

DIRECTORIO

Miguel Barbosa Huerta

Gobernador del Estado de Puebla

Beatriz Manrique Guevara

Secretaria de Medio Ambiente, Desarrollo
Sustentable y Ordenamiento Territorial

Santiago Creuheras Díaz

Subsecretario de Gestión Ambiental y
Sustentabilidad Energética

José Luis Ismael Simental

Director de Seguridad Hídrica y Transición
Energética



ELABORACIÓN TÉCNICA DEL DOCUMENTO

María de la Cruz Martínez Portugal

COLABORACIÓN

Karla Itzel Galeana Bustos

Yolanda Graciela Falcón Arias

José Roberto Suriano Chacón

Luis Fernando Díaz Medina

Everit Ignacio Mora Guzmán

Raúl Calixto Andriano

Raúl Mayorga Rapozzo

Dulce Jimena Moreno Pérez

Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Tehuacán (COTAS Tehuacán)

Contenido

1.	<i>Antecedentes</i>	11
2.	<i>Objetivo General</i>	33
3.	<i>Objetivos Específicos</i>	33
4.	<i>Metodología</i>	37
5.	<i>Marco Jurídico Aplicable</i>	43
5.1	Orden Federal	43
5.1.1	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y leyes generales	43
5.1.2	Uso y explotación	47
5.1.3	Derecho humano al agua.....	49
5.2	Leyes Estatales	49
6.	<i>Balance hídrico</i>	54
6.1	Geohidrología	54
6.2	Hidrología	58
6.3	Fisiografía	60
6.4	Geología	60
6.5	Estratigrafía	61
6.6	Geología estructural	64
6.7	Geología del subsuelo	65
6.8	Climatología	66
6.9	Económica	68
6.10	Social	69
6.11	Protección ambiental	71
6.12	Análisis del nivel estático	71
6.13	Balance del acuífero	89
6.14	Índice de escasez hídrica	99
7.	<i>Análisis de factibilidad para la aplicación de técnicas a fin restaurar el acuífero....</i>	103
7.1	Análisis histórico del clima a nivel regional	105
7.1.1	Generación de escenarios y ventanas climáticas	109
7.1.2	Tiempos de retorno a nivel regional	117
7.1.3	Impacto de los huracanes.....	121
7.2	Análisis climático local	123

7.2.1	Tiempos de retorno a nivel local	126
7.2.2	Análisis de extremos climáticos.....	129
8.	<i>Determinación de grado de deterioro del acuífero</i>	139
8.1	Determinación del grado de azolve de “La Ciénega”	140
8.2	Determinación del volumen de azolve en el manantial “La Ciénega”	146
8.3	Aforo en el manantial La Ciénega	152
8.4	Monitoreos de calidad del agua	164
9.	<i>Propuestas alternativas de restauración integral del acuífero</i>	173
9.1	Revisión del Plan de Manejo existente	173
9.2	Zonificación	176
9.3	Alternativas de restauración	187
10.	<i>Estimación del costo-beneficio de las alternativas de recuperación</i>	201
10.1	Situación actual	201
10.2	Situación optimizada.....	210
10.3	Situación con Proyecto.....	210
11.	<i>Evaluación de las obras de restauración existentes</i>	227
12.	<i>Censo de la micro-cuenca</i>	232
12.1	Posibles aprovechamientos no autorizados	232
12.2	Industrias existentes en la zona de estudio.....	239
12.3	Posibles descargas no registradas.....	240
13.	<i>Plan de manejo integral del acuífero</i>	245
13.1	Acciones estructurales	247
13.2	Acciones de conservación	260
13.3	Recomendaciones en cuanto a proyectos sustentables que sean compatibles con el cumplimiento de las acciones anteriormente citadas	273
13.4	Ruta Crítica	290
13.5	Sistema de monitoreo, evaluación y seguimiento de diversos indicadores que permita observar y analizar la ejecución de las acciones de recuperación, propuestas para medir su avance y el logro de sus objetivos, confrontando el avance programado contra el real.	296
14.	<i>Conclusiones</i>	299
	Referencias.....	302

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Galería filtrante en Tehuacán, Puebla.....	12
Figura 1.2 Isopiezas y dirección de flujo en el año 2008.....	23
Figura 1.3 Evolución del nivel piezométrico durante el periodo 1996-2008.	24
Figura 1.4 Evolución anual del nivel piezométrico durante el periodo 1996-2008.....	25
Figura 1.5 Manantial La Ciénega COT-183.	28
Figura 1.6 Manantial Coyoatl COT-184.	29
Figura 1.7 Manantial Tochtalt COT-185.	30
Figura 4.1 Expresión de disponibilidad media anual del agua del subsuelo del acuífero.	37
Figura 4.2 Expresión para la recarga total del acuífero en un determinado tiempo.	39
Figura 4.3 Características de los Objetivos SMART.	39
Figura 4.4 Diagrama conceptual metodológico.	40
Figura 6.1 Unidades geo hidrológicas y condiciones del acuífero.....	57
Figura 6.2 Funcionamiento del sistema del acuífero.	58
Figura 6.3 Sección Hidrogeológica.	59
Figura 6.4 Geología del Valle de Tehuacán.	64
Figura 7.1 Estructura del Plan	135
Figura 8.1 Sedimentos del manantial La Ciénega.....	143
Figura 8.2 Sedimentos del manantial La Ciénega.....	144
Figura 8.3 Temporalidad histórica satelital de los cambios ambientales – naturales que se han suscitado en el manantial La Ciénega.	144
Figura 8.4 Comparativa pérdida de cubierta forestal y degradación del suelo.....	146
Figura 8.5 Mediciones del azolve realizados en el sitio.	147
Figura 8.6 Puntos de medición en el sitio.	149
Figura 8.7 Vista del manantial Tochtatl.	153
Figura 8.8 Molinete digital.	156
Figura 8.9 Sección 1. Manantial Tochtatl.	159
Figura 8.10 Sección 2. Manantial Tochtatl.	160
Figura 8.11 Sección 1. Manantial Coyoatl.	161
Figura 8.12 Sección 2. Manantial Coyoatl.	162
Figura 8.13 Sección 1. Manantial La Ciénega.....	163
Figura 8.14 Muestras recolectadas in situ para la determinación de contaminantes.	164
Figura 12.1 Fotografías de descargas ubicadas en recorridos de campo.....	241
Figura 13.1 Zanja Bordo.	248
Figura 13.2 Zanja Trinchera.....	250
Figura 13.3 Bordos en curvas de nivel.	252
Figura 13.4 Bordos almacenador de agua de escorrentía.....	255
Figura 13.5 Cercado.	257
Figura 13.6 Zanjas derivadoras de escorrentía.	258
Figura 13.7 Sistemas agroforestales.	262
Figura 13.8 Acción propuesta: Zanjas bordo.....	276
Figura 13.9 Acción propuesta: Zanjas trinchera.....	277
Figura 13.10 Acción propuesta: Bordos en curvas de nivel.	278

Figura 13.11 Acción propuesta: Bordo almacenador de agua de escorrentía.	279
Figura 13.12 Acción propuesta: Cercado.	280
Figura 13.13 Acción propuesta: Zanjas derivadoras de escorrentía.	281
Figura 13.14 Acción propuesta: Sistemas agroforestales.	282
Figura 13.15 Acción propuesta: Desazolve del manantial La Ciénega.	283
Figura 13.16 Acción propuesta: Certificación como Área Destinada Voluntariamente a la Conservación.....	284
Figura 13.17 Acción propuesta: Programa de educación ambiental.	285
Figura 13.18 Acción propuesta: Campaña de limpieza de RSU.....	286
Figura 13.19 Acción propuesta: Fomento al aprovechamiento de cría de peces.	287
Figura 13.20 Acción propuesta: Aprovechamiento de miel.	288
Figura 13.21 Acción propuesta: Turismo sustentable.....	289
Figura 13.22 Ruta crítica.	291
Figura 13.23 Acciones inmediatas.....	292
Figura 13.24 Acciones a mediano plazo.....	293
Figura 13.25 Acciones de seguimiento.	294

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Municipios ubicados dentro de los límites geográficos del acuífero Valle de Tehuacán.	13
Tabla 1.2 Población actual dentro del acuífero del Valle de Tehuacán.....	15
Tabla 1.3 Disponibilidad publicada en el Diario Oficial de la Federación.....	18
Tabla 1.4 Unidades Hidrogeológicas del acuífero del Valle de Tehuacán y sus correspondientes Unidades Geológicas.....	20
Tabla 4.1 Metodologías a emplear.....	40
Tabla 5.1 Cambio en la disponibilidad de agua.	43
Tabla 6.1 Usos del agua en el acuífero del Valle de Tehuacán.....	70
Tabla 6.2 Listado de pozos y profundidad del nivel estático para los años 2017 – 2008.....	77
Tabla 6.3 Disponibilidad publicada en el Diario Oficial de la Federación.....	92
Tabla 6.4 Cultivos y superficie de riego (ha), del acuífero Valle de Tehuacán.	92
Tabla 6.5 Formato de hoja de cálculo de uso consuntivo.	95
Tabla 6.6 Superficies de cultivo en el acuífero del Valle de Tehuacán.....	95
Tabla 6.7 Proyecciones de población en el acuífero del valle de Tehuacán.	96
Tabla 6.8 Usos consuntivos actuales y escenarios.	97
Tabla 6.9 Categorías de presión sobre el recurso hídrico.....	100
Tabla 6.10 Índice de escasez del acuífero del Valle de Tehuacán.....	100
Tabla 7.1 Generación de emisiones.	109
Tabla 7.2 Escenarios de anomalía para temperatura y precipitación para la microrregión sierra negra.	112
Tabla 7.3 Aumento de la temperatura media anual (°C).....	112
Tabla 7.4 Porcentaje de disminución de la precipitación.....	112
Tabla 7.5 Precipitación media anual de la zona.	117
Tabla 7.6 Precipitación-duración-periodo de retorno.	118

Tabla 7.7 Intensidades máximas de lluvia a diferentes tiempos de retorno.....	120
Tabla 7.8. Estaciones climatológicas consideradas para el análisis local.	124
Tabla 7.9 Categorías de intensidad de la sequía.	129
Tabla 8.1 Determinación de compuestos minerales en lodos, espectroscopía infrarroja.	150
Tabla 8.2 Determinación de elementos en lodos, espectroscopía de adsorción atómica.	151
Tabla 8.3 Determinación de carbón orgánico y carbón mineral en lodos.	151
Tabla 8.4 Método de los puntos.	157
Tabla 8.5 Cálculo del caudal en la sección 1 manantial Tochatl.....	159
Tabla 8.6 Cálculo del caudal en la sección 1 manantial Tochatl.....	160
Tabla 8.7 Cálculo del caudal en la sección 1 del manantial Coyoatl	162
Tabla 8.8 Cálculo del caudal de la sección 2 del manantial Coyoatl	163
Tabla 8.9 Cálculo del caudal en la sección 1 del manantial Ciénega.....	164
Tabla 8.10 Calidad del agua de manantiales.	165
Tabla 9.1 Información cartográfica temática utilizada para la construcción de los criterios de zonificación del acuífero Valle de Tehuacán.	177
Tabla 9.2 Criterios de zonificación para la categoría de aptitud de uso de suelo.	182
Tabla 9.3 Criterios de zonificación para la categoría de aptitud hídrica.	184
Tabla 9.4 Criterios de zonificación para la categoría de zonas prioritarias.	185
Tabla 9.5 Criterios de zonificación para la categoría de zonas prioritarias.	186
Tabla 9.6 Métodos basados en infiltración para recarga de acuíferos no confinados.....	189
Tabla 9.7 Criterios de selección del método de recarga.	190
Tabla 9.8 Obras de conservación de suelo recomendadas para erosión hídrica laminar.	192
Tabla 10.1 Acuíferos que colindan en el estado de Puebla.....	201
Tabla 10.2 Población de los municipios ubicados en el Acuífero del Valle de Tehuacán.....	207
Tabla 10.3 Consumo de agua por sector.....	207
Tabla 10.4 Usos consuntivos actuales y escenarios.	208
Tabla 10.5 Acciones propuestas.....	212
Tabla 10.6 Costos estimados de acciones a implementar.	215
Tabla 10.7 Plan de manejo, zonas y unidades de paisaje.....	222
Tabla 10.8 Programa de Ejecución.....	224
Tabla 12.1 Descargas identificadas en Registro Público de Derechos de Agua y otras identificadas en campo.	240
Tabla 12.2 Lista de posibles descargas no registradas.	243
Tabla 13.1 Calendario de plantación.....	264
Tabla 13.2 Especies recomendadas para la reforestación.	264
Tabla 13.3 Ejemplos de desazolves realizados en otras entidades.	267
Tabla 13.4 Calendario de implementación de acciones.....	295
Tabla 13.5 Ejemplos de diferentes categorías de indicadores.	298
Tabla 13.6 Indicadores de seguimiento y evaluación	298

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 6.1 Evolución de la profundidad del nivel estático del Valle de Tehuacán 1996-2017..	79
Gráfica 6.2 Evolución de la profundidad del nivel estático 1996 - 2021.....	80

Gráfica 6.3 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH01, TH02 y TH62.....	84
Gráfica 6.4 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH03 y TH04.	85
Gráfica 6.5 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH05 y TH06.	85
Gráfica 6.6 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH07 y TH08.	86
Gráfica 6.7 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH09 y TH10.	87
Gráfica 6.8 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH13 y TH14.	87
Gráfica 6.9 Proyección del Balance acuífero del Valle de Tehuacán, recarga vs demanda.....	98
Gráfica 7.1 Promedio de la temperatura media anual en el Polígono.	108
Gráfica 7.2 Promedio histórico de la precipitación pluvial en el Polígono.	108
Gráfica 7.3 Temperatura media anual.	110
Gráfica 7.4 Precipitación pluvial media anual.	111
Gráfica 7.5 Porcentaje de tendencia de extremos climáticos relacionados con la	113
Gráfica 7.6 Curvas P – D – Tr por el método de Bell.	119
Gráfica 7.7 Curvas I – D – Tr por el método de Bell.	121
Gráfica 7.8 Probabilidad por década de que al menos un Huracán afecte la región en un año.	123
Gráfica 7.9. Relación lluvia anual – altitud.	124
Gráfica 7.10. Marcha anual de precipitación pluvial.	125
Gráfica 7.11. Estación de Calipan, sequía de 2018.	126
Gráfica 7.12. Periodos de retorno para las 4 estaciones.	127
Gráfica 7.13. Tendencia significativa de la temperatura máxima extrema (TXX) en la estación de Tehuacán.....	128
Gráfica 7.14 Intensidad de sequía, Caltepec.....	130
Gráfica 7.15 Intensidad de sequía, Calipan.	131
Gráfica 7.16 Intensidad de sequía, Tehuacán.	132
Gráfica 7.17 Intensidad de sequía, Zapotitlán.....	132
Gráfica 7.18 Número de días con heladas al año, Caltepec.	134
Gráfica 7.19 Número de días con heladas al año, Zapotitlán.....	134
Gráfica 8.1 Profundidad del sedimento en el manantial La Ciénega.	149
Gráfica 10.1 Proyección del balance acuífero de Tehuacán, recarga vs demanda.	209

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1.1 Localización del acuífero Valle de Tehuacán.....	14
Mapa 1.2 Ubicación de los municipios que conforman al acuífero Valle de Tehuacán.	15
Mapa 1.3 Microcuencas del acuífero del Valle de Tehuacán.....	17
Mapa 1.4 Volumen concesionado por cuenca.....	19
Mapa 1.5 Aprovechamientos subterráneos, clasificados por uso.	21
Mapa 1.6 Profundidad del nivel estático en 1996.	22
Mapa 1.7 Profundidad del nivel estático en el año 2008.....	22
Mapa 1.8 Evolución del nivel estático en el período 2008-2017.	26
Mapa 1.9 Profundidad al nivel estático en 2017.....	27
Mapa 6.1 Geo-hidrología del acuífero del Tehuacán.....	55
Mapa 6.2 Conexión geo hidrológica entre acuíferos con el del Valle de Tehuacán.....	56

Mapa 6.3 Unidades climáticas en el acuífero del Valle de Tehuacán.	67
Mapa 6.4 Precipitación promedio en mm.	68
Mapa 6.5 Aprovechamientos subterráneos por tipo de uso.	70
Mapa 6.6 Profundidad del Acuífero del Valle de Tehuacán 2008.	72
Mapa 6.7 Profundidad del Acuífero del Valle de Tehuacán 2017.	73
Mapa 6.8 Elevación del nivel estático del año 2008, acuífero del Valle de Tehuacán.	74
Mapa 6.9 Elevación del nivel estático 2017, acuífero del valle de Tehuacán.	75
Mapa 6.10 Evolución 2008 – 2017.	76
Mapa 6.11 Abatimiento medio anual del acuífero del Valle de Tehuacán 2008-2017.	78
Mapa 6.12 Ubicación de pozos, 2021.	82
Mapa 6.13 Pozos de uso urbano y agrícola, 2021.	83
Mapa 6.14 Nivel estático de pozos (m), 2021.	88
Mapa 6.15 Variación del nivel estático de pozos en el periodo 2017-2021 (m).	89
Mapa 7.1 Área de análisis climático y estaciones climatológicas.	106
Mapa 7.2 Tendencias de extremos climáticos relacionados con la temperatura.	114
Mapa 7.3 Tendencias de los extremos climáticos relacionados con la precipitación pluvial.	116
Mapa 7.4 Huracanes que han afectado la Región.	122
Mapa 8.1 Topografía y elevaciones manantial La Ciénega.	141
Mapa 8.2 Perfiles del manantial La Ciénega.	142
Mapa 8.3 Área con presencia de sedimentos en los cuerpos de agua.	148
Mapa 9.1 Acciones de manejo de cuenca 2006 – 2009.	174
Mapa 9.2 Presas de gavión en Sierra Negra.	175
Mapa 9.3 Aptitud del uso de suelo del acuífero de Tehuacán.	178
Mapa 9.4 Aptitud hídrica del acuífero de Tehuacán.	179
Mapa 9.5 Zonas prioritarias.	180
Mapa 9.6 Zonas de Erosión.	181
Mapa 9.7 Criterios de zonificación por el uso potencial del suelo.	183
Mapa 9.8 Criterios de zonificación por aptitud hídrica.	185
Mapa 9.9 Zonificación a nivel acuífero.	186
Mapa 9.10 Zonificación del área circundante a los manantiales.	187
Mapa 12.1 Posibles extracciones no autorizadas.	232
Mapa 13.1 Propuesta para realizar Zanja Bordo.	249
Mapa 13.2 Propuesta para realizar Zanja Trinchera.	251
Mapa 13.3 Superficie propuesta para realizar bordos en curvas de nivel.	254
Mapa 13.4 Superficie propuesta para realizar bordos almacenadores de agua de escorrentía.	255
Mapa 13.5 Superficie propuesta para realizar el cercado.	257
Mapa 13.6 Superficie propuesta para realizar las zanjas derivadoras de escorrentía.	259
Mapa 13.7 Ubicación de la propuesta integral de acciones estructurales.	260
Mapa 13.8 Superficie propuesta para realizar los sistemas agroforestales.	263
Mapa 13.9 Propuesta de reutilización de sedimentos.	270



1

ANTECEDENTES



I. Antecedentes

El estado de Puebla se asienta sobre cuatro cuencas hidrológicas, siendo estas por orden de extensión: Balsas, Tuxpan-Nautla, Papaloapan y Pánuco. De estas, la región del Balsas representa casi el 60% del territorio poblano y desemboca en el océano Pacífico, mientras que el resto de las cuencas hidrológicas desembocan en el Golfo de México.

La región del Papaloapan se ubica en la porción sureste del Estado, cubre casi el 17% de la superficie de este y da origen al río del mismo nombre que nace en el árido Valle de Tehuacán. Asimismo, en el estado de Puebla colindan seis acuíferos: Valle de Tecamachalco (Clave 2101), Libres - Oriental (Clave 2102), Atlixco - Izúcar de Matamoros (Clave 2103), Valle de Puebla (2104), Valle de Tehuacán (Clave 2105) e Ixcaquixtla (Clave 2106).

De estos, los acuíferos del Valle de Tecamachalco y Atlixco – Izúcar de Matamoros presentan un déficit en la disponibilidad media anual de agua subterránea, mientras que el acuífero de Libres - Oriental apenas tiene disponibilidad. El resto de los acuíferos cuentan con disponibilidad del recurso hídrico, siendo el acuífero del Valle de Tehuacán el segundo sólo después del acuífero de Ixcaquixtla.

El acuífero del Valle de Tehuacán constituye la reserva estratégica de agua más importante para el sureste del estado de Puebla, zona donde el escurrimiento superficial es efímero y el agua subterránea históricamente ha sido una fuente de abastecimiento segura para los distintos usos.

Figura 1.1 Galería filtrante en Tehuacán, Puebla.



Fuente: Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Tehuacán (COTAS Tehuacán).

A través de la historia y hasta nuestros días, en el acuífero han perdurado estos manantiales y galerías filtrantes, que denotan la existencia de zonas con baja profundidad del nivel estático, como es el caso del manantial La Ciénega, también conocido como Ojo de Agua La Ciénega.

Sin embargo, el excesivo aprovechamiento de agua subterránea, tanto en el acuífero en comento, como en el acuífero vecino de Tecamachalco, han incidido en un proceso de agotamiento paulatino de la reserva de agua subterránea, lo que derivó en la implantación de vedas en la década de 1950.

De acuerdo con los registros de los últimos veinticinco años, en los años noventa, la profundidad del nivel estático era en general somera, con extensas zonas con profundidades menores a los 20 metros de profundidad; profundidad que actualmente se ha duplicado en gran parte de su extensión, afectando significativamente la descarga de los manantiales, que en algunos casos se han agotado.

Particularmente, la zona sur ha presentado los mayores abatimientos del nivel estático, alcanzando un ritmo próximo a los dos metros por año, situación que posiblemente incide en el comportamiento de los manantiales.

Ubicación y extensión territorial

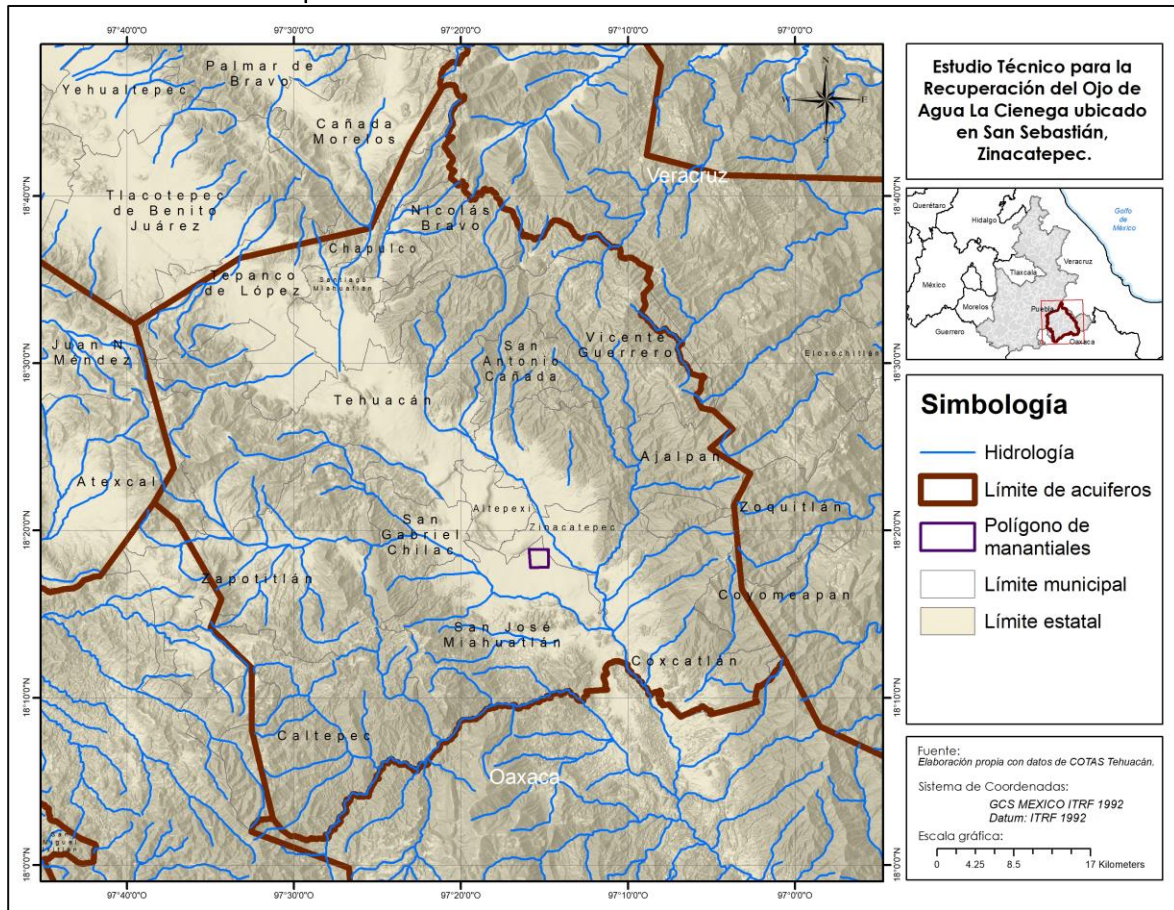
El acuífero Valle de Tehuacán se localiza en la porción sureste del estado de Puebla (ver mapa 1.1), en los límites de los estados de Oaxaca y Veracruz. El acuífero comprende 21 municipios, 8 de los cuales se encuentran dentro de la zona de estudio en forma completa y 13 en forma parcial (ver tabla 1.1). La zona donde se ubica este acuífero tiene una extensión aproximada de 3,750 kilómetros cuadrados comprendida entre las coordenadas 18° 01' y 19° 22' de latitud norte y 97° 00' y 97° 33' de longitud oeste.

Tabla 1.1 Municipios ubicados dentro de los límites geográficos del acuífero Valle de Tehuacán.

Clave	Municipio	% Dentro del Acuífero
21010	Ajalpan	65%
21013	Altepexi	100%
21018	Atexcal	12%
21099	Cañada Morelos	9%
21027	Caltepec	78%
21046	Chapulco	92%
21035	Coxcatlán	100%
21036	Coyomeapan	19%
21092	Juan N. Méndez	4%
21103	Nicolás Bravo	99%
21120	San Antonio Cañada	100%
21124	San Gabriel Chilac	100%
21129	San José Miahuatlán	100%
21149	Santiago Miahuatlán	100%
21156	Tehuacán	100%
21161	Tepanco de López	81%
21177	Tlacotepec de Benito Juárez	1%
21195	Vicente Guerrero	99%
21209	Zapotitlán	73%
21214	Zinacatepec	100%
21217	Zoquitlán	12%

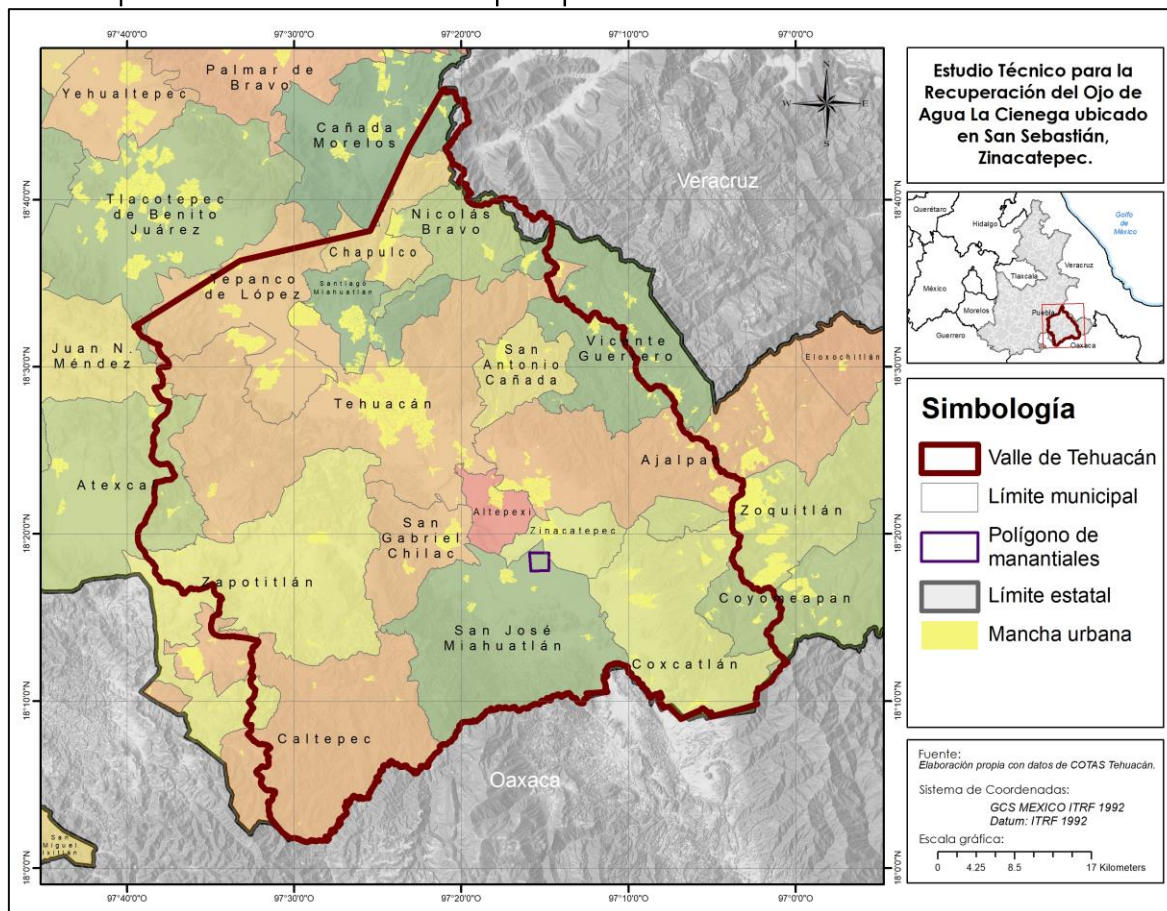
Fuente: Comisión Nacional de Agua (CONAGUA).

Mapa I.1 Localización del acuífero Valle de Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán.

Mapa 1.2 Ubicación de los municipios que conforman al acuífero Valle de Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán.

El acuífero del Valle de Tehuacán actualmente alberga a una población de 580,006 habitantes.

Tabla 1.2 Población actual dentro del acuífero del Valle de Tehuacán.

Municipio	Número de habitantes
Ajalpan	48599
Altepexi	22629
Atexcal	463
Caltepec	3220
Cañada Morelos	1859
Chapulco	7538
Coxcatlán	20653
Coyomeapan	2813
Juan N. Méndez	212
Nicolás Bravo	6578
San Antonio Cañada	5938

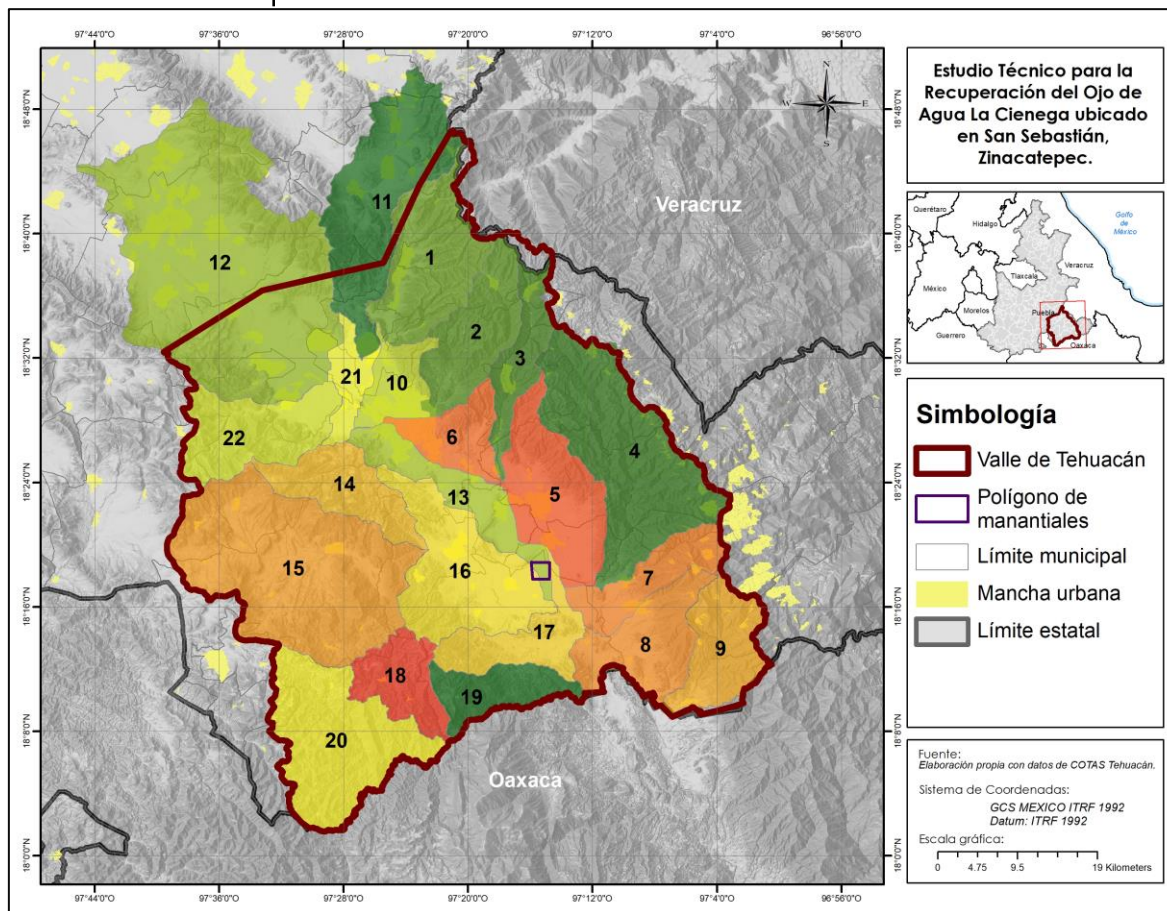
Municipio	Número de habitantes
San Gabriel Chilac	15954
San José Miahuatlán	14018
Santiago Miahuatlán	30309
Tehuacán	327312
Tepanco de López	17997
Tlacotepec de Benito Juárez	548
Vicente Guerrero	26293
Zapotitlán	6274
Zinacatepec	18359
Zoquitlán	2440
Total	580,006

Fuente: INEGI Censo de Población y Vivienda 2020.

Hidrología superficial

El escurrimiento superficial fluye en dirección norte-sur, con el ingreso de su principal afluente desde el acuífero de Tecamachalco, donde nace el río Tehuacán con un área de captación de agua superficial de 900 km² dentro del acuífero de Tecamachalco, que recibe diversos afluentes aguas abajo en el Valle de Tehuacán, con lo cual alcanza una superficie total de captación de 3,838 km², siendo los más caudalosos los provenientes de la Sierra Negra.

Mapa I.3 Microcuencas del acuífero del Valle de Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán.

Disponibilidad de agua subterránea

De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación de fecha 17 de septiembre de 2020, el acuífero del Valle de Tehuacán presenta una disponibilidad positiva de 28.19882 hm³, esto es, al acuífero ingresa más agua de la que se extrae por lo que cuenta con el recurso hídrico disponible para su explotación.

Tabla 1.3 Disponibilidad publicada en el Diario Oficial de la Federación.

Región Hidrológico - administrativo	Entidad Federativa	Clave	Acuífero	R	DNC	VEAS				DMA	
						VCAS	VEALA	VAPTYR	VAPRH	POSITIVA	Negativa (déficit)
Cifras en millones de metros cúbicos anuales											
X Golfo Centro	PUEBLA	2105	Valle de Tehuacán	246.9	81.9	133.101	0	3.70018	0	28.19882	0

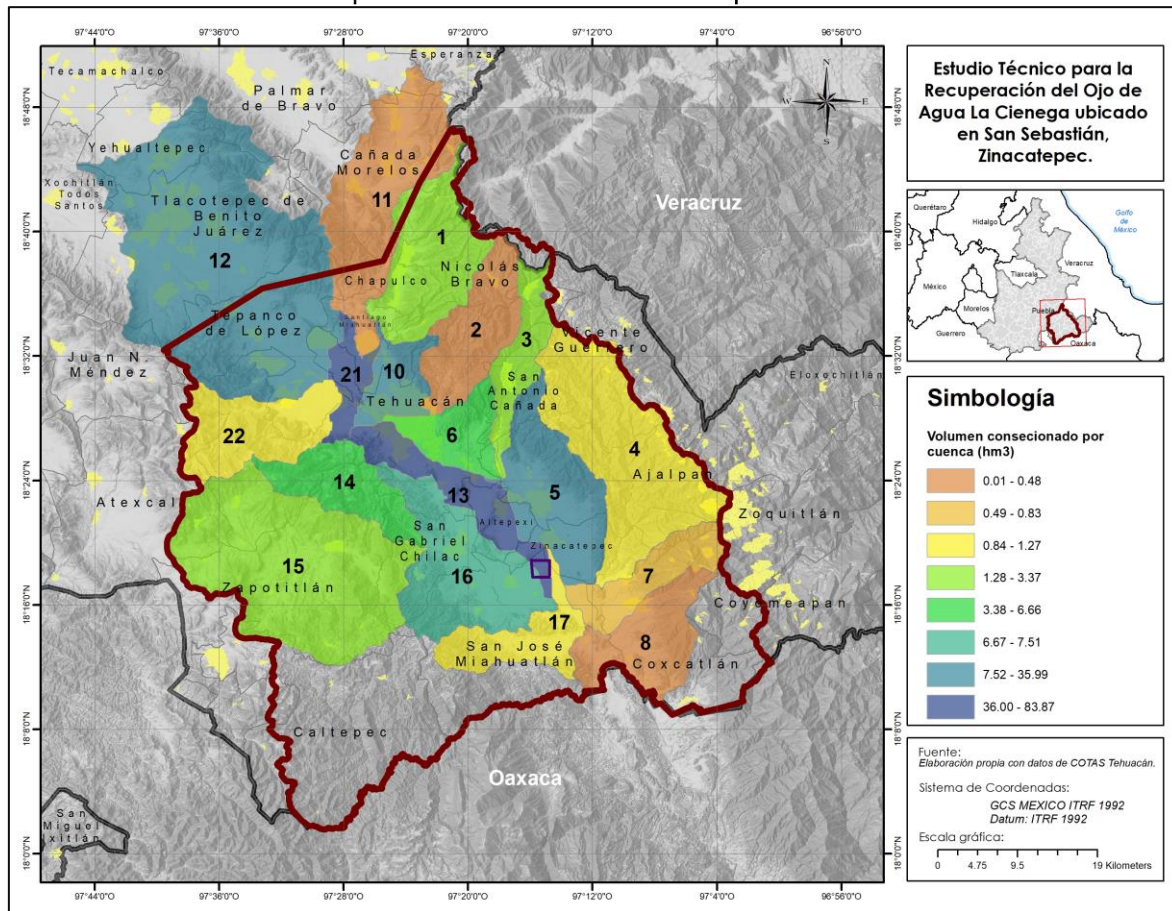
R: recarga total media anual; **DNC:** descarga natural comprometida; **VEAS:** volumen de extracción de aguas subterráneas; **VCAS:** volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; **VEALA:** volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; **VAPTYR:** volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; **VAPRH:** volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; **DMA:** disponibilidad media anual de agua del subsuelo. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" (fracciones 3.10, 3.12, 3.18 y 3.25), y "4" (fracción 4.3), de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Fuente: Diario Oficial de la Federación de fecha 17 de septiembre de 2020.

Si bien, de acuerdo con el cálculo de los estudios técnicos utilizados para la determinación de la disponibilidad, la recarga del acuífero aún permitiría la autorización de concesiones hasta por 28 hm³ anuales, la evidencia ha mostrado que existe un desequilibrio, con profundidades al nivel estático que, en lo general, son cada día mayores. De acuerdo con estudios realizados hasta el año 2011, se observaba una tendencia de abatimiento en todo el acuífero, con valores que fluctuaban desde -0.2 m/año, hasta 1.8 m/año, equivalentes a una pérdida anual de 40 hm³/año.

En los últimos años se ha observado una disminución en los caudales aportados por los manantiales y galerías filtrantes en los municipios de Tehuacán, Zinacatepec, Santiago y San José Miahuatlán y Atlix, todos ellos ubicados en la porción central del valle. De seguir esta tendencia, las galerías y manantiales continuarán disminuyendo sus descargas.

Mapa 1.4 Volumen concesionado por cuenca.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán.

Unidades hidrogeológicas

Con base en el análisis geológico establecido, se puede considerar al acuífero como una cuenca conformada por la actividad tectónica distensiva rellena por sedimentos granulares teniendo como substrato diferentes tipos de rocas sedimentarias.

La variación lateral en la granulometría, así como la poca continuidad vertical muestran características de un depósito de materiales correspondientes con ambientes de tipo fluvial y, lacustre hacia el centro del valle. Por otro lado, sedimentos de mayor granulometría conforman los abanicos aluviales, los cuales se encuentran al pie de las sierras, desarrollando sus mayores espesores en los bloques delimitados por fallas normales.

La formación de estructuras frágiles (fallas) que influyen de manera directa en el acuífero, los valores resistivos de los materiales obtenidos en los sondeos eléctricos verticales y las características petrofísicas de los sedimentos y rocas permitieron establecer las siguientes unidades hidrogeológicas, las cuales se asocian con las unidades geológicas determinadas en las secciones estructurales.

Tabla 1.4 Unidades Hidrogeológicas del acuífero del Valle de Tehuacán y sus correspondientes
Unidades Geológicas.

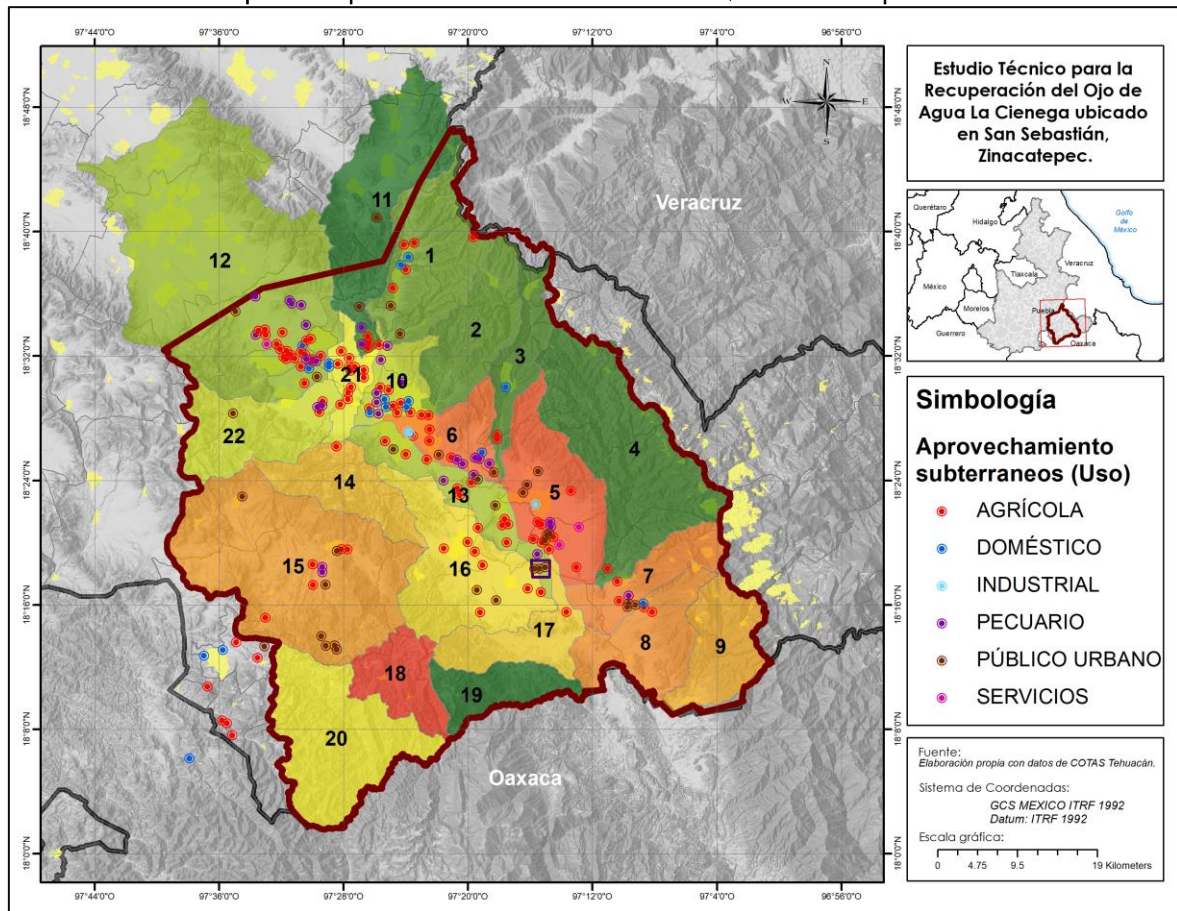
Unidad Hidrogeológica	Unidad Geológica
I	Travertino y depósitos, granulares aluviales y fluviales medianamente consolidados del Cuaternario y Terciario Superior
II	Conglomerados del Terciario Superior
III	Depósitos lacustres del Terciario Superior
IV	Calizas y lutitas del Cretácico Inferior y Superior
V	Calizas y dolomías del Cretácico Medio
VI	Areniscas y lutitas del Cretácico Inferior
VII	Areniscas y Andesitas del Cretácico Inferior
VIII	Basamento Hidrogeológico

Fuente: Plan de manejo, 2016.

Tipos de uso

Como se puede apreciar en la figura siguiente, dentro del acuífero, predominan los pozos de tipo agrícola (78.0%), seguidos por el uso público – urbano (18.2%), industrial (3.2%) y doméstico (06%). Estos totalizan un volumen de extracción de 204.5 hm³/año, además de la descarga de 52.8 hm³ anuales realizada a través de manantiales.

Mapa 1.5 Aprovechamientos subterráneos, clasificados por uso.

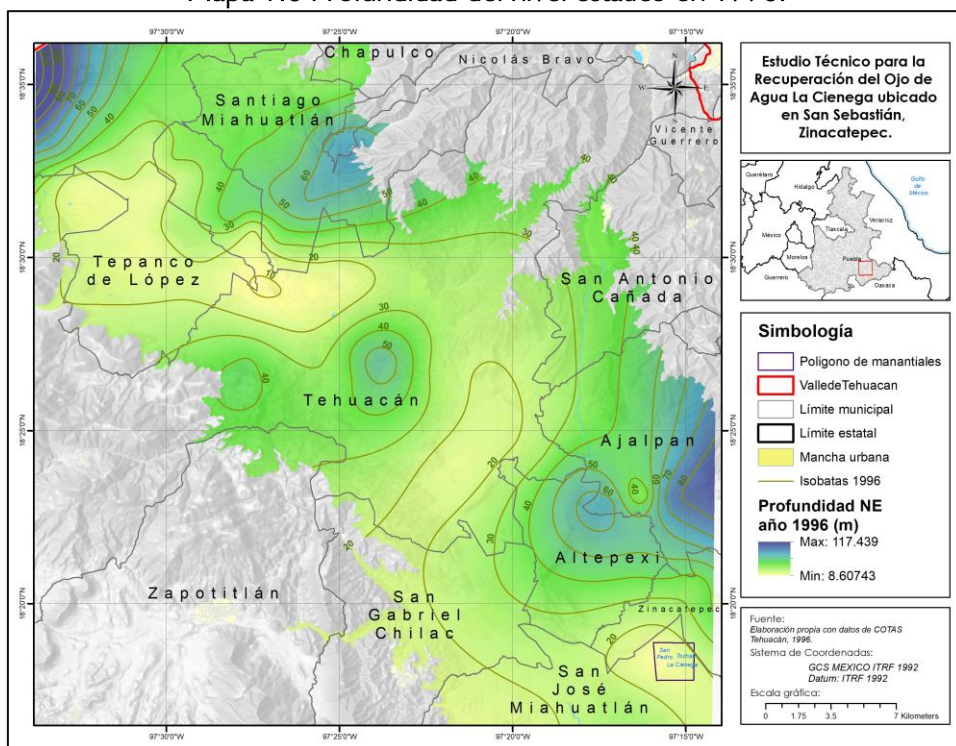


Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán.

Conforme se han hecho nuevas piezometrías, se ha constatado que el abatimiento continúa en aumento. Otra evidencia de la pérdida de almacenamiento del acuífero se encuentra en el caudal provisto por las galerías filtrantes y los manantiales.

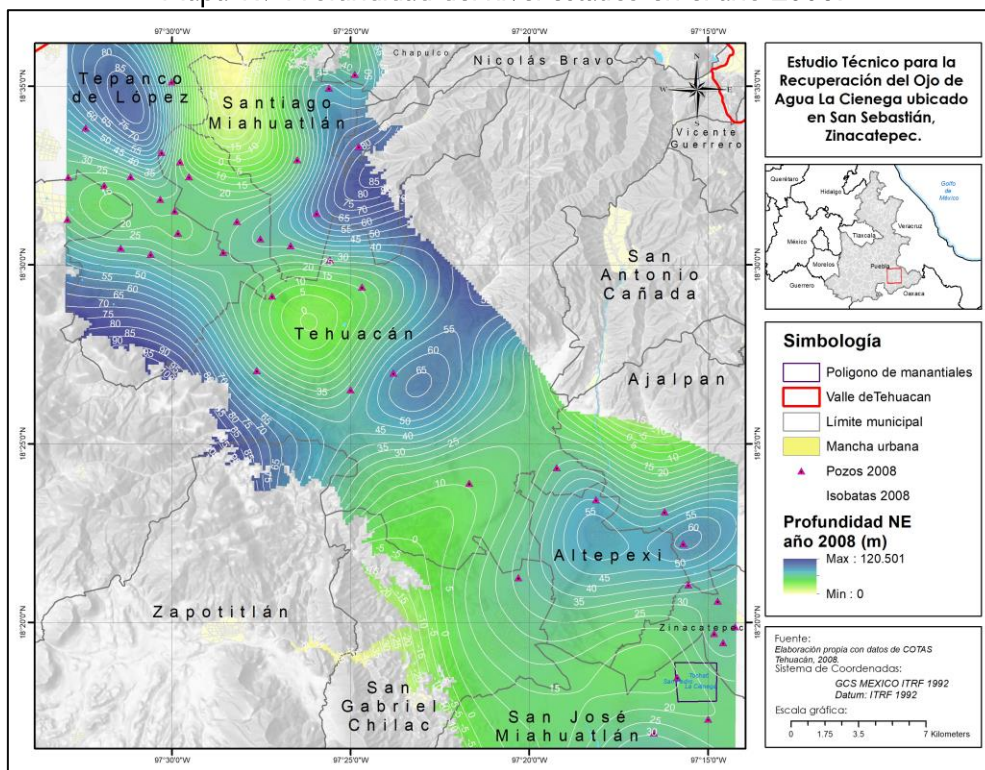
Entre las causas de desequilibrio hídrico y explotación del acuífero se han identificado la disminución de recarga proveniente del acuífero del Valle de Tecamachalco, desde el cual se ha estimado un influjo de agua subterránea que en años pasados superaba los 90 hm³ por año, esto, ya que dicho acuífero se encuentra sobreexplotado; la disminución de recarga debida a procesos de deforestación y cambio de uso de suelo que incrementan el escurrimiento que han disminuido la recarga en un orden de 8 hm³ y un aprovechamiento de agua subterránea, que supera la capacidad de recuperación natural del acuífero.

Mapa I.6 Profundidad del nivel estático en 1996.



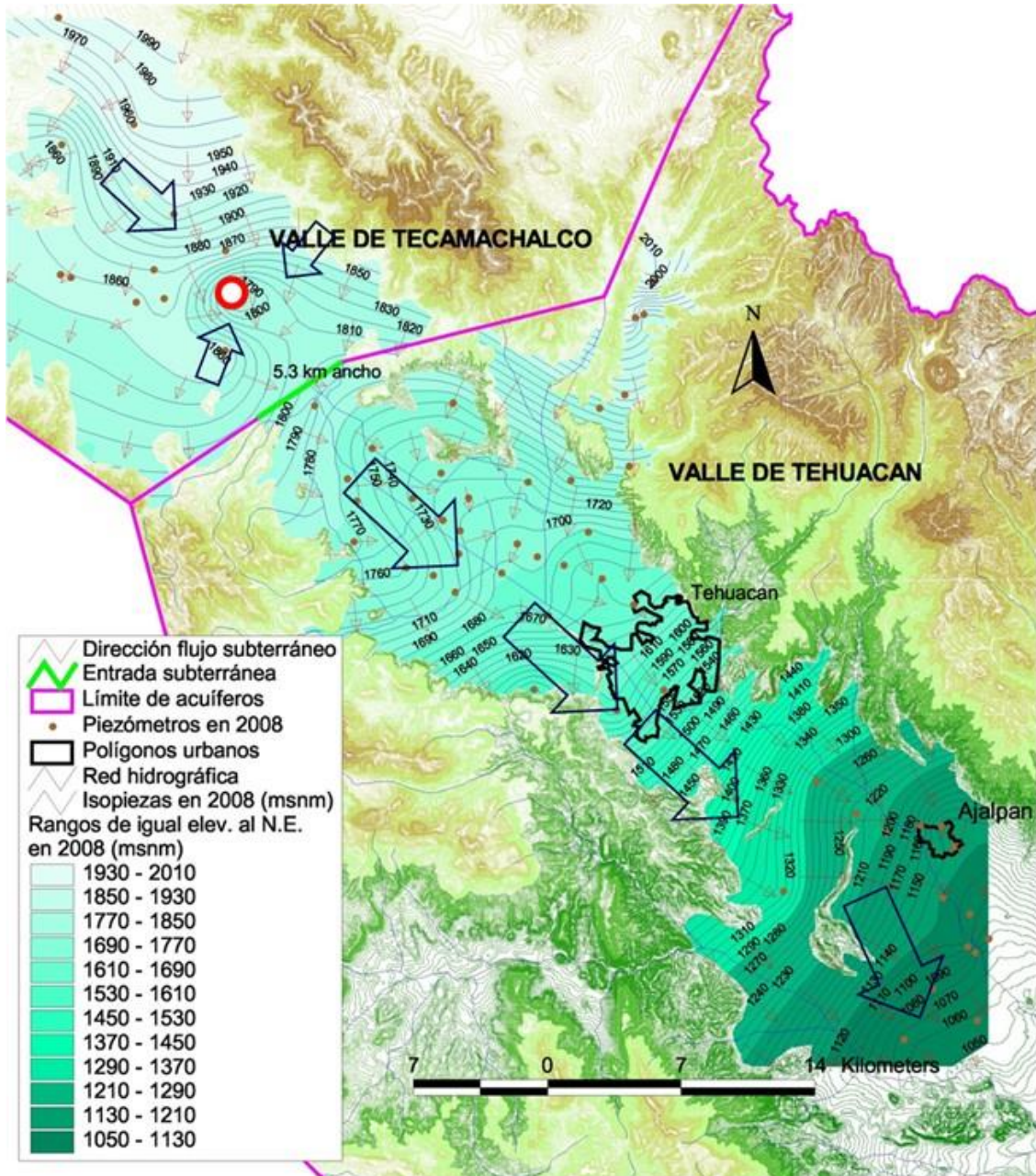
Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 1996.

Mapa I.7 Profundidad del nivel estático en el año 2008.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2008.

Figura 1.2 Isopiezas y dirección de flujo en el año 2008.



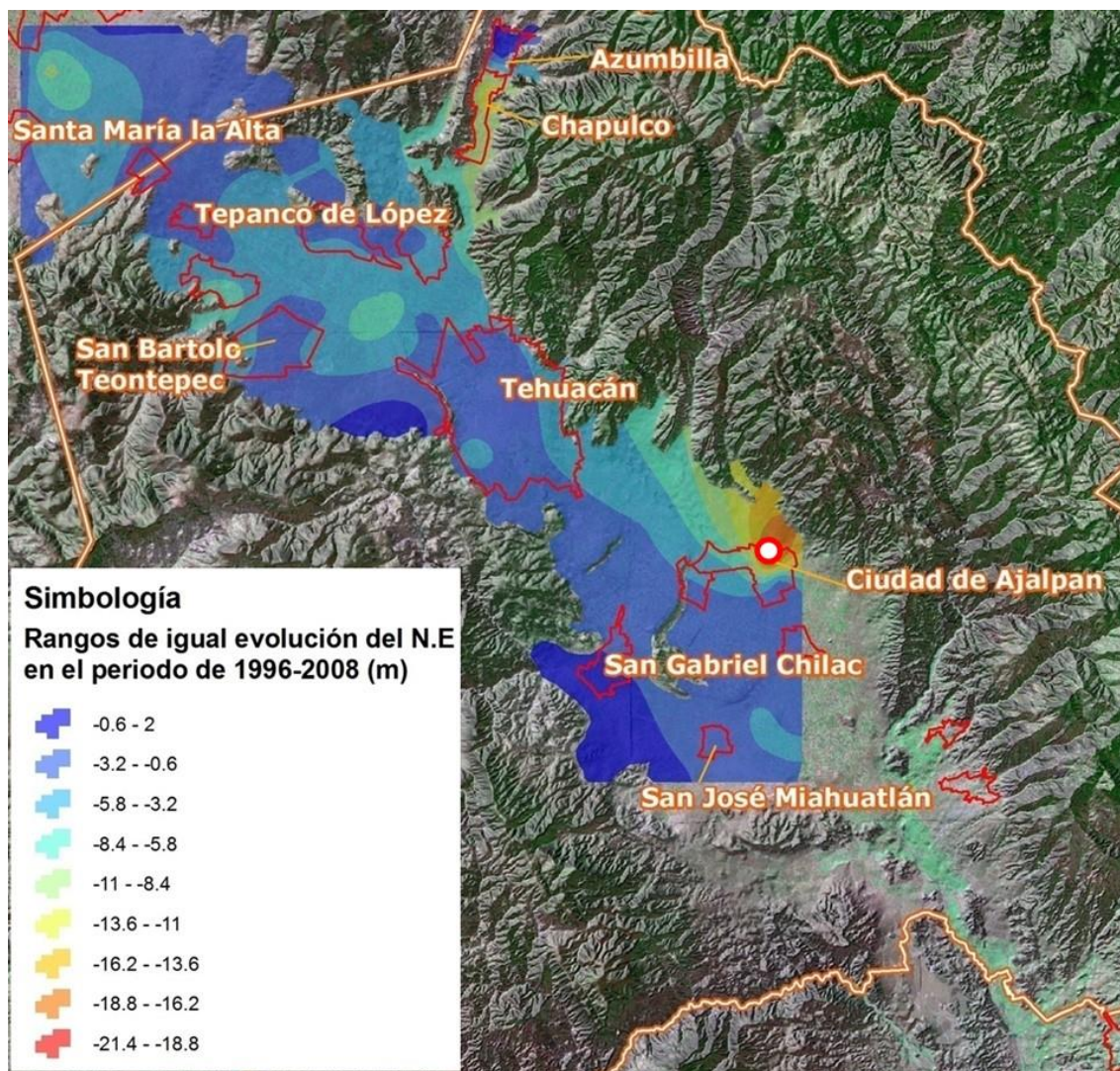
Fuente: COTAS Tehuacán, 2008.

La problemática del desequilibrio se concentra hacia el sur del acuífero, lo cual se debe en gran medida a que el flujo subterráneo ocurre en dirección norte – sur, de manera que la sobreexplotación tiene un efecto acumulativo hacia el sur; es decir, se ve afectado, tanto por la sobreexplotación local, como por la sobreexplotación de la zona norte, que disminuye el flujo de

recarga horizontal, cuando el gradiente hidráulico disminuye, así como el espesor saturado del acuífero.

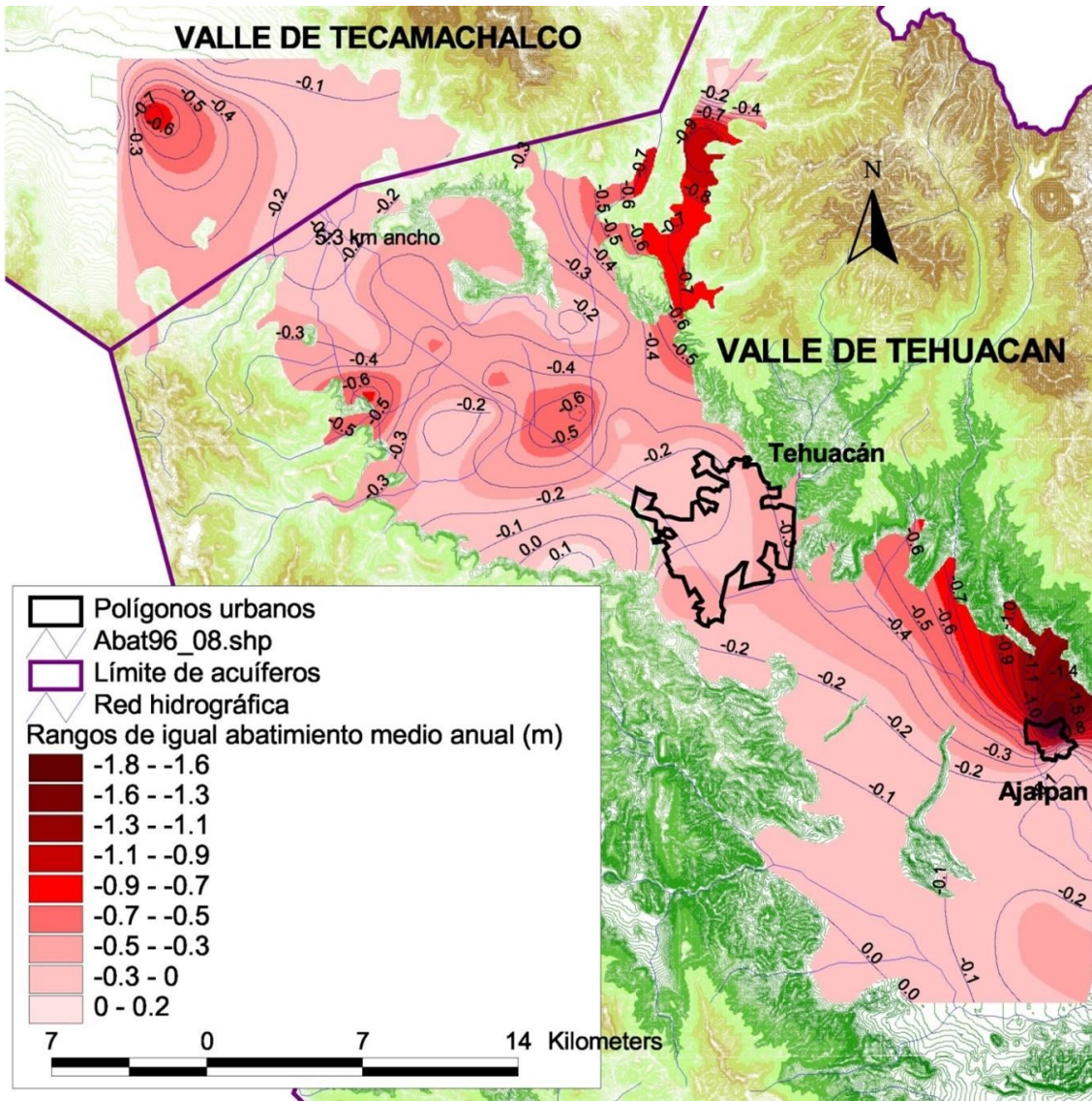
El periodo comprendido entre los años 1996 al 2008 muestra un descenso progresivo del nivel del agua subterránea, particularmente hacia el centro del valle y en las inmediaciones de la Ciudad de Tehuacán, con un valor promedio de -3.6 metros en el período, es decir un abatimiento promedio anual de 0.3 m.

Figura 1.3 Evolución del nivel piezométrico durante el periodo 1996-2008.



Fuente: COTAS Tehuacán, 1996-2008.

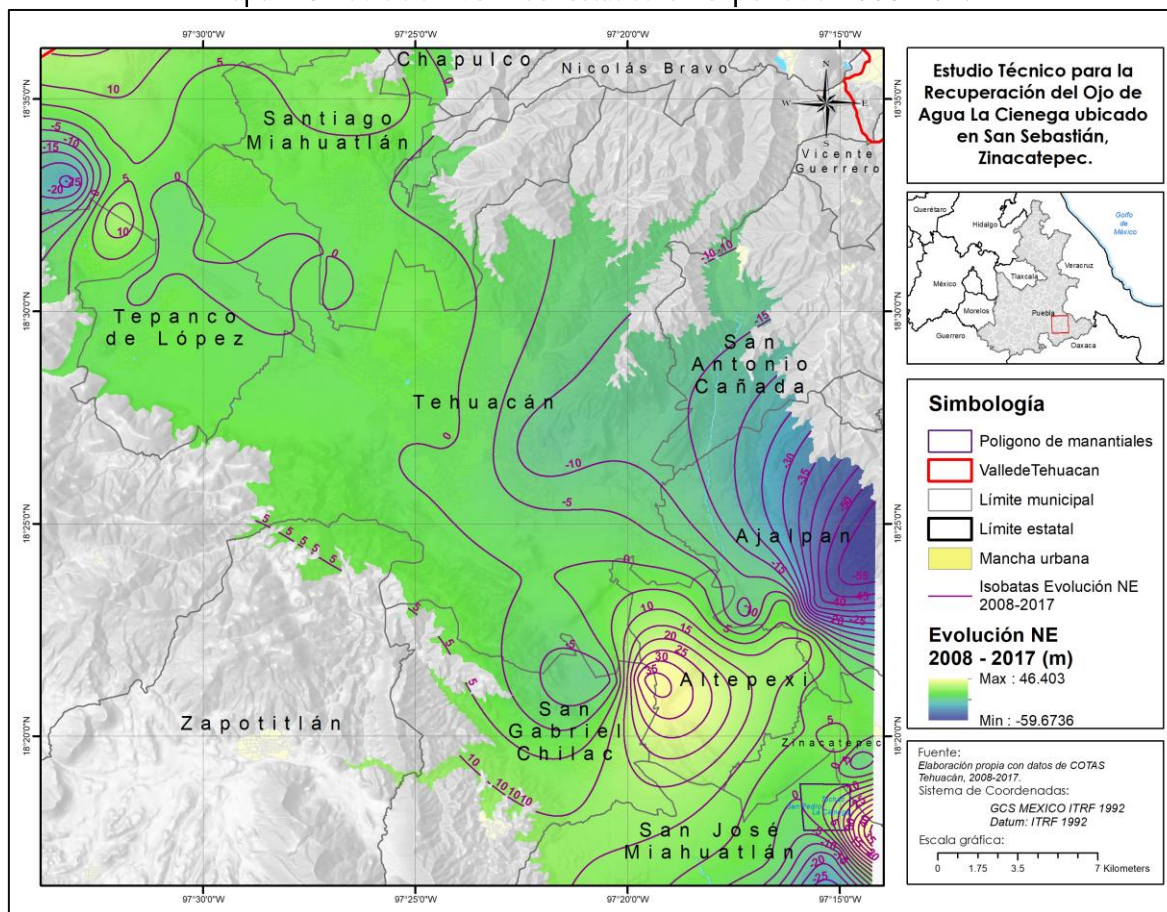
Figura 1.4 Evolución anual del nivel piezométrico durante el periodo 1996-2008.



Fuente: COTAS Tehuacán, 1996-2008.

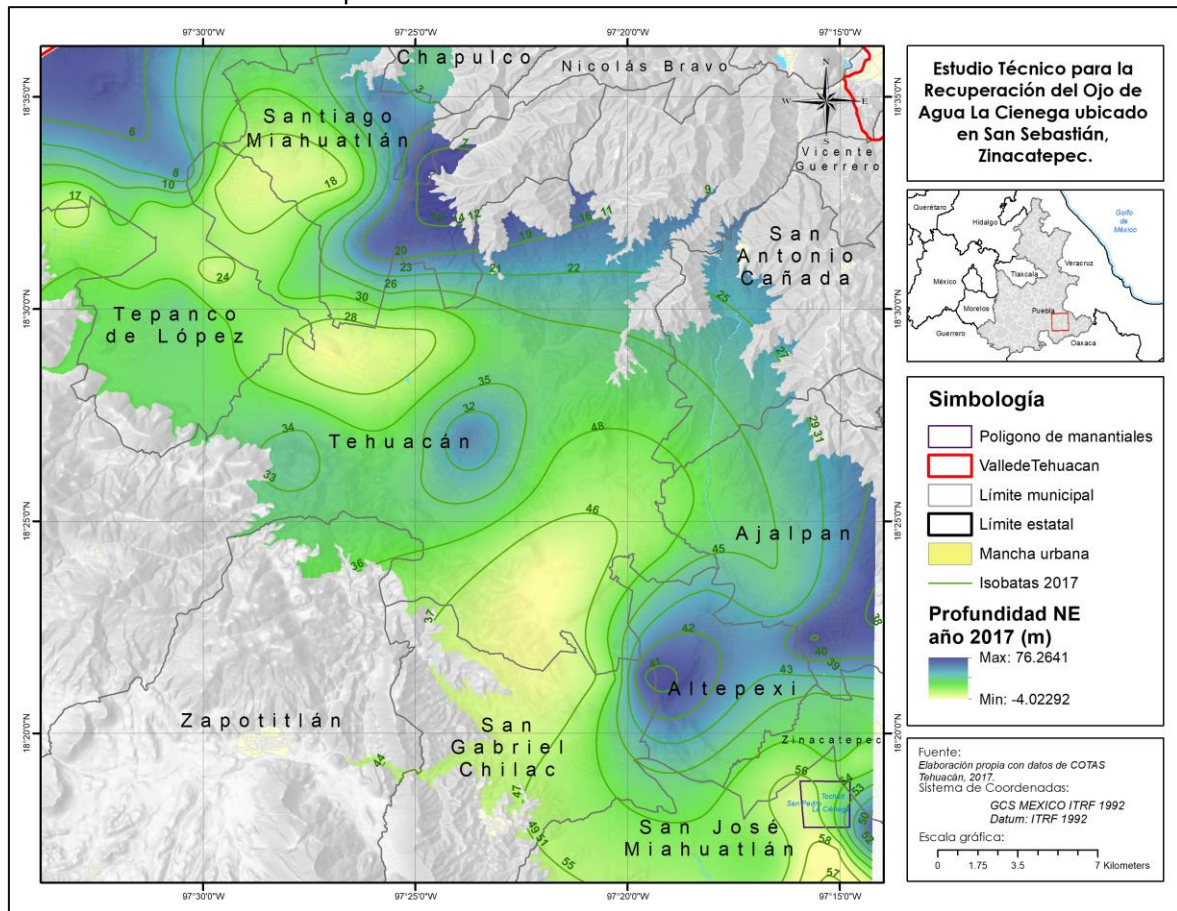
A continuación, se presentan los resultados del procesamiento de datos piezométricos hasta el año 2017.

Mapa 1.8 Evolución del nivel estático en el período 2008-2017.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2008-2017.

Mapa 1.9 Profundidad al nivel estático en 2017.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2017.

Manantiales

En torno a la situación del manantial “La Ciénega” conocido también en la zona con el nombre de “San José”, se han reportado disminuciones relevantes en su caudal, por lo que es necesario realizar una a valoración de las posibles causas, con énfasis en la identificación de las causas antropogénicas. Dicho manantial, está ubicado en el municipio de San José Miahuatlán, sin embargo, el municipio de Zinacatepec cuenta con la concesión del mismo, por lo que se evidencia la necesidad de la coordinación entre los municipios involucrados.

Figura 1.5 Manantial La Ciénega COT-183.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Figura 1.6 Manantial Coyoatl COT-184.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

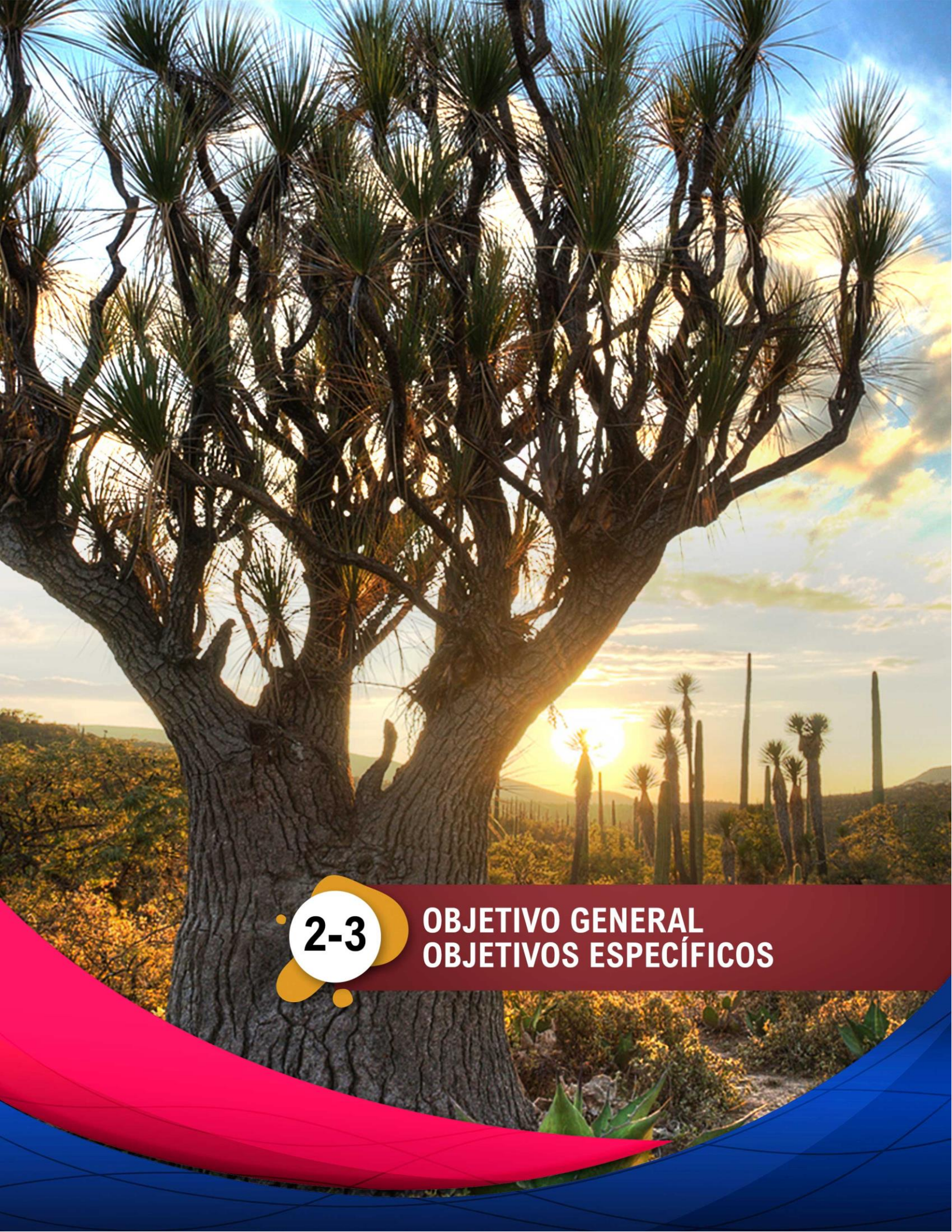
Figura 1.7 Manantial Tochalt COT-185.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Cabe mencionar que debido a que las propiedades del acuífero corresponden a medio fracturado, es posible que el acuífero presente un comportamiento diferente al correspondiente a un acuífero con medio poroso y propiedades hidráulicas continuas, ya que en el medio fracturado la disposición espacial de las fracturas, grietas y fallas geológicas son determinantes para el comportamiento del flujo, siendo además, sensibles a eventos como sismos, que pueden modificar la disposición y espaciamiento de grietas y fracturas, causando cambios en el comportamiento del flujo subterráneo.

Otro aspecto a considerar, es la variación estacional del comportamiento del acuífero, debida a la variación de la precipitación, escurrimiento, temperatura y demanda de agua a lo largo del año, situación que suele incidir en el comportamiento de los niveles del acuífero, con tendencias de recuperación durante meses de lluvia y de abatimiento, en meses secos; mismas que se alternan con el aprovechamiento a través de pozos, para definir el balance mensual, que en casos críticos, tiende a ser negativo aún en los meses con mayor recarga.



2-3

**OBJETIVO GENERAL
OBJETIVOS ESPECÍFICOS**



2. Objetivo General

En lo que se refiere al manejo del acuífero del Valle de Tehuacán, es importante visualizar los objetivos de su sustentabilidad desde una perspectiva de beneficio integral, tanto en términos ambientales, como sociales.

Objetivo general

Diseñar un plan de manejo integrado, mediante le elaboración de un diagnóstico ambiental y análisis costo-beneficio de alternativas de recuperación, con el fin de promover la restauración ecológica del manantial La Ciénega, en San Sebastián, Zinacatepec, Puebla.



3. Objetivos Específicos

Objetivos específicos

Los objetivos específicos que permitirán alcanzar el objetivo general o central son los siguientes:

- Elaborar un diagnóstico ambiental del manantial La Ciénega y de su acuífero para determinar el grado de deterioro y las causas que lo mantienen en su situación actual.
- Analizar la viabilidad técnico-ambiental y el costo-beneficio de diferentes alternativas de recuperación del manantial.
- Elaborar propuestas de restauración a nivel acuífero y un Plan de Manejo a para la recuperación del manantial La Ciénega, considerando acciones estructurales, de conservación, recomendaciones de proyectos sustentables e indicadores de monitoreo, evaluación y seguimiento.

Aunado a lo anterior, se consideran los objetivos establecidos en la Actualización del Plan de Manejo del Acuífero del Valle de Tehuacán, mismos que consideran lo siguiente:

- I. Manejo adecuado del suelo

2. Uso eficiente del agua
3. Se promueve adecuadamente cultura del agua
4. Se cuenta con un proyecto integral de desarrollo

El plan de manejo del acuífero contempla cuenta a su vez con líneas estratégicas, bajo la siguiente estructura.

I. Manejo adecuado del suelo

- I. Manejo responsable de pesticidas y fertilizantes
- II. Recolección, separación y disposición de la basura en centros de acopio
- III. Reforestación y manejo de bosques
- IV. Cambio de uso de suelo con base a un plan de desarrollo
- V. Tratamiento de aguas residuales de maquiladoras antes de ser descargadas

2. Uso eficiente del agua

- I. Modernización de infraestructura hidráulica y tecnificación del riego
- II. Planeación de trabajo en microcuencas hidrográficas
- III. Incremento en la cobertura de tratamiento de aguas residuales
- IV. Medición de volúmenes extraídos por todos los usuarios
- V. Actualización de censo de pozos

3. Se promueve adecuadamente cultura del agua

- I. Difusión entre la población del cuidado del agua
- II. Se informa periódicamente de la situación actual del acuífero
- III. Se promueven técnicas para aprovechar el agua de lluvia
- IV. Se promueve con los usuarios el reusó de aguas tratadas en riego y la industria

4. Se cuenta con un proyecto integral de desarrollo

- I. Se cuenta con un plan de desarrollo
- II. Se aplica adecuadamente la normatividad

- III. Existe coordinación interinstitucional
- IV. La planeación considera efectos del cambio climático
- V. Se cuenta con reglamento del acuífero



4

METODOLOGÍA

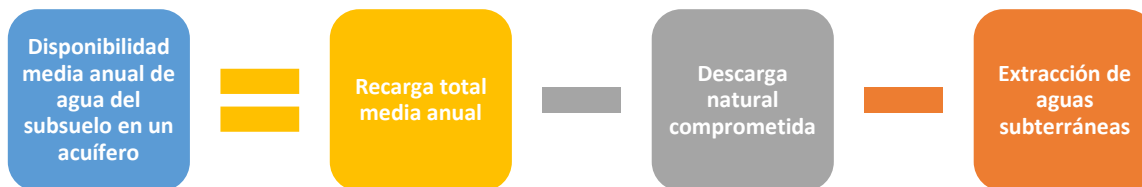


4. Metodología

Para el desarrollo del presente estudio se utilizarán metodologías probadas, así como la normatividad y lineamientos de CONAGUA, tal como es el caso de la elaboración del balance hídrico del acuífero.

Para el balance del acuífero, éste se realizará con base en los términos que se establecen en el inciso 4.3 de la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CONAGUA-2015, "CONSERVACIÓN DEL RECURSO AGUA QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES Y EL MÉTODO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE LAS AGUAS NACIONALES", donde se define la Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero, que se determina por la siguiente expresión:

Figura 4.1 Expresión de disponibilidad media anual del agua del subsuelo del acuífero.



Fuente: CONAGUA, 2015.

En dicha norma, se establecen los siguientes pasos para calcular la disponibilidad, misma que se actualiza periódicamente por CONAGUA y se publica en el Diario Oficial de la Federación:

4.3.2 La recarga total media anual se determina mediante la metodología descrita en el Apéndice Normativo "B" de esta Norma Oficial Mexicana.

4.3.3 La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por un acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar la

alimentación de acuíferos adyacentes, sostener el uso ambiental y prevenir la inmigración de agua de mala calidad al acuífero considerado.

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

Apéndice normativo "B"

Método para determinar la recarga total media anual de un acuífero

En este Apéndice se describen los métodos que deberán aplicarse para determinar la recarga total media anual de un acuífero. La descripción de los métodos se limita a los conceptos y expresiones básicas; su detalle puede consultarse en las referencias bibliográficas de esta Norma Oficial Mexicana.

B.1 Balance de aguas del subsuelo

La recarga total que recibe un acuífero en un intervalo de tiempo dado se determina por medio del balance de aguas del subsuelo, que en su forma más simple está representado por la siguiente expresión:

Figura 4.2 Expresión para la recarga total del acuífero en un determinado tiempo.



Fuente: CONAGUA, 2015.

En el presente estudio, se tomará como punto de partida la información de balance, determinada en estudios previos, y mediante el valor actual de volúmenes concesionados y el análisis piezométrico reciente, que permitirá estimar la variación volumétrica del acuífero, se estimará la magnitud de posibles volúmenes extraídos sin una concesión u otros factores que contribuyen al desequilibrio del acuífero.

En lo que respecta al desarrollo del sistema de monitoreo, evaluación y seguimiento, se utilizará el método SMART, mismo que nos permite fijar objetivos claros, alcanzables y estratégicos es la forma más eficaz de crear métricas y metas concretas.

Figura 4.3 Características de los Objetivos SMART.

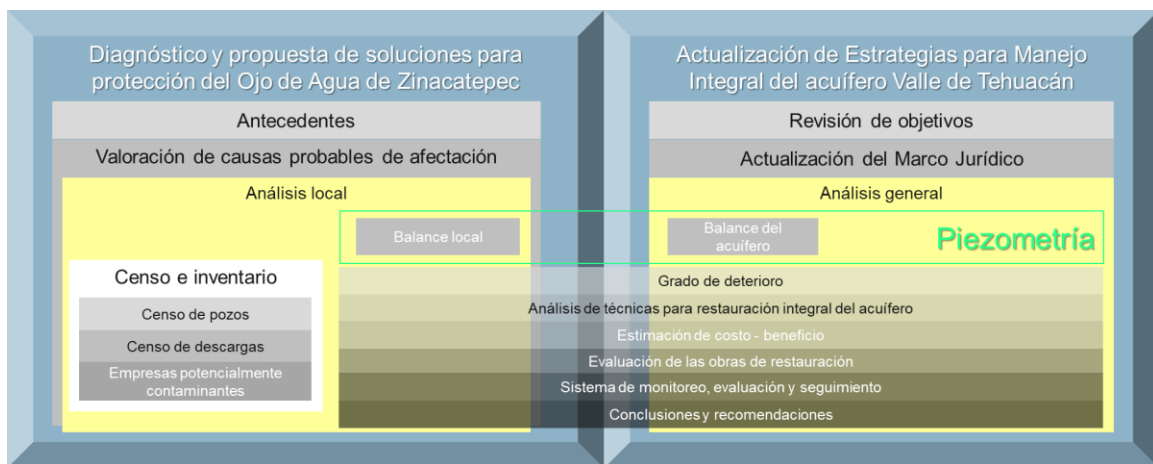


Fuente: Doran, 1981.

- Específicos (S): Deberán indicar claramente la meta a la que está dirigida, esto es, a qué sector está enfocada la medida, así como los responsables o participantes de llevarla a cabo.
- Medibles (M): Deberá contar con un indicador del avance del desarrollo de la medida.

- Alcanzables (A): Los objetivos planteados deberán ser realistas y consistentes con las condiciones de la zona de estudio.
- Relevantes (R): Los objetivos de las metas deberán apuntar hacia las mayores áreas de oportunidad detectadas y contribuir tanto como sea posible para alcanzar el objetivo del proyecto.
- Temporales (T): Los objetivos deberán tener indicados los plazos para su realización.

Figura 4.4 Diagrama conceptual metodológico.



Fuente: Elaboración propia, 2021

En lo que se refiere a la metodología, consiste en las siguientes actividades:

Tabla 4.1 Metodologías a emplear.

Actividad	Metodología
Antecedentes	Actualización de marco de referencia del acuífero del Valle de Tehuacán, incluye análisis local de zona de influencia de manantial de Zinacatepec.
Marco jurídico aplicable	Se realizará una síntesis del marco jurídico vigente y aplicable, sin omitir decretos recientes, estudios técnicos justificativos y áreas naturales protegidas.
Balance hídrico del acuífero	A partir de las piezometrías más recientes, se analizará la variación de almacenamiento del acuífero, con una actualización ponderada del balance. Dicha condición se detallará en la zona de influencia del manantial.
Análisis de técnicas para restaurar el acuífero	Se identificarán las medidas de restauración del acuífero, tanto en cantidad como en calidad, así como su posible influencia en los plazos, corta, mediana y larga.

Actividad	Metodología
Determinación del grado de deterioro del acuífero	Se integrará un indicador de grado de agotamiento, función del abatimiento promedio acumulado y profundidad promedio de los pozos.
Propuestas de alternativas de restauración integral del acuífero	Se conformará una matriz actualizada de acciones viables para restaurar el acuífero, con una estimación general de sus costos y tiempos de ejecución. Se integrará la factibilidad social de las obras.
Estimación costo - beneficio de las alternativas de recuperación	A partir de una revisión y actualización del costo de la explotación del acuífero, se estimará la relación costo beneficio de las alternativas de recuperación. Esto, a partir de información existente relacionada con posibles investigaciones u observaciones de impacto por escasez de agua subterránea debido a la sobreexplotación, o problemas de contaminación con efectos en la salud, servicios de agua potable o calidad de vida.
Evaluación de las obras de restauración	Se hará una breve evaluación de las obras de restauración existentes.
Censo de la microcuenca	
Pozos - totalidad, registrados y no registrados -	Actualización del censo de aprovechamientos dentro del área de influencia del manantial; la información obtenida será comparada con el Censo existente y con el REPGA, para identificar las diferencias.
Descargas de aguas residuales autorizadas y no autorizadas	La ubicación de descargas realizada en recorridos de campo, así como información adicional obtenida con las autoridades municipales.
Empresas industriales de la zona, determinación de magnitud y giro	
Plan de Manejo Integral	
Acciones estructurales	Se integrará un catálogo de acciones estructurales, mismo que será plasmado en un mapa y en una matriz con inversiones y responsables, así como una programación probable de acciones.
Acciones de conservación	Se incluirá un catálogo de acciones de conservación, que incluyan: manejo de cuencas, infraestructura verde, protección ante cambio de uso de suelo, control de la erosión y de la desertificación, así como otras para recuperar las capacidades disminuidas de recarga natural, en años anteriores. Esto, a través de la interacción con CONAFOR y otras organizaciones para definir con mayor precisión estas iniciativas y avances.
Recomendaciones	Se efectuará un apartado que señale un conjunto de conclusiones y recomendaciones, con acciones puntuales y específicas para mejorar la situación del manantial, así como del acuífero del Valle de Tehuacán.
Sistema de monitoreo, evaluación y seguimiento	Se correlacionarán las acciones propuestas, con metas e indicadores, para establecer el beneficio esperado en recuperación del equilibrio y calidad del agua del acuífero.

Fuente: Elaboración propia, 2021.



5


MARCO JURÍDICO APLICABLE



5. Marco Jurídico Aplicable

El acuífero Valle de Tehuacán ha sufrido cambios en torno a la disponibilidad reportada históricamente, misma que observa un ligero aumento de acuerdo con la última publicación oficial.

Tabla 5.1 Cambio en la disponibilidad de agua.

Acuífero	2013 (hm ³)	2015 (hm ³)	2018 (hm ³)	2020 (hm ³)	Cambio porcentual
Valle de Tehuacán	35.491689	35.622255	26.992499	28.198820	

Fuente: CONAGUA.

A continuación, se enlistan las leyes, normas y regulaciones de los distintos órdenes de gobierno, y de observancia obligatoria en torno del recurso hídrico en nuestro país, estado y en la región de estudio, resaltando también, algunos instrumentos programáticos y de colaboración internacional, todos ellos enfocados a la generación de procesos que fomentan el uso y manejo sustentable del recurso, mismos que son referentes para una o más acciones de las que el presente documento plantea.

5.1 Orden Federal

5.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y leyes generales

Artículo 27. La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.

... Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional. ...

Leyes y Ordenamientos Federales

1. Ley General de Bienes Nacionales
2. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)
3. Ley de Aguas Nacionales
4. Ley de Desarrollo Forestal Sustentable
5. Ley General de Cambio Climático
6. Ley General para la prevención y Gestión Integral de los residuos
7. Programa Nacional Hídrico 2020 - 2024

Reglamentos de leyes generales

1. Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales
2. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Impacto Ambiental
3. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Áreas Naturales Protegidas
4. Reglamento de la Ley General de Vida Silvestre
5. Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable

Disposiciones administrativas

Las principales normas de carácter oficial que tienen un impacto directo sobre el agua y los humedales son:

1. NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
2. NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

3. NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
4. Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012, que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.
5. NOM-001-CONAGUA-2011, Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba.
6. NOM-003-CONAGUA-1996, Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.
7. NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos - Características y especificaciones de las obras y del agua.
8. NOM-014-CONAGUA-2003, Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
9. NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
10. NOM-004-CNA-1996, Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.
11. NOM-003-CONAGUA-1996, Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.
12. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, publicados en el Diario Oficial de la Federación el 13/DIC/1989.
13. Norma Oficial Mexicana 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.

Tratados Internacionales

México ha suscrito tratados y convenios internacionales relacionados con la protección y conservación de sitios y cuencas con miras a disponer del recurso hídrico de manera justa y sana,

mismos que integran también, acciones relevantes para hacer frente a factores que representan amenaza, algunos de estos son:

1. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
2. RAMSAR

Sistema de áreas naturales protegidas

La región de estudio forma parte de la zona de influencia de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán Cuicatlán, además de la reciente área decretada, y aún sin plan de manejo, Cerro Colorado, de carácter Estatal; esto coloca a la región en un nodo muy importante para la dinámica social con impacto directo en el recurso hídrico de la zona y el país, surgiendo la necesidad de contar con instrumentos programáticos que regulen y ordenen la actividad entorno a ello.

Para lo anterior, se cuenta con el siguiente referente:

1. Programa de Conservación y Manejo de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, con una superficie de manejo (ha) de 490,186-87-54.7 y con fecha de publicación 8 de junio de 2012. Actualizado en 2021.

Regulación del uso, explotación o aprovechamiento de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes (superficiales y subterráneos).

1. Ley General de Aguas Nacionales, específicamente el Art. 16 (1994), donde se establecen las reglas y condiciones para el otorgamiento de las concesiones para explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, en cumplimiento a lo dispuesto en el párrafo sexto del Artículo 27 Constitucional.

5.1.2 Uso y explotación

Algunos elementos legales que contribuyen al entendimiento de la dinámica del acuífero debido a las actividades antropogénicas de la región son los siguientes.

Aguas superficiales y subterráneas

La Ley de Aguas Nacionales en su Título Primero, Capítulo único, Artículo 2º determina, “Para los efectos de este Reglamento, se entiende por: I. Aguas continentales: las aguas nacionales, superficiales o del subsuelo, en la parte continental del territorio nacional”.

En este sentido, y sobre los derechos de las aguas nacionales, el reglamento de la misma Ley determina en el título cuarto, Capítulo I sobre aguas nacionales en el Art. 28º que: “Para efectos del artículo 17 de la Ley, es libre la explotación, uso o aprovechamiento de aguas superficiales por medios manuales para uso doméstico o abrevadero, siempre y cuando no exista una disminución significativa de su caudal. Se presumirá que existe disminución cuando la extracción se efectúe mediante sistemas de bombeo, equipo o cualquier otro medio mecánico o eléctrico que haga presuponer un consumo mayor al que se requiere normalmente para uso doméstico o abrevar el ganado, que conforme a la Ley Agraria se puede tener en los terrenos colindantes con la ribera o zona federal respectiva”.

Presentación de los instrumentos que regulan la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales en las UECE, emanados de la Ley de Aguas Nacionales (LAN) vigentes en la zona de estudio:

Decretos de vedas

En este apartado se citan los principales planes de regulación de la explotación que tiene que ver con el acuífero por el ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle de Tehuacán, clave 2105, en el Estado de Puebla, Región

Hidrológico Administrativa Golfo Centro, y se dan a conocer los estudios técnicos del mismo acuífero, los cuales fueron emitidos desde los años cincuenta.

El "ACUERDO por el que se establece el Distrito de Riego de la Cuenca del Río Salado, en los Estados de Puebla y Oaxaca, y se declara de utilidad pública la construcción de las obras necesarias para su operación", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de marzo de 1965, comprende el oriente, poniente y sur del acuífero Valle de Tehuacán, clave 2105.

El "DECRETO por el que se amplía la veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo establecida en la zona de Tehuacán, Pue.", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de marzo de 1959, comprende la porción centro y noroeste del acuífero Valle de Tehuacán, clave 2105.

El "DECRETO por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona meridional del Estado de Puebla", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 15 de noviembre de 1967, que abarca una pequeña porción del acuífero en el extremo noroeste.

El "DECRETO que declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Acuicultura Número Dos Cuenca del Papaloapan para preservar, fomentar y explotar las especies acuáticas, animales y vegetales, así como para facilitar la producción de sales y minerales", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de agosto de 1973, abarca también la porción oriente, poniente y sur del acuífero Valle de Tehuacán, clave 2105.

No obstante la existencia de estas vedas, una pequeña superficie del acuífero en la porción occidental no está sujeta a las disposiciones de algún decreto de veda.

Adicionalmente a lo anterior, se emitió el "DECRETO por el que se declara área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región denominada Tehuacán-Cuicatlán ubicada en los estados de Oaxaca y Puebla", publicado en el Diario Oficial de la Federación el 18 de septiembre de 1998, mismo que establece que desde el punto de vista hidrológico, la reserva protegerá la zona de

manantiales y recarga de acuíferos, además del desarrollo de acciones y obras tendientes a evitar la contaminación de los acuíferos.

Una pequeña superficie de la extensión del Área Natural Protegida, hacia el extremo oeste del acuífero Valle de Tehuacán, clave 2105, se encuentra en zona no vedada.

5.1.3 Derecho humano al agua

Análisis de las restricciones legales sobre la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales superficiales y subterráneas.

El 8 de febrero de 2012 se publicó el DECRETO por el que se declara reformado el párrafo sexto del artículo 4º de La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que establece:

"Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la Ley.

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines".

5.2 Leyes Estatales

- I. Ley para la Protección del Ambiente Natural y el Desarrollo Sustentable del Estado de Puebla

El Título Cuarto, denominado "CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE LOS ELEMENTOS NATURALES", establece los lineamientos generales a seguir para la protección y aprovechamiento sustentable del agua, los ecosistemas acuáticos, el suelo y los recursos vegetales.

De igual manera el Título Quinto, "DE LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE", establece las medidas necesarias para prevenir la contaminación de la atmósfera, agua, suelo, redes de drenaje, alcantarillado y cuerpos receptores de aguas Estatales y Municipales.

2. Ley del Agua para el Estado de Puebla

Artículo 2 Se declara de interés público:

- I. La conservación de las fuentes de abastecimiento de agua y de las reservas hídricas del Estado que se asignen por la autoridad competente;
- II. La propuesta, formulación, ejecución y promoción de las políticas que orienten el desarrollo hídrico en el Estado;
- III. La prestación de los Servicios Públicos;
- IV. La planeación, programación, construcción, ampliación, conservación y mantenimiento de la infraestructura hídrica para la prestación de los Servicios Públicos;
- V. Los sistemas de captación, conducción, desmineralización, desulfuración, desinfección, potabilización, almacenamiento, regulación, distribución y la medición de los consumos de agua, así como la colección, desalojo, tratamiento de Aguas Residuales, Reúso y manejo de lodos;
- VI. La prevención y control de la contaminación del agua;

3. Ley de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano del Estado de Puebla

CAPÍTULO SEGUNDO DE LOS PRINCIPIOS - ARTÍCULO 4

X. Sustentabilidad ambiental. Promover prioritariamente, el uso racional del agua y de los recursos naturales renovables y no renovables, para evitar comprometer la capacidad de futuras generaciones; así como, evitar rebasar la capacidad de carga de los ecosistemas y que el crecimiento urbano ocurra sobre suelos agropecuarios de alta calidad, áreas naturales protegidas o bosques.

CAPÍTULO CUARTO DE LA EVALUACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE DESARROLLO URBANO - ARTÍCULO 57

Todo Programa deberá cumplir con los siguientes criterios fundamentales de evaluación: I. Equidad, que la planeación beneficie a los habitantes y distribuya las cargas con justicia; II. Autosuficiencia, que cada región o asentamiento humano, se abastezca preferentemente de materiales de construcción, agua, alimentos y recursos humanos propios de modo sustentable;

4. Ley de Cambio Climático del Estado de Puebla

TÍTULO TERCERO POLÍTICA ESTATAL DE CAMBIO CLIMÁTICO

XII. Conservación de los ecosistemas y su biodiversidad, dando prioridad a los cuerpos de agua que brindan servicios ambientales, fundamental para reducir la vulnerabilidad;

5. Ley de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de Puebla

CAPÍTULO III DE LA INFRAESTRUCTURA ESTATAL PARA EL DESARROLLO FORESTAL

Artículo 109

El Gobierno del Estado, a través de las Dependencias y Entidades competentes, en coordinación con la Federación y los gobiernos de los municipios, promoverá el desarrollo de infraestructura para el desarrollo forestal, las cuales consistirán en electrificación; obras hidráulicas; obras de conservación y restauración de suelos y aguas; construcción y mantenimiento de caminos forestales, instalaciones y equipos para la detección y combate de incendios forestales, campamentos, viveros forestales, obras de captación de agua de lluvia, estaciones climatológicas y telefonía rural, de conformidad con la legislación aplicable.

Artículo 110

La Secretaría se coordinará con las Dependencias y Entidades Federales, Estatales y Municipales que tengan a su cargo las funciones de impulsar los programas de electrificación, desarrollo hidráulico, conservación de suelos y aguas, y de ampliación de la comunicación rural, para que la promoción de acciones y obras respondan a conceptos de desarrollo integral.



6

BALANCE HÍDRICO



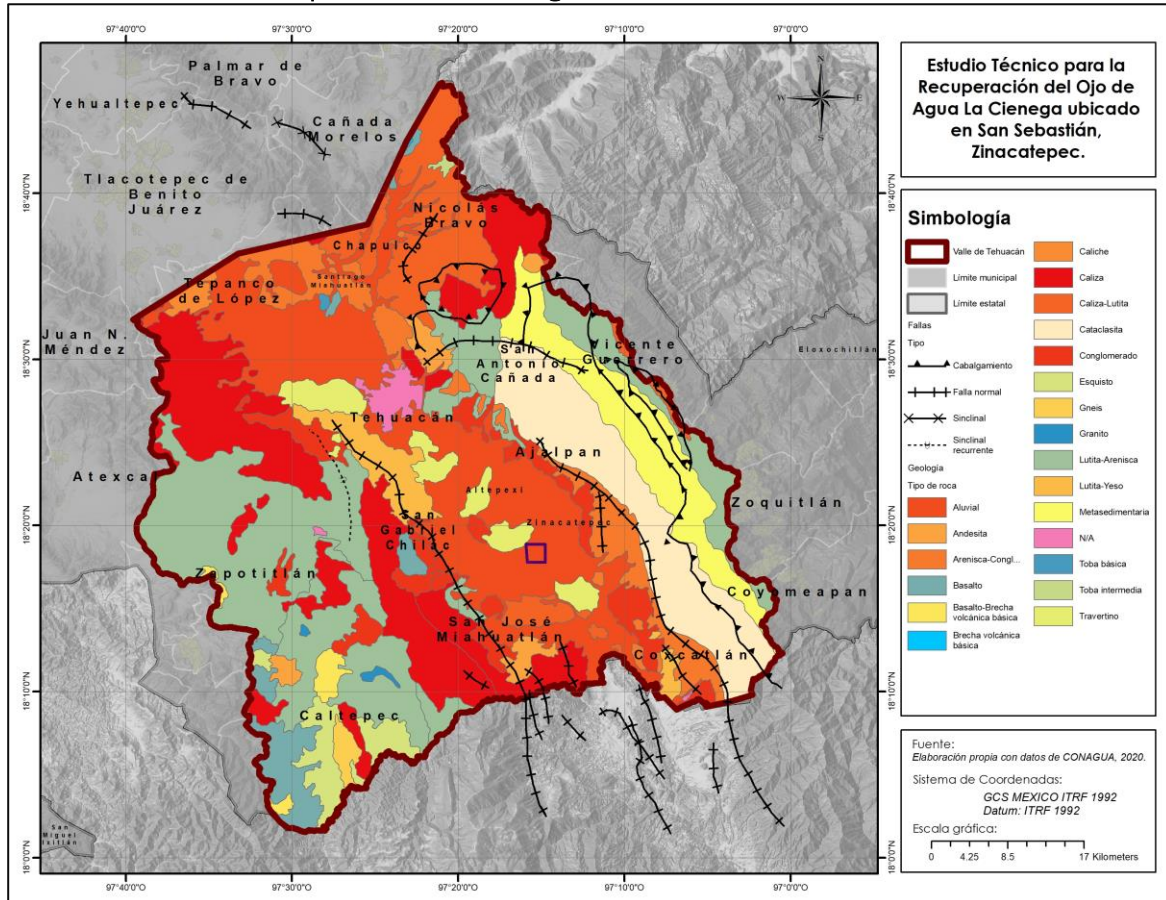
6. Balance hídrico

El acuífero Valle de Tehuacán, definido con la clave 2105 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción suroriental del Estado de Puebla, en los límites de los Estados de Oaxaca y Veracruz; entre los paralelos 18° 2' y 18° 46' de latitud norte y entre los meridianos 97°0' y 97° 40' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 3,155 km².

6.1 Geohidrología

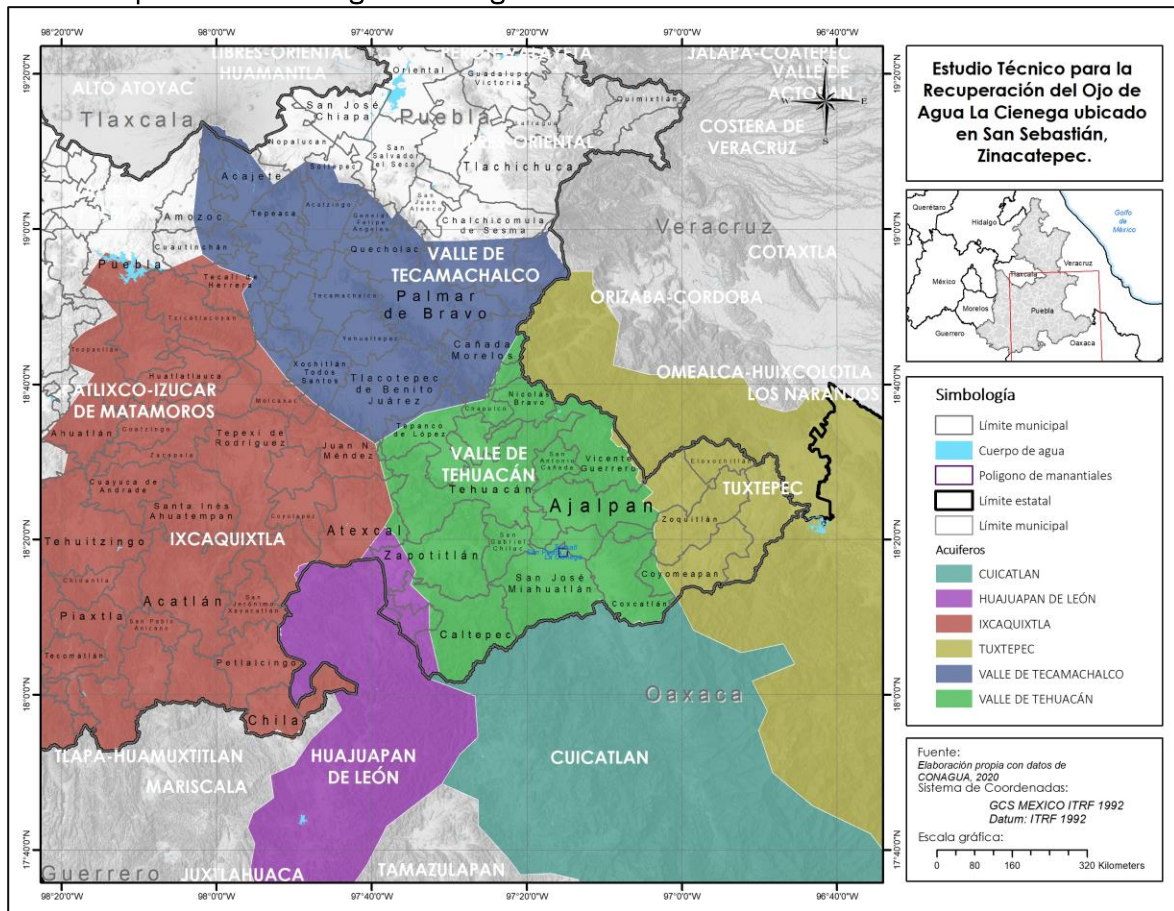
El valle está ubicado en las provincias geológicas de Tlaxiaco y Zongolica, estando la parte sur-occidental en la primera y la nororiental en la segunda, siendo las dos divididas por una construcción escalonada que se formó al rellenarse la depresión original de la parte central, éstas se encuentran fracturadas, a excepción del extremo sureste, en los que se encuentran las poblaciones de Ajalpan, San Sebastián y Zinacatepec, donde el terreno conforma sus límites y la baja permeabilidad está dada por los piroclastos finos (tobas), intercalados entre los derrames. Geo-hidrologicamente existe una conexión con el acuífero del Valle de Tecamachalco y con el acuífero Cuicatlán, como se puede apreciar en el mapa 6.2.

Mapa 6.1 Geo-hidrología del acuífero del Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2020.

Mapa 6.2 Conexión geo hidrológica entre acuíferos con el del Valle de Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2020.

El movimiento del agua subterránea se ve regido por la presencia de rocas sedimentarias del medio fracturado, la distribución de la secuencia de medios granulares que forman el medio poroso, el patrón de fallas regionales y por los bajos estructurales en el subsuelo del valle. Este movimiento también se ve delimitado por las estructuras frágiles que integran los recorridos a lo largo de los corredores de la falla y que llegan a descargar en varias y diferentes zonas del valle, entre estas estructuras resaltan las formadas por cuerpos de travertinos.

Las características como la porosidad del medio y su estructura fracturada hacen que este acuífero se comporte como zona de falla libre y heterogénea; el movimiento del agua depende directamente de la geología estructural del área y del tipo de sistema de flujo al que se encuentre integrado.

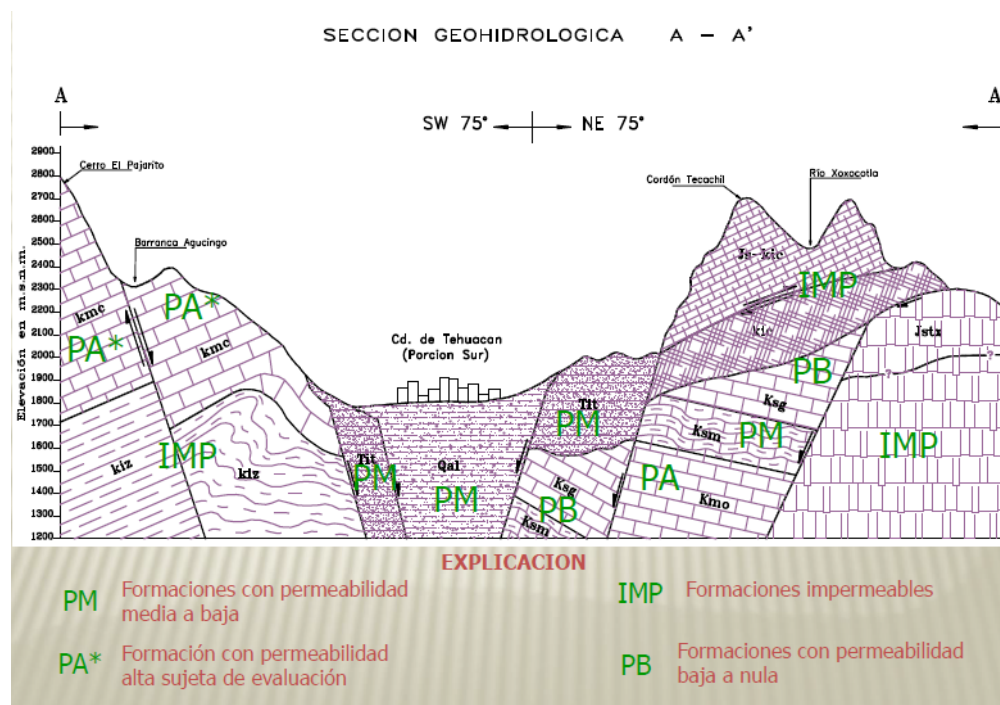
A mayor profundidad, las rocas calcáreas constituyen un acuífero que no ha sido explorado y que puede presentar confinamiento debido a que está sobre yacido por lutitas, limolitas y areniscas.

Algunos parámetros hidráulicos importantes se describen a continuación, estos se desprenden de pruebas de bombeo de larga duración en etapa abatimiento y de recuperación.

- Transmisividad: Van de los 1.2×10^{-3} a los 25×10^{-3} m²/s o lo que es igual a 103.7 a 2160 m²/d
- Conductividad hidráulica: varían de 0.9 a 18.1 m/d (1.0×10^{-5} a 2.1×10^{-4} m/s)
- Coeficiente de almacenamiento: debido a la constitución geológica del acuífero se considera que su rendimiento específico es muy variable, entre 0.01 y 0.25

Los parámetros más bajos se explican por la presencia de sedimentos aluviales de menos granulometría, mientras que los más altos se registran en los aprovechamientos con los sedimentos granulares de granulometría gruesa y/o a la presencia local de facturas en las rocas volcánicas.

Figura 6.1 Unidades geo hidrológicas y condiciones del acuífero.



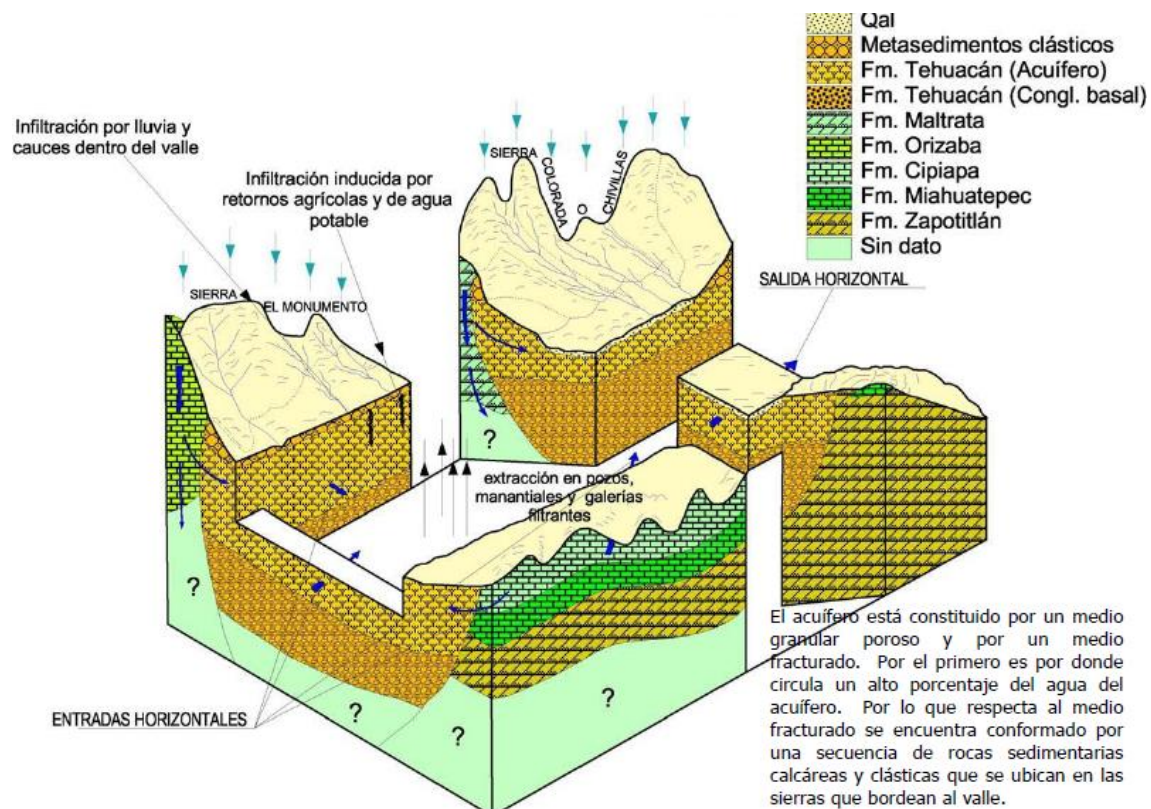
Fuente: CONAGUA, 2020.

6.2 Hidrología

El acuífero Valle de Tehuacán se ubica dentro de la Región Hidrológica 28 denominada Río Papaloapan, dentro de la cuenca con el mismo nombre y sub-cuenca del Río Salado. De las principales corrientes de esta cuenca es el río Salado, que llega al Valle Poblano Oaxaqueño y a la Alta Mixteca, la cual es la sub-cuenca con más altos índices de deforestación.

La parte alta está conectada con la cuenca del Río Balsas, conectado por el Distrito de Riego No.30 Valsequillo, Puebla. Para el riego del distrito se aprovechan los escurrimientos del Río Atoyac, a través de la presa Manuel Ávila Camacho.

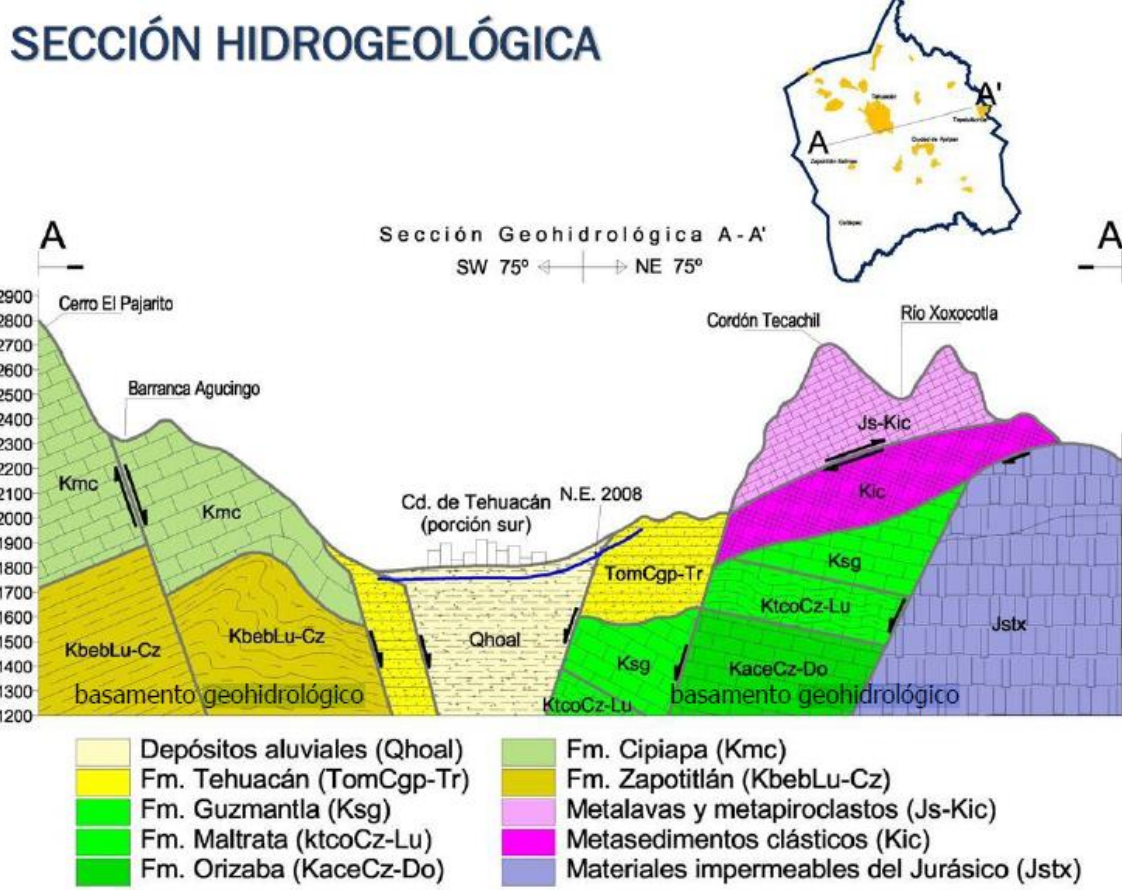
Figura 6.2 Funcionamiento del sistema del acuífero.



Fuente: CONAGUA, 2020.

En su porción superior, el acuífero está conformado por un medio granular integrado por materiales clásticos sedimentarios de granulometría variada; y en su porción inferior por un medio fracturado, conformado por las rocas sedimentarias y volcánicas. El relleno del valle consiste en depósitos interdigitados de gravas, arenas y limos caracterizados por su falta de continuidad tanto lateral como vertical, originada por los distintos ambientes de sedimentación de abanicos aluviales, fluviales, planicies de inundación, canales entrelazados y zonas lacustres, con presencia de calizas lacustres y travertinos.

Figura 6.3 Sección Hidrogeológica.



Fuente: CONAGUA, 2020.

6.3 Fisiografía

Provincia Fisiográfica

De acuerdo con la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (Raisz, 1959), el área que cubre el acuífero se localiza dentro de la Provincia Fisiográfica Meseta Oaxaqueña, que limita hacia el norte con el Eje Neovolcánico, al oriente con la Planicie Costera del Golfo, al poniente con la Sierra Madre del Sur y al sur con el Océano Pacífico.

El acuífero corresponde a un valle con orientación noroeste-sureste, con elevaciones que varían de 1950 msnm al norte a 900 msnm en su extremo sur, donde el valle se estrecha. El valle está rodeado por sierras que lo delimitan al oriente y al poniente, con elevaciones que alcanzan 2,500 msnm.

6.4 Geología

El acuífero se encuentra dentro de una zona geológica que presenta alto grado de complejidad tectónica y estructural, ocasionada por la yuxtaposición y sobre posición de los Terrenos Tectonoestratigráficos Mixteco, Oaxaca y Maya, cuyas cubiertas sedimentarias abarcan parte de las cuencas mesozoicas de Tlaxiaco, Cuicateca y Zongolica. La delimitación del Terreno Oaxaca por medio de zonas de cizalla con los terrenos Mixteco y Maya, define zonas de debilidad que sufrieron reactivaciones en diferentes tiempos geológicos, actuando como fallas de desplazamiento lateral o bien como fallas normales que contribuyeron a la configuración del bajo estructural de Tehuacán.

Las carpetas sedimentarias depositadas en las cuencas mesozoicas manifiestan el resultado de una tectónica eminentemente compresiva, que dio lugar a una serie de estructuras anticlinales y sinclinales apretados, asimétricos, afectados por fallamiento inverso resultado de la Orogenia Laramide.

6.5 Estratigrafía

En la zona afloran rocas sedimentarias originadas en ambientes continentales y marinos, así como rocas metamórficas, cuyo rango estratigráfico comprende del Paleozoico al Reciente. A continuación, se describen las distintas unidades, en orden cronológico, de la más antigua a la más reciente.

Rocas del basamento

El basamento del Terreno Oaxaca está constituido por anortositas charnokitas y ortogneis. Los afloramientos de estas rocas se localizan en el extremo suroccidental del área. El basamento del Terreno Mixteco corresponde al Complejo Acatlán, con eclogitas, anatexitas, milonitas y serpentinitas.

En la zona de contacto entre los Terrenos Oaxaca y Mixteco, en el extremo sur poniente del área, se presenta un granito de anatexis. Las rocas más antiguas que se encuentran en la base del Terreno Maya corresponden al Complejo Milonítico, cuyos afloramientos se localizan en la porción suroriental de la zona. Los protolitos eran cuarcitas, esquistos de clorita y filitas.

Rocas sedimentarias continentales paleozoicas y jurásicas

Tanto los sedimentos paleozoicos de la Formación Matzitzí de edad Carbonífero-Pérmico, como los que constituyen a la Formación Tecomazuchil, del Jurásico Medio, corresponden con secuencias continentales, comúnmente denominadas lechos rojos, que consisten en intercalaciones de areniscas, lutitas y conglomerados, que cubren de manera discordante a las rocas metamórficas de los Terrenos Oaxaca o Mixteco.

En términos generales, los estratos varían de medios a gruesos que en promedio definen estratos de 5 a 15 cm de espesor, aunque ocasionalmente se observan estratos de hasta 90 cm de potencia de horizontes de lutitas parcialmente filitizadas.

Alternadamente y hacia la porción superior de la formación, en algunas localidades los horizontes de areniscas contienen abundantes fragmentos más gruesos, llegando a constituir areniscas brechoides en donde los clásticos mayores están embebidos en una matriz de grano grueso de color gris claro, que intemperizan a color ocre y café claro rojizo.

Estos materiales muestran evidencias de incipiente foliación y en conjunto definen un paquete del orden de 900 a 980 m de espesor. En términos generales, este potente paquete de rocas sedimentarias presenta una gran compactación de sus granos y se encuentran cementados por carbonato de calcio, que le confieren su naturaleza impermeable.

Formación Tehuacán

Corresponde al Paleoceno-Eoceno y está compuesta por rocas sedimentarias con una gran variedad granulométrica. Su base está constituida por un conglomerado con matriz areno-calcárea bien litificada, conformado por fragmentos de diversos tamaños y litologías, desde gravas hasta cantos de 1 m de diámetro, cuyas formas varían de angulosos a redondeados; se presenta en estratos gruesos a masivos, mayores a 80 cm, con lentes arenosos y arcillo-arenosos.

La parte media de esta formación la constituye un paquete eminentemente lacustre de color crema y verdoso, en el que predominan las calizas y lutitas, con capas de anhidrita y bentonita dispuestas en espesores de 20 a 30 cm. La cima está constituida por limolitas y areniscas, en estratos de 10 a 40 cm de espesor, de color café claro y crema, con algunos horizontes de bentonita.

Sus afloramientos bordean prácticamente toda la porción noreste, norte y sureste del Valle de Tehuacán por su margen izquierda; al noreste de Santiago Miahuatlán se observa que la porción superior subyace a la Formación Huajuapán. En una porción de la margen derecha, entre San Gabriel Chilac y San Juan Atzingo, se puede observar toda la secuencia de esta formación, desde la base conglomerática, hasta las porciones media y superior, constituidas por calizas lacustres, areniscas y limolitas.

También aflora en el centro del valle, donde dan lugar a elevaciones de poca altura, apreciándose en cortes de la autopista a Oaxaca, en las paredes y fondo de algunas barrancas labradas por arroyos y en las galerías filtrantes. Respecto a sus relaciones estratigráficas, su contacto inferior, aunque no se observa, debe ser discordante con las formaciones anteriores a ella, y su contacto superior es concordante con la Formación Huajuapán, tal como se advierte en los afloramientos de ambas laderas del valle (mapa 6.1).

Rocas Ígneas

Dentro del área del acuífero existen escasos afloramientos de rocas ígneas. Hacia su extremo suroccidental se localiza una secuencia de tobas andesíticas del Eoceno-Oligoceno, que cubre discordantemente a diversas formaciones, dentro de las cuales se encuentran las rocas metamórficas del Complejo Acatlán y las secuencias sedimentarias de las formaciones Zapotitlán y Tecomazúchil.

Por otra parte, en el extremo norte del área sobre el Terreno Maya, se manifiestan afloramientos aislados de pequeños cuerpos intrusivos de composición monzonítica-dacítica de edad Oligoceno - Mioceno, que intrusionan a las rocas de las formaciones Chivillas y Maltrata.

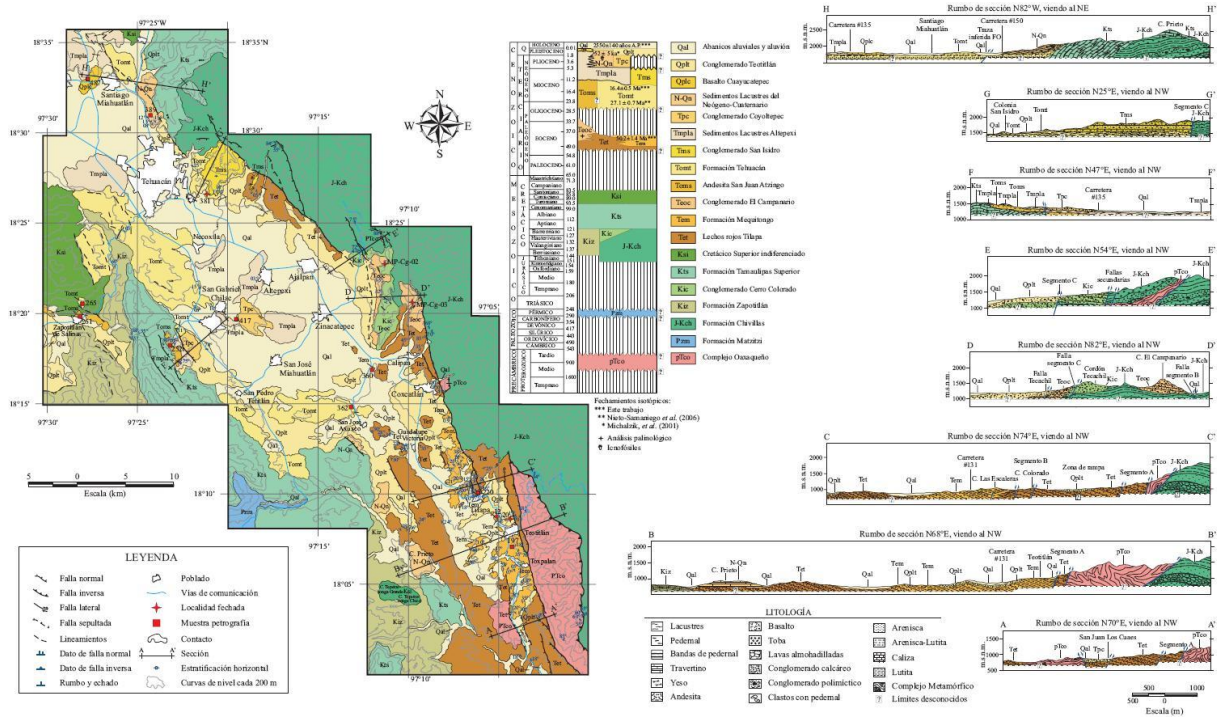
Los depósitos aluviales manifiestan una gran variación en su granulometría y litologías, ya que son producto de la erosión, transporte y acumulación de las rocas preexistentes; varían desde arcillas, limos y arenas, hasta gravas y peñascos. Se presentan en toda la superficie del valle, con espesores máximos de 10 m y en general presentan permeabilidad media a alta, que favorecen la infiltración tanto del agua precipitada como de la aplicada para el riego agrícola.

Travertinos

Los travertinos fueron depositados, y lo son aún, por la precipitación del carbonato de calcio y/o magnesio, al liberarse el ácido carbónico y romperse la solución por el descenso de la presión al aflorar el agua en la superficie; en general se relacionan con zonas de afloramiento de manantiales propiciados por el ascenso del agua en la zona de Tehuacán, debido a la existencia de rocas de baja

permeabilidad, pertenecientes a la porción superior de la Formación Tehuacán. Se consideran evidencia de zonas de extensos afloramientos de agua, que aún en la actualidad se manifiestan.

Figura 6.4 Geología del Valle de Tehuacán.



Fuente: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2007.

6.6 Geología estructural

El área del acuífero manifiesta una diversidad de estructuras geológicas como fallas normales e inversas, así como pliegues que ocurren principalmente en dirección noroeste-sureste. Su distribución, dimensiones y efectos en la columna sedimentaria mesozoica, se considera que están supeditadas a su posición paleogeográfica. Bajo este contexto se pueden diferenciar a grandes rasgos dos zonas.

La primera está localizada sobre el Terreno Maya, conformada principalmente por pliegues y fallas de cabalgadura, en donde estas estructuras generan un acortamiento y engrosamiento estructural de

la carpeta de sedimentos de la Cuenca de Zongolica, generando sierras con un gran relieve topográfico.

La orientación general que presentan estas estructuras es en dirección noroeste-sureste con 18 a 40° de rumbo, las cuales tienen como límite suroccidental la zona de cizalla asociada con el Complejo Milonítico, este límite estructural posteriormente se reactivó como falla normal y contribuyó a la formación del valle de Tehuacán.

6.7 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero, es posible definir que el acuífero está conformado, en su porción superior, por un medio granular, integrado por materiales clásticos sedimentarios de granulometría variada; y en su porción inferior por un medio fracturado, conformado por las rocas sedimentarias y volcánicas.

El relleno del valle consiste en depósitos interdigitados de gravas, arenas y limos caracterizados por su falta de continuidad tanto lateral como vertical, originada por los distintos ambientes de sedimentación de abanicos aluviales, fluviales, planicies de inundación, canales entrelazados y zonas lacustres, con presencia de calizas lacustres y travertinos.

Los materiales de mayor granulometría o gravas corresponden a sedimentos de origen aluvial; los sedimentos fluviales se encuentran dispuestos en forma de canales interdigitados, con cambios laterales; las arenas corresponden a las barras y las arcillas a las planicies de inundación.

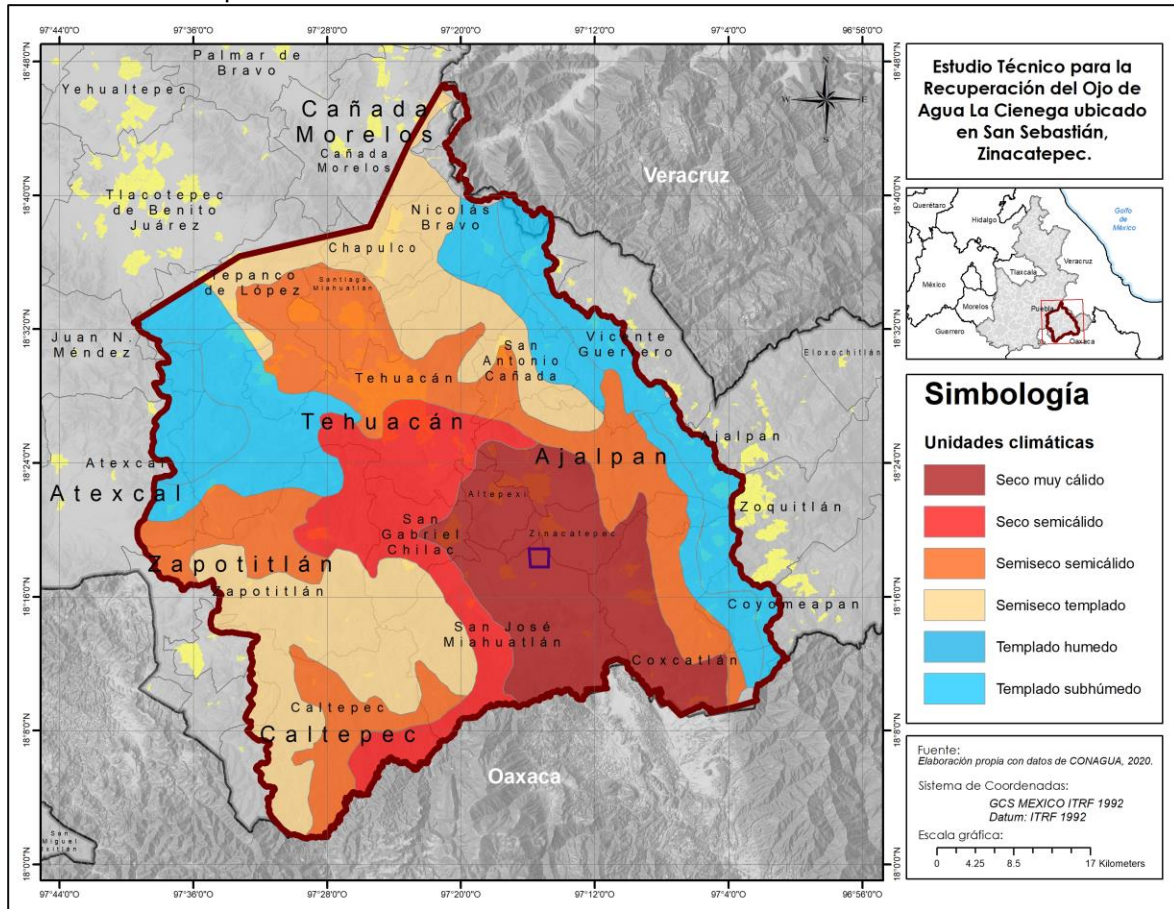
El mayor espesor de estos materiales granulares se presenta en la porción central con 550 m. En el valle, en general el espesor de los materiales granulares varía entre 120 y 200 m. Las rocas sedimentarias que subyacen al medio granular se encuentran afectadas por fallas que configuran altos y bajos estructurales, que originan una marcada irregularidad topográfica en los bloques basales del valle.

El intenso fracturamiento presente en las rocas genera zonas de alta permeabilidad que tienen comunicación hidráulica con los materiales granulares y producen los bajos resistivos detectados en las inmediaciones de la sierra que bordea el sector noreste del Valle de Tehuacán. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento hidrogeológico del acuífero, están conformadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento; así como por las rocas metamórficas e ígneas intrusivas.

6.8 Climatología

El clima se considera semiseco templado en la parte central del acuífero y cambia a semiseco semicálido al sur del mismo, al extremo sur se clasifica como seco semicálido, mientras que en la parte norte hay la presencia de tres tipos de climas diferentes: templado húmedo con lluvias en verano, semicálido húmedo con lluvias todo el año y semifríos subhúmedos con lluvias en verano, por último, en las partes altas de la sierra, al este y oeste, se encuentra un clima templado subhúmedo. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 14 y 22° C, con un valor promedio anual de 20° C. La temperatura mínima se localiza en la porción nororiental del acuífero en el Pico de Orizaba, mientras que las máximas se registran en el extremo sur, en las inmediaciones de los límites con el estado de Oaxaca.

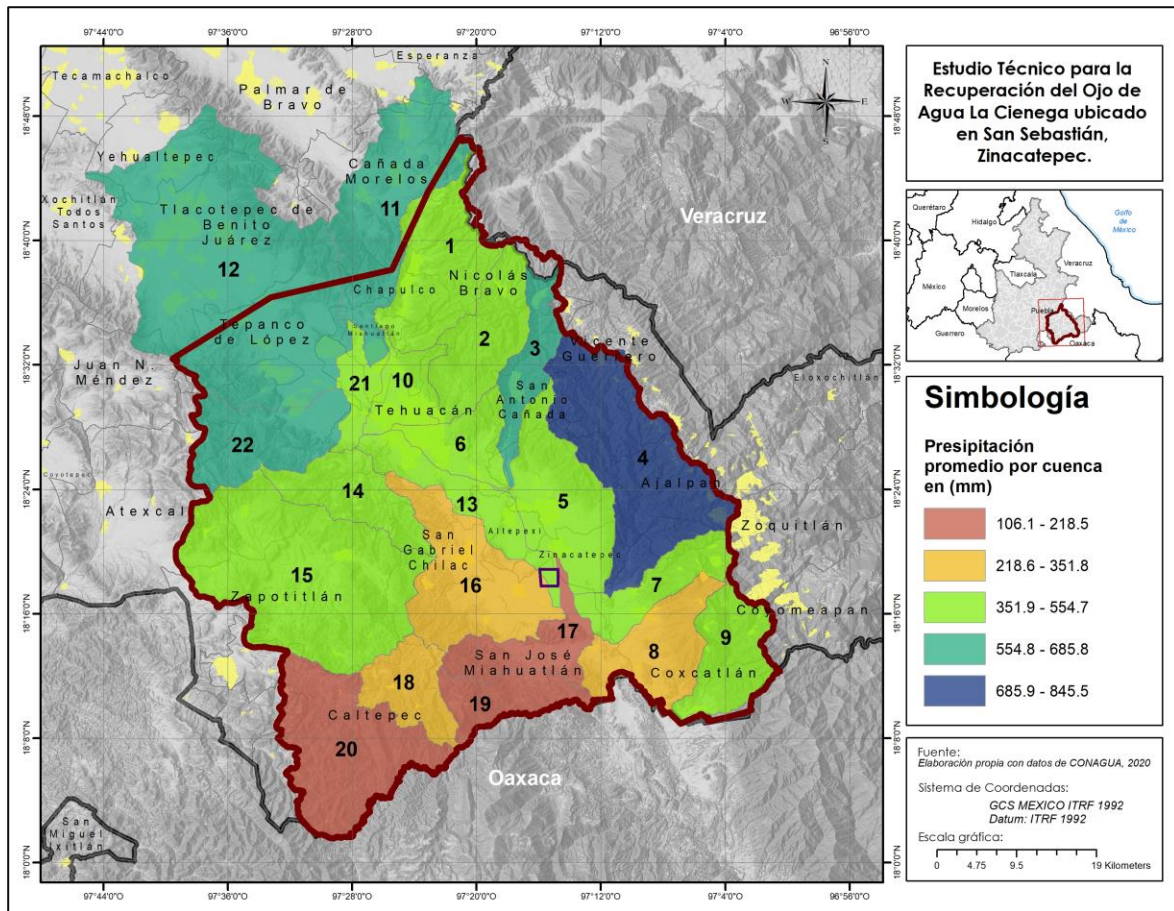
Mapa 6.3 Unidades climáticas en el acuífero del Valle de Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2020.

La precipitación media anual varía de 400 mm, en los límites con el Estado de Oaxaca, a 1,200 mm en la porción oriental del acuífero. De acuerdo con la distribución de la lluvia se puede considerar un promedio de 450 mm por año, en la zona de explotación del acuífero. La evaporación potencial media anual en las inmediaciones de la ciudad de Tehuacán es de 2,000 mm y aumenta hacia el sur.

Mapa 6.4 Precipitación promedio en mm.



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2020.

En el capítulo 7, correspondiente al análisis de factibilidad, se profundiza más en materia climática.

6.9 Económica

De acuerdo con información proporcionada por el INEGI, para el año 2000 el acuífero tenía una población igual a 429,841 habitantes, mientras que para el año 2005 esta subió a 476,978. Posteriormente, según el censo 2020, la población dentro del acuífero asciende a 580,006. Una proyección realizada por el Consejo Nacional de Población estima que para el 2030 la población puede llegar a ser igual a 630,951. Las principales tasas de crecimiento se registran en zonas urbanas.

El acuífero tiene una disponibilidad media anual limitada, lo que pone en riesgo el abastecimiento para todos sus pobladores. De manera primigenia, las principales actividades económicas en la región

fueron la agricultura y la ganadería, pero con el esparcimiento y crecimiento de zonas de manufactura y prestación de servicios, cambiaron sus usos.

Hablando de la agricultura dentro del acuífero Valle de Tehuacán, en él se encuentra ubicada la tercera unidad del Distrito de Riego 030 Valsequillo, Puebla. Este distrito se abastece del agua superficial proveniente de la Presa Manuel Ávila Camacho, que tiene una capacidad útil de almacenamiento de 330 millones de metros cúbicos, tiene una superficie de 34,740 hectáreas, de las cuales 33,820 son regables. De esta última superficie alrededor de 7,166 hectáreas corresponden a la tercera unidad, la cual se riega con agua de la presa.

Lo que más se cultiva en la región es maíz elotero y para grano, caña de azúcar, alfalfa y frijol. El maíz representa el principal cultivo, tanto en agricultura de riego como de temporal. Se destaca que la actividad pecuaria en el acuífero es más importante que la agrícola; la mayor producción es avícola, y corresponde a huevo y pollo. Le siguen en importancia el ganado porcino, y la producción de leche y carne de bovino.

La producción manufacturera en el Valle de Tehuacán se concentra básicamente en textiles y calzado. La actividad industrial está enfocada al sector alimentario, que corresponde en su mayoría a la elaboración de bebidas vinculadas al embotellamiento de agua, así como a la industria química, productos metálicos, maquinaria y equipo, así como minerales no metálicos.

Dado el crecimiento demográfico en el valle, particularmente en el ámbito urbano, existe la necesidad de asegurar el crecimiento de los diversos sectores, sin embargo, la reducida disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tehuacán puede convertirse en un impedimento para el desarrollo de las actividades socioeconómicas que prevalecen en la región.

6.10 Social

El principal uso del agua subterránea es el agrícola que representa el 78.0% de la extracción total, seguido del uso público urbano que corresponde al 18.2%; para el uso industrial el 3.2% y el 0.6%,

para uso doméstico. Del volumen utilizado en el acuífero, 128.4 hm³/año proviene de galerías filtrantes y manantiales, y 128.9 hm³/año se extrae a partir de pozos y norias. El uso del agua se describe en la siguiente tabla:

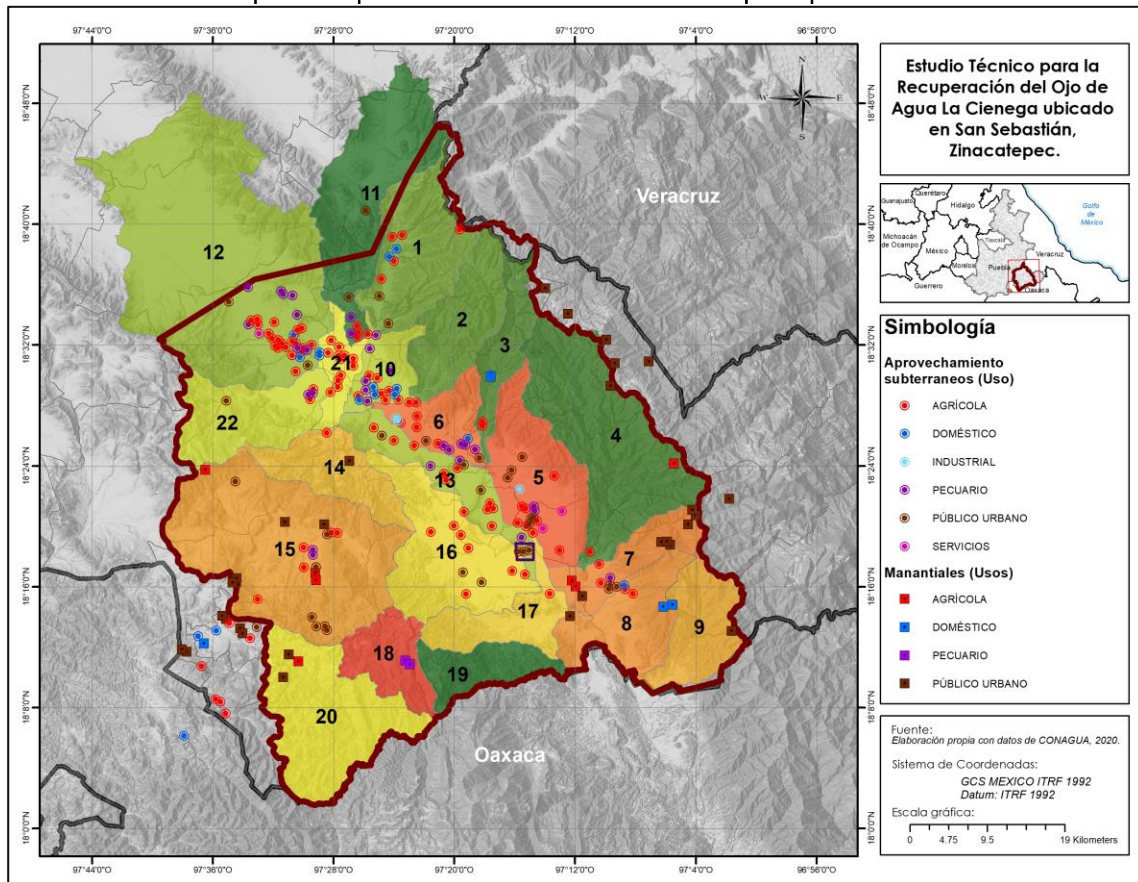
Tabla 6.1 Usos del agua en el acuífero del Valle de Tehuacán.

Uso	Porcentaje de uso
Agrícola	78%
Público urbano	18.2%
Industrial	3.2%
Doméstico y otros	0.6%

Fuente: CONAGUA, 2020.

La siguiente figura ilustra los principales usos tanto de hidrología subterránea como superficial.

Mapa 6.5 Aprovechamientos subterráneos por tipo de uso.



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, 2020.

6.11 Protección ambiental

Es necesario promover el cuidado del acuífero debido que este se encuentra ubicado en una región árida con un clima mayoritariamente seco, con bajos niveles de lluvia por año, con un alto grado de evaporación y bajos niveles de infiltración, lo que contrasta con el crecimiento de la población y del uso del agua para actividades estrechamente ligadas a la demanda hídrica, por lo que este recurso podría verse amenazado, sobre todo en los niveles subterráneos, que es la principal fuente de agua en las poblaciones.

En la actualidad existe una tendencia hacia el abatimiento del nivel del agua subterránea y un descenso en la producción de las galerías filtrantes. De seguir incrementándose sin control la extracción de agua subterránea, existe el riesgo de que se sobreexplota el acuífero y se agraven los efectos negativos tales como el abatimiento progresivo de los niveles del agua subterránea, la inutilización de pozos, el incremento de costos de bombeo, la reducción en la producción de las galerías filtrantes, así como la disminución e incluso desaparición de los manantiales.

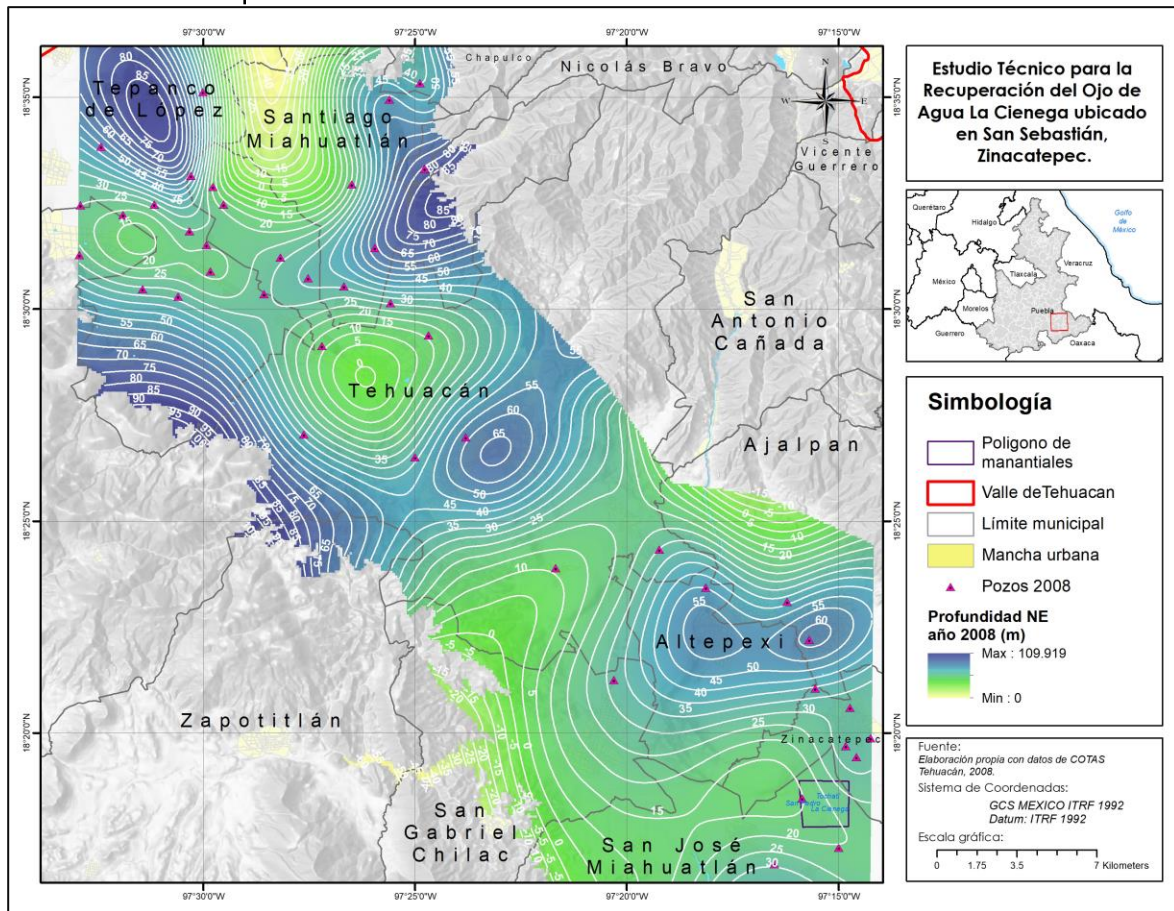
En este sentido, se recomienda denotarse con el título de Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC), con causales de interés público para hacer frente a la extracción subterránea.

6.12 Análisis del nivel estático

El conocimiento del balance hídrico del acuífero ha sido a través de los últimos años, un tema que, paulatinamente disminuye su incertidumbre, conforme se cuenta con mayores registros y datos, tanto piezométricos, como volumétricos.

De cualquier manera, el componente de máxima importancia en el balance del acuífero es la variación del volumen almacenado, que denota en forma pragmática si el acuífero se encuentra o no sobreexplotado.

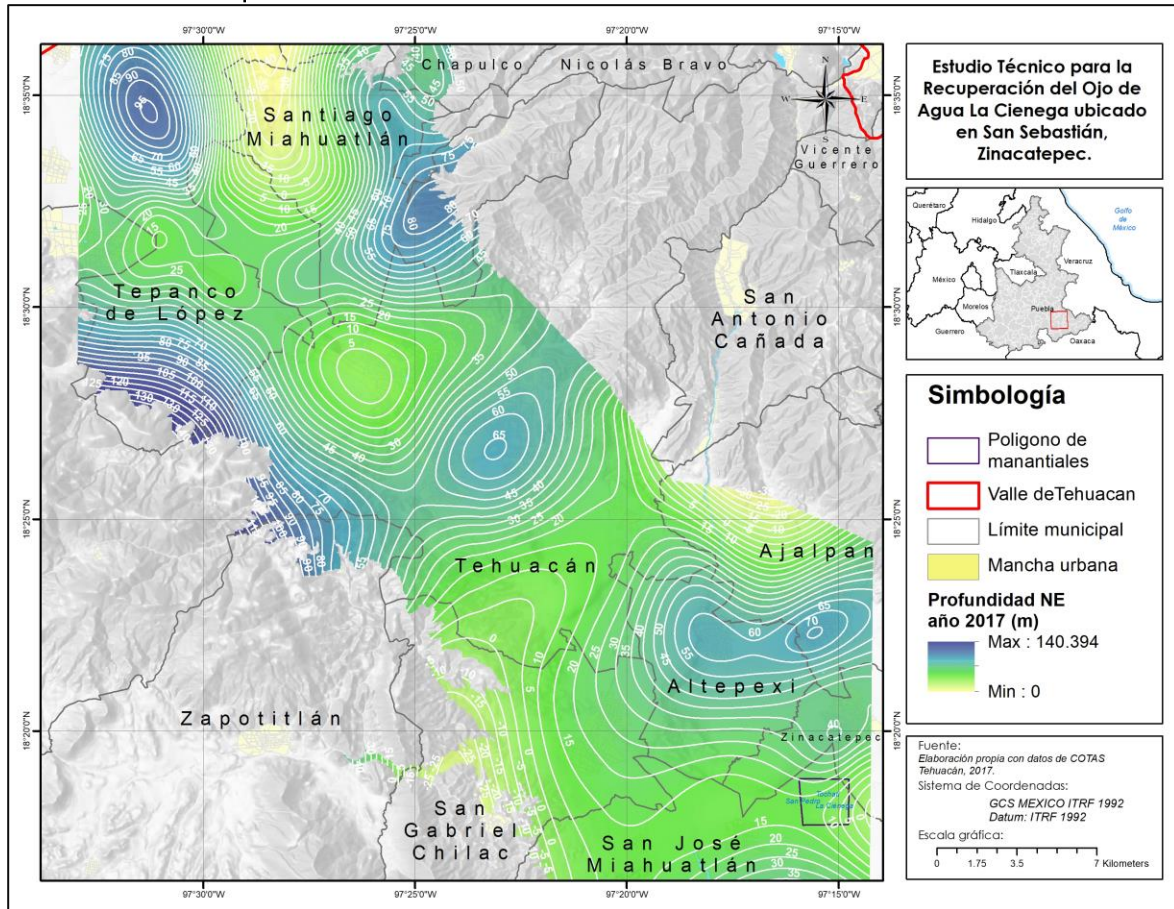
Mapa 6.6 Profundidad del Acuífero del Valle de Tehuacán 2008.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2008.

La red piezométrica de monitoreo cuenta con registros piezométricos de 56 pozos, algunos de los cuales cuentan con registros desde 1996. Las dos campañas de piezometría más recientes datan de los años 2008 y 2017 (mapas 6.7 al 6.11), mismas que estudiaron aprovechamientos en toda la red de monitoreo; mientras que, en 2021, se realizaron mediciones en los municipios próximos al manantial de La Ciénega (mapas 6.12 al 6.15 y Anexo 10).

Mapa 6.7 Profundidad del Acuífero del Valle de Tehuacán 2017.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2017.

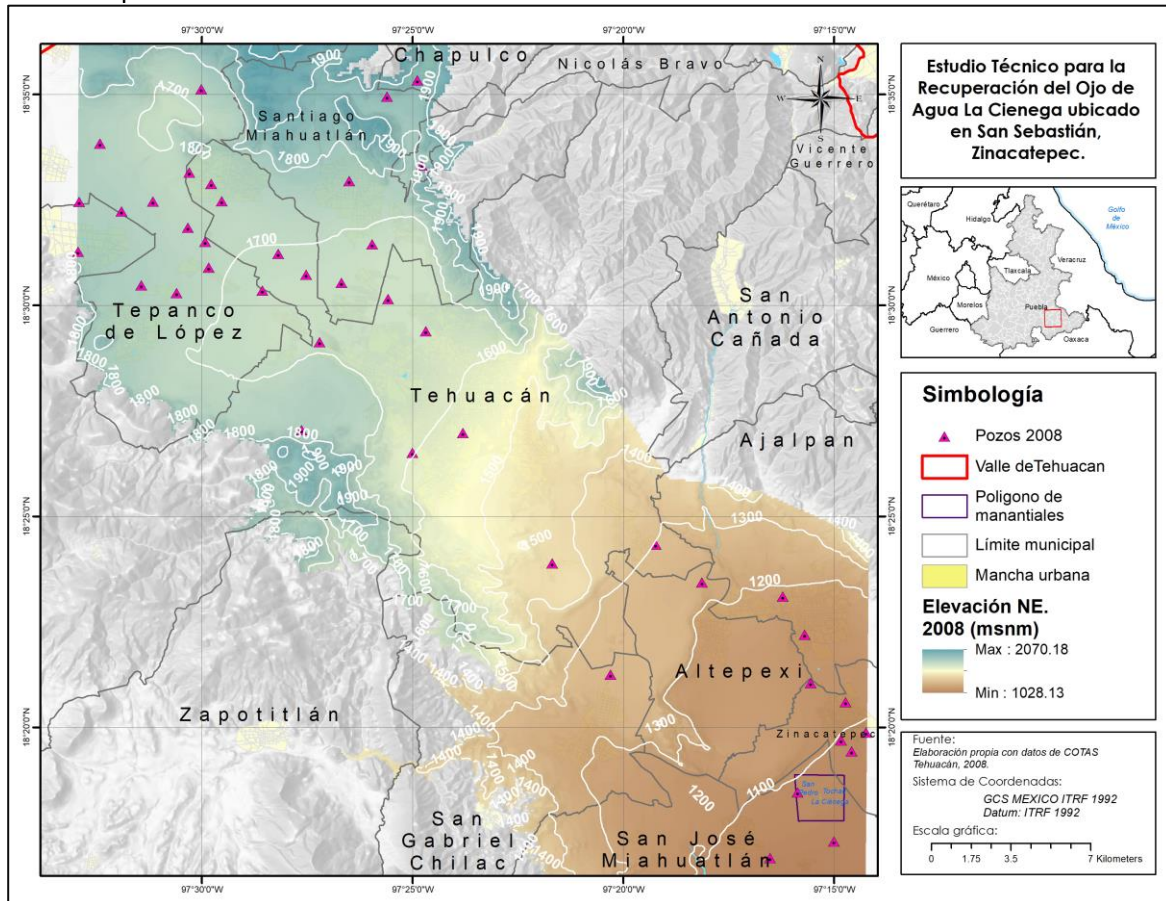
La configuración de isolíneas de profundidad denota aparentes conos en el acuífero, que realmente tienen su origen en la topografía del terreno.

De acuerdo con los registros piezométricos de mediciones de profundidad al nivel estático del acuífero, se identifican profundidades que alcanzan los 160 metros, lo cual se debe en mayor medida a que los pozos que corresponden a dichos registros se encuentran en puntos con elevación topográfica por encima del Valle de Tehuacán, lo que implica mayor distancia al nivel del acuífero desde la cota del brocal de los pozos.

Al considerar la cota topográfica del terreno y la profundidad al nivel estático se determina el nivel estático con respecto al mar, así se realizó la configuración de isopiezas para los periodos 2008 – 2017, donde se confirma que, al margen de las evoluciones negativas que se focalizan en zonas

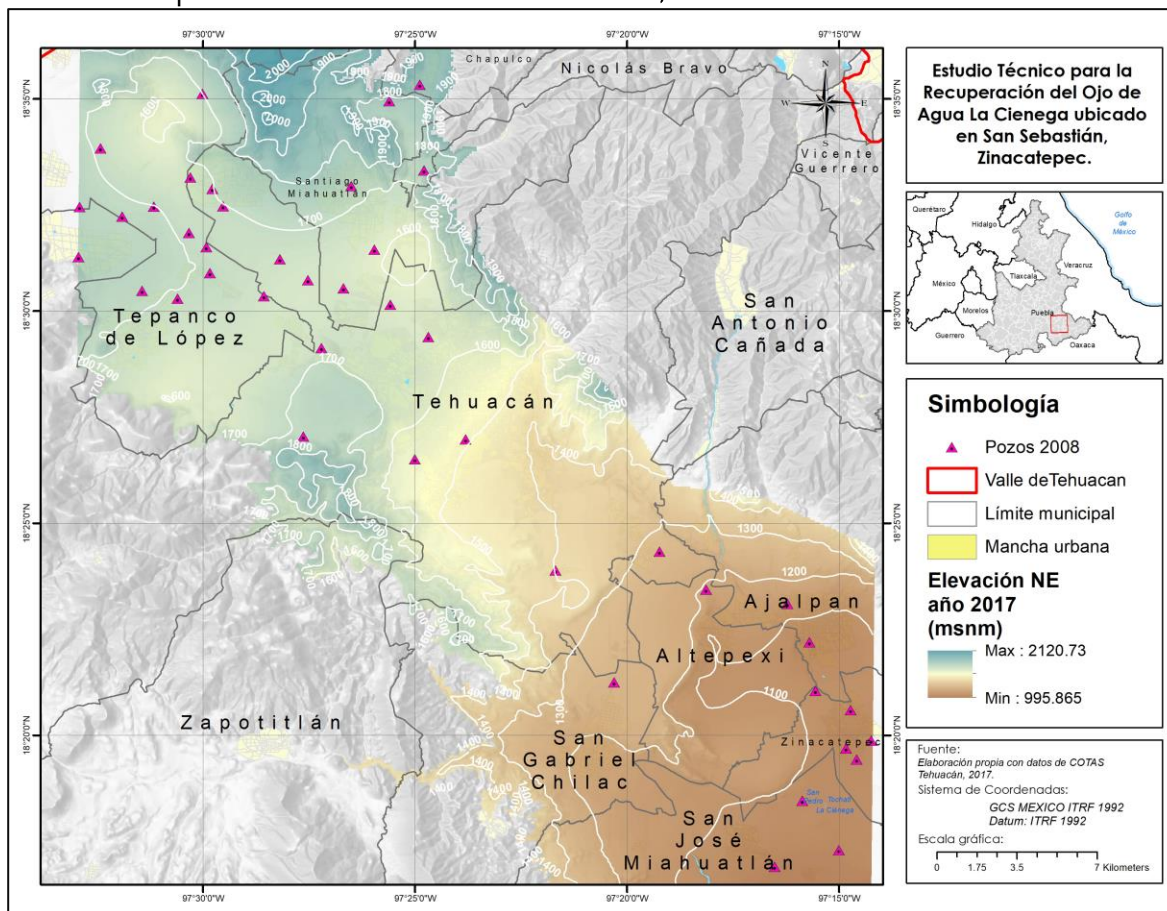
específicas, dichos abatimientos no son tales, que modifiquen el patrón de flujo subterráneo en dirección noroeste – sureste.

Mapa 6.8 Elevación del nivel estático del año 2008, acuífero del Valle de Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2008.

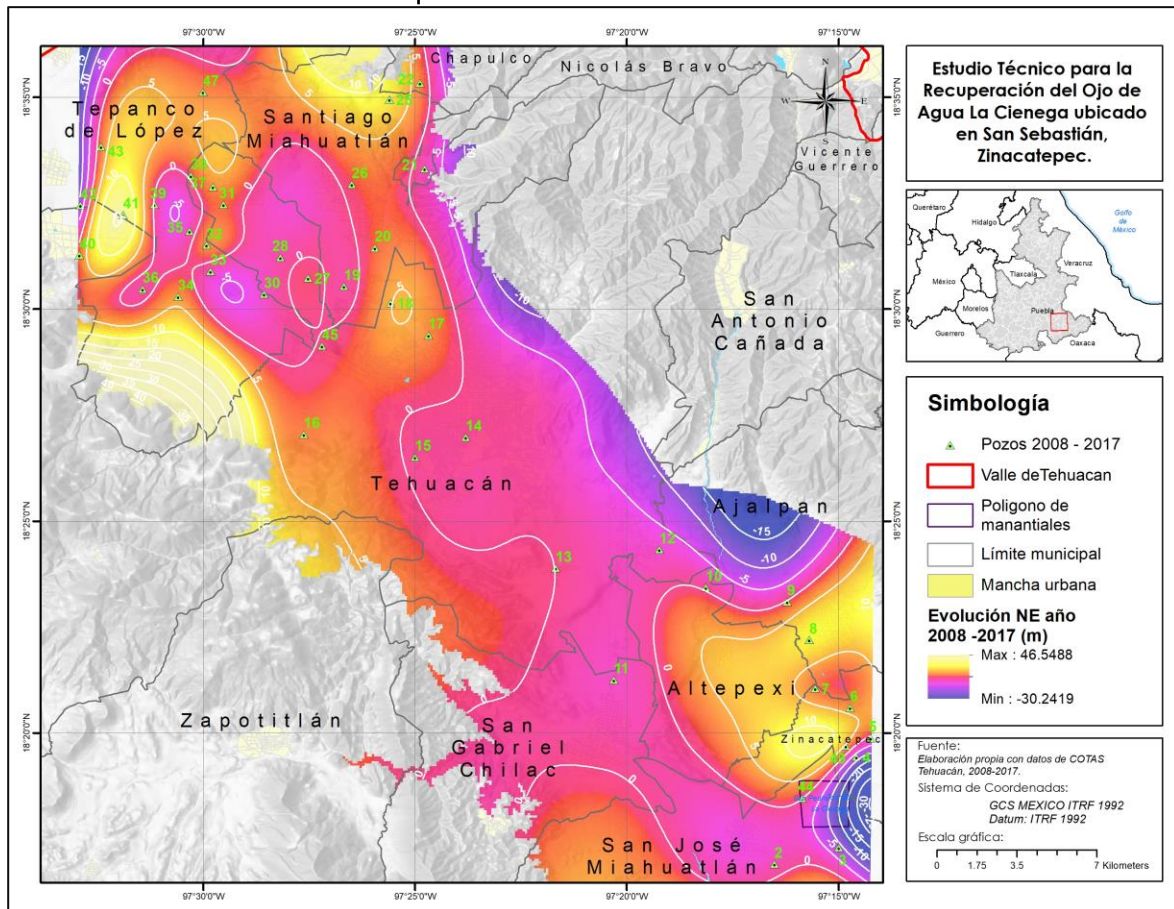
Mapa 6.9 Elevación del nivel estático 2017, acuífero del valle de Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2017.

Para valorar la evolución del nivel estático del acuífero durante el período 2008-2017, fue necesario considerar exclusivamente aquellos pozos con datos en los dos años de la comparativa, ya que, tanto en 2008, como en 2017, existen sitios medidos que no tuvieron un registro en los dos años, sino únicamente en una de las dos campañas de monitoreo de niveles.

Mapa 6.10 Evolución 2008 – 2017.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2008-2017.

Del análisis de evolución de niveles, se confirma que los mayores abatimientos interpolados se encuentran tanto al norte del acuífero en la zona contigua al acuífero de Tecamachalco y en la zona comprendida entre Zinacatepec, Ajalpan y Altepexi, donde se visualizan importantes superficies con actividad agrícola.

Los sitios ubicados al oriente de los manantiales muestran un comportamiento con recuperación de niveles piezométricos en años recientes (2017), esto de acuerdo con el valor de los pozos con registros para el período de observación (pozos 3, 4 y 5, con recuperaciones de 8.39 m, 7.53 m y 1.00 m, respectivamente).

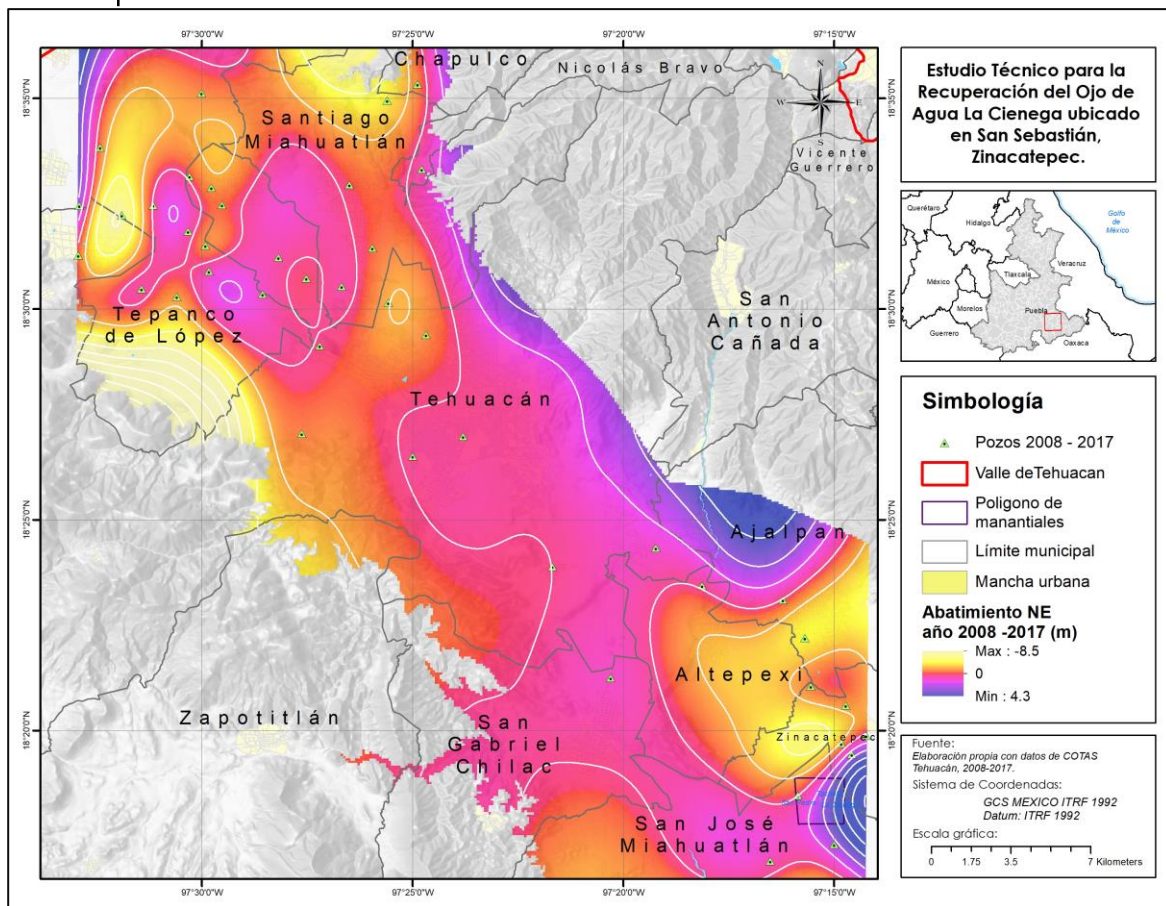
Tabla 6.2 Listado de pozos y profundidad del nivel estático para los años 2017 – 2008.

ID	Clave	Nombre del Pozo	Profundidad (m) 2017	Profundidad (m) 2008	Evolución prof. (m)
1	TH-01	Soc. Miahuatlán	22.58	20.75	1.83
2	TH-02	Soc. Riego S.J. Miahuatlán	27.16	29.10	-1.94
3	TH-03	Soc. S. Marcos	11.90	20.29	-8.39
4	TH-04	Soc. Verónica	24.50	32.03	-7.53
5	TH-05	Soc. Zinacatepec	30.17	31.17	-1.00
6	TH-06	A.P. Zinacatepec	35.48	31.74	3.74
7	TH-08	pozo San Miguel (Norberto)	41.67	39.06	2.61
8	TH-09	A.P. Ajalpan P-4	69.95	61.17	8.78
9	TH-11	A.P. Ajalpan P-3	43.82	43.44	0.38
10	TH-14	Comité AP Pantzingo de Morelos	49.17	49.71	-0.54
11	TH-15	Col. Del Sol	29.35	31.80	-2.45
12	TH-16	Los López Tehucán	27.25	30.28	-3.03
13	TH-17	A.P.S.M. Necoxtla	10.93	10.96	-0.03
14	TH-19	Xochipili, OOSAPAT	58.00	58.47	-0.47
15	TH-20	Junta Auxiliar Santa María Coapan	38.04	38.42	-0.38
16	TH-21		40.70	38.06	2.64
17	TH-22	OOSAPAT AEROPUERTO 6	19.20	16.14	3.06
18	TH-24	AEROPUERTO 3 OOSAPAT	35.85	30.98	4.87
19	TH-25	Soc. Tepeyotla	35.00	35.96	-0.96
20	TH-26	Sr. M. Baglietto	64.80	63.21	1.59
21	TH-27	A.P. Sta. Ana	73.90	75.76	-1.86
22	TH-28	La Colonia	42.59	39.87	2.72
23	TH-29	Gpo. La Providencia	51.10	58.51	-7.41
24	TH-30	A.P. Azumbilla	17.53	19.67	-2.14
25	TH-31	Gpo. U.P. Fco. I. Madero. Pozo Tolozintle	59.35	51.28	8.07
26	TH-32	A.P. Stgo. Miahuatlán	22.28	21.37	0.91
27	TH-34	Gpo. P-77S. Miahuatlán La Tortuga	37.22	36.34	0.88
28	TH-36	Soc. Pozo 75	27.48	28.70	-1.22
29	TH-37	Puente Bco. pino Suarez	30.82	29.75	1.07
30	TH-38	Tetele Muerto P-2	26.11	28.92	-2.81
31	TH-39	Cuayucatepec, OOSAPET-2	19.30	17.60	1.70
32	TH-40	Soc. R. Cuayucatepec	23.78	20.72	3.06
33	TH-41	Rancho Castillo Pozo 72	16.66	18.83	-2.17
34	TH-42	Gpo. P-IS. Bartolo Teont. Zopilote Blanco	36.40	32.89	3.51
35	TH-43	Gpo. De R. Cuayuca P-3	22.80	24.68	-1.88
36	TH-44	Soc. 5 de Mayo	30.06	31.09	-1.03
37	TH-45	Cuayucatepec, OOSAPET-5	22.00	18.73	3.27
38	TH-46	Jorge Rivero Cuatucatepec	53.45	52.75	0.70
39	TH-48	Sr. N. Bringas Rcho. Rocio	28.55	28.84	-0.29
40	TH-49	A.P. Tepeteopan	28.78	27.38	1.40
41	TH-50	Gpo. San José Tepanco (Filemon Trujillo)	32.90	18.26	14.64
42	TH-50A	Rancho La Pasión. Manuel Cobo Sevilla	17.10	24.91	-7.81
43	TH-53	Asoc. Agric. Cacaloapan	56.27	54.04	2.23
44	TH-62	A.P.S. José Miahuatlán	14.90	14.83	0.07

ID	Clave	Nombre del Pozo	Profundidad (m) 2017	Profundidad (m) 2008	Evolución prof. (m)
45	TH-63	Pozo Caseta 56	11.75	11.62	0.13
46	TH-AC-13	A. Pot. Chapulco Tepozan P-2	40.17	43.87	-3.70
47	TH-AC-26	Soc. S. Luis Temalacayucan (El Tecajete)	39.80	36.74	3.06
48	TH-AC-85	A.P. Pericotepec	37.11	33.93	3.18
49	TH-AC-269	Soc. Civil San Isidro	36.30	32.13	4.17

Fuente: COTAS Tehuacán.

Mapa 6.11 Abatimiento medio anual del acuífero del Valle de Tehuacán 2008-2017.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2008-2017.

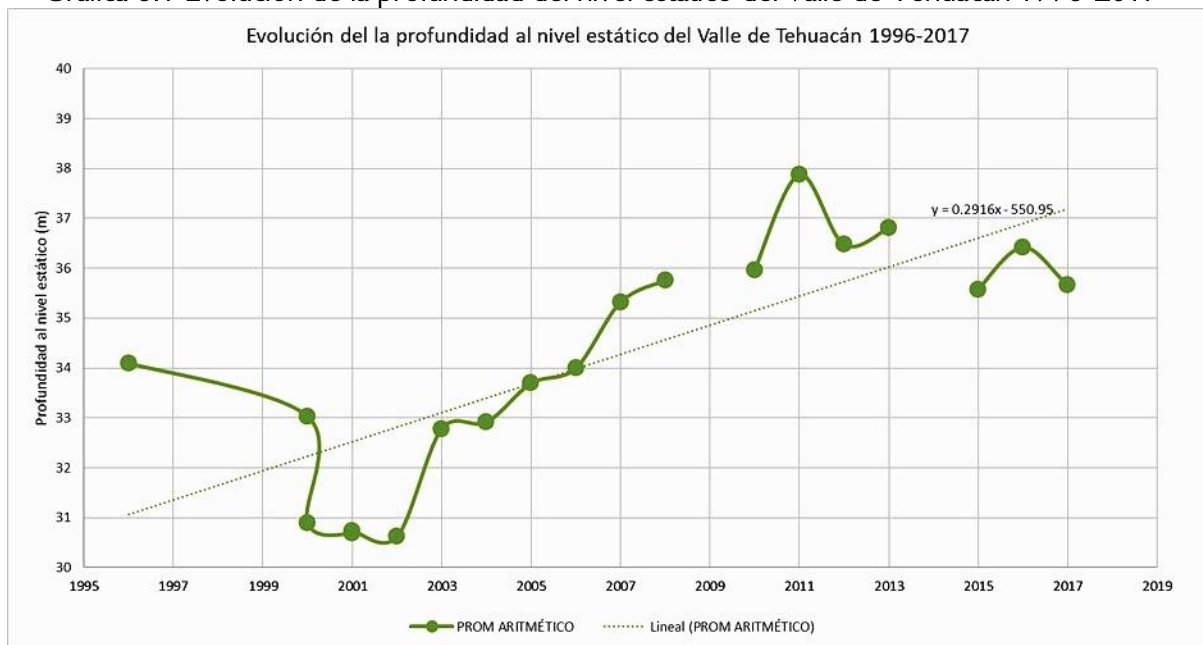
Si bien el acuífero se encuentra publicado en el Diario Oficial de la Federación en condición de disponibilidad, la realidad es que ha presentado un sistemático proceso de abatimiento en la generalidad de su superficie, condición que eventualmente presenta recuperaciones locales en las zonas con mayor susceptibilidad a la recarga durante la época de lluvias.

El análisis piezométrico más completo de la red de monitoreo concluye en el año 2017 con un comportamiento a la baja en la mayor extensión del acuífero. El comportamiento del valor del promedio aritmético de la profundidad al nivel estático denota un abatimiento medio anual, de 35 cm.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de la evolución del nivel estático en el periodo de 1996 al 2017 en el acuífero Valle de Tehuacán.

De acuerdo con el análisis de la línea de tendencia se puede decir que, bajo el supuesto de un coeficiente de almacenamiento promedio, de 0.1 y una superficie de acuífero de 678 km², esto implica una pérdida próxima de 20 hm³ por año.

Gráfica 6.1 Evolución de la profundidad del nivel estático del Valle de Tehuacán 1996-2017

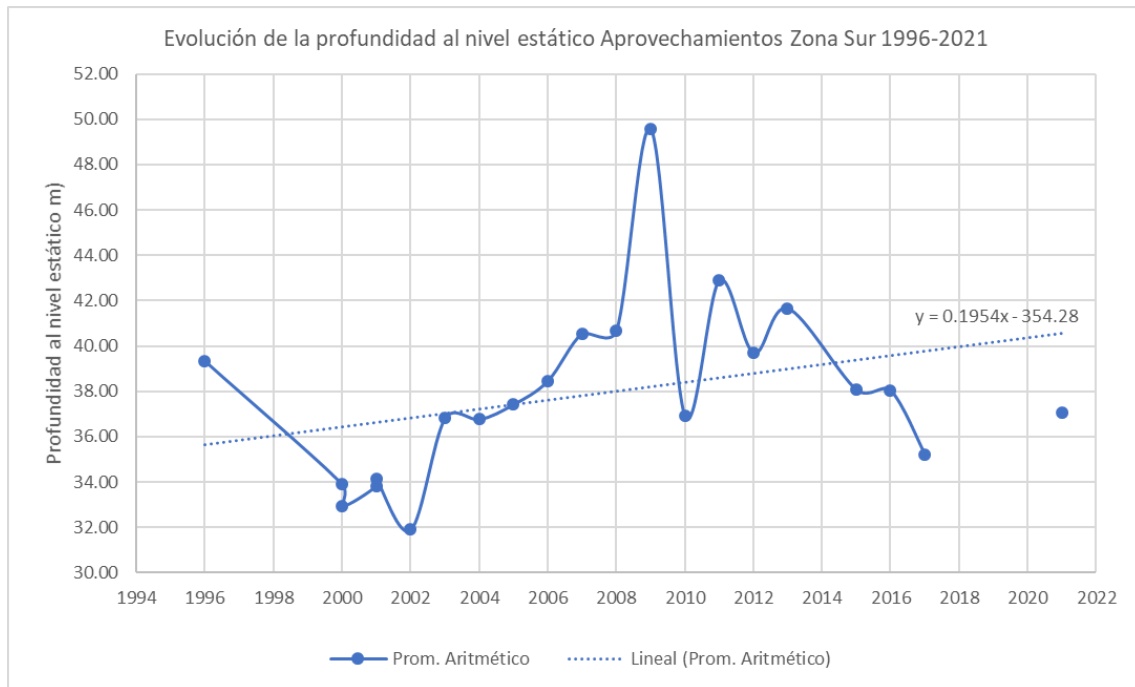


Fuente: COTAS Tehuacán, 2017.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento de la evolución del nivel estático en el periodo de 1996 al 2021, únicamente en aprovechamientos en la zona sur del acuífero Valle de Tehuacán, donde se pudo obtener las mediciones en el año 2021.

Con el análisis de la línea de tendencia para este período implica una pérdida próxima de 13 hm³ por año, bajo el supuesto de un coeficiente de almacenamiento promedio, de 0.1 y una superficie de acuífero de 678 km².

Gráfica 6.2 Evolución de la profundidad del nivel estático 1996 - 2021.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021

Un análisis local de los promedios aritméticos de la profundidad al nivel estático demuestra que existe una tendencia de abatimiento del nivel estático en la zona sur, en los alrededores del manantial La Ciénega, situación que denota un proceso de sobreexplotación que se observa de manera muy evidente durante los registros de las últimas dos décadas.

De cualquier manera, las profundidades al nivel estático registradas en los aprovechamientos subterráneos de los municipios de Zinacatepec, Santiago Miahuatlán y Ajalpan, denotan una tendencia a la baja en el nivel del acuífero aprovechado por los pozos.

La configuración del nivel estático, igualmente, refleja un comportamiento heterogéneo que hace evidente la existencia de un acuífero superior -que aflora en el manantial de la Ciénega – y uno inferior, aprovechado por los pozos.

Es probable que el afloramiento de agua en los manantiales tenga una naturaleza similar a la de las galerías filtrantes, contando con agua proveniente de la Sierra Negra que fluye por estratos superiores por encima de estratos de baja permeabilidad, igualmente es relevante el relieve topográfico.

La disminución de caudal puede ocurrir por causas diversas, entre las cuáles se encuentran:

- Disminución de su recarga, debida a la deforestación y cambio de uso de suelo en sus zonas de captación, que disminuyen su infiltración e incrementan el escurrimiento.
- La intercepción de caudales en su zona de recarga, debida a aprovechamientos someros, como norias poco profundas, perforadas en tiempos recientes.
- Disminución de presión del acuífero subyacente, que intensifica el flujo hacia los pozos, disminuyendo la aportación hacia los manantiales. Esta, debida a la sobreexplotación del acuífero, que tal como se muestra en gráficos predecesores, conlleva un abatimiento de los niveles estáticos inferiores, originando mayores gradientes y flujos desde las zonas de recarga, hacia los estratos profundos.

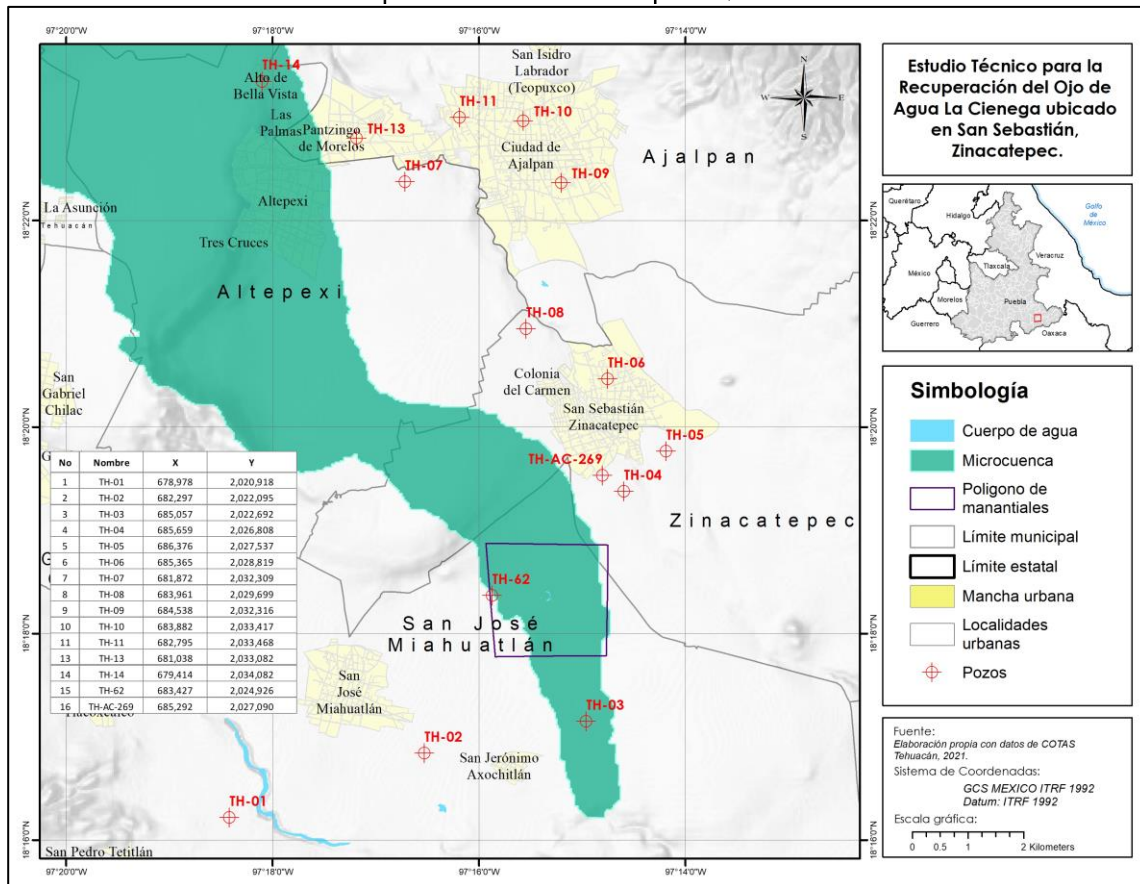
6.12.1 Balance local en zona del manantial La Ciénega

Análisis piezométrico en inmediaciones del manantial La Ciénega

La explotación intensiva de agua subterránea podría generar un desequilibrio entre las áreas de recarga y extracción, cambio en los patrones de flujo subterráneo, profundización de los niveles de bombeo y descenso general del nivel freático. La Ciénega es un afloramiento de agua subterránea, por lo tanto, es importante conocer el comportamiento temporal y espacial del agua subterránea en los municipios aledaños al manantial.

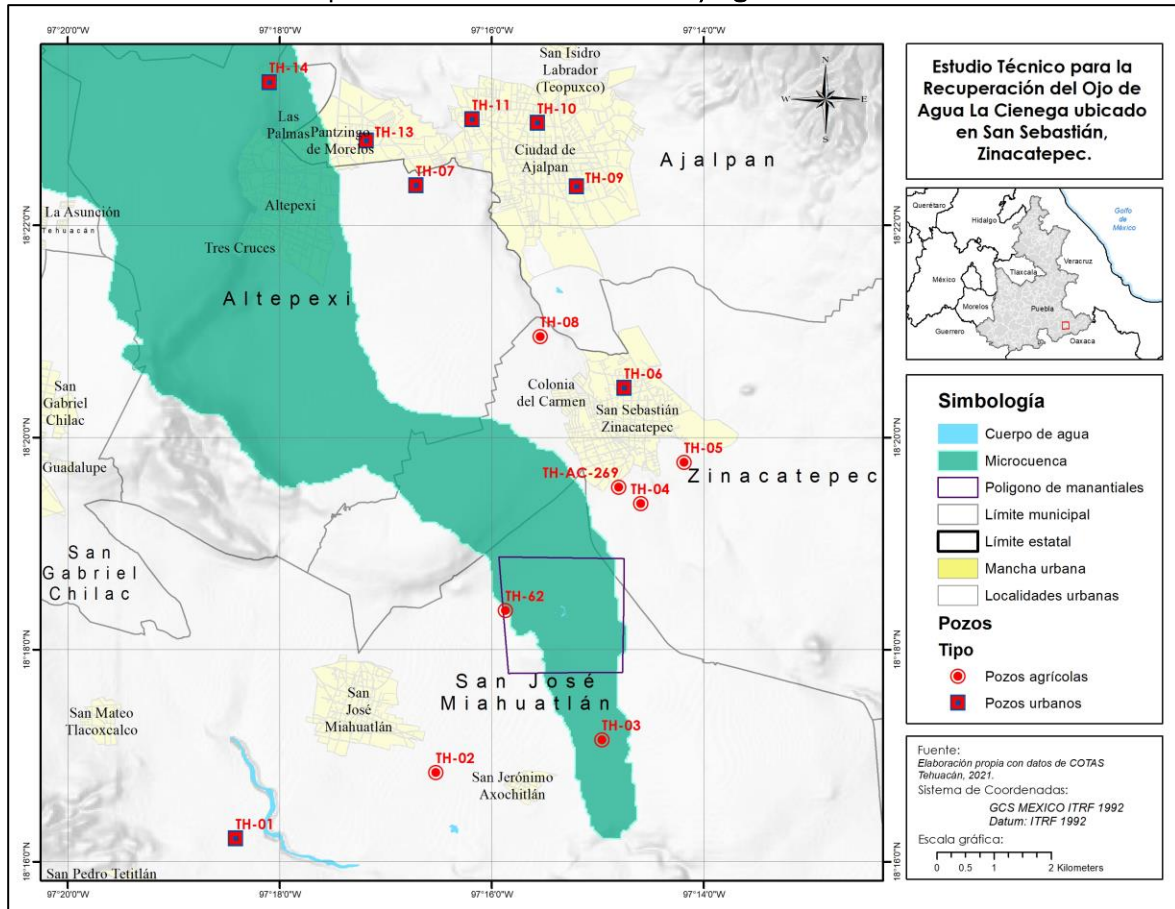
El estudio de las superficies piezométricas permite obtener información básica sobre el movimiento y comportamiento del agua subterránea de una zona, para este caso en específico, del manantial "La Ciénega". Dentro de la información proporcionada está la dirección del flujo del agua subterránea, así como la evolución y comportamiento de la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea. Esto es un indicativo claro de cómo la dinámica del acuífero influye en los niveles de agua de los manantiales. Es por ello que se procedió a realizar las mediciones en los pozos circundantes a la zona de manantiales, corroborando que hay una relación estrecha entre el comportamiento del nivel estático y los niveles de agua de los manantiales. De acuerdo con la información proporcionada por el COTAS Tehuacán relativa a años anteriores, más las mediciones que se realizaron para este proyecto durante los meses de octubre y noviembre de 2021, en las siguientes gráficas se muestran el comportamiento de la profundidad de los niveles estáticos en los diferentes pozos en los municipios de Ajalpan, Zinacatepec y San José Miahuatlán.

Mapa 6.12 Ubicación de pozos, 2021.



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

Mapa 6.13 Pozos de uso urbano y agrícola, 2021.

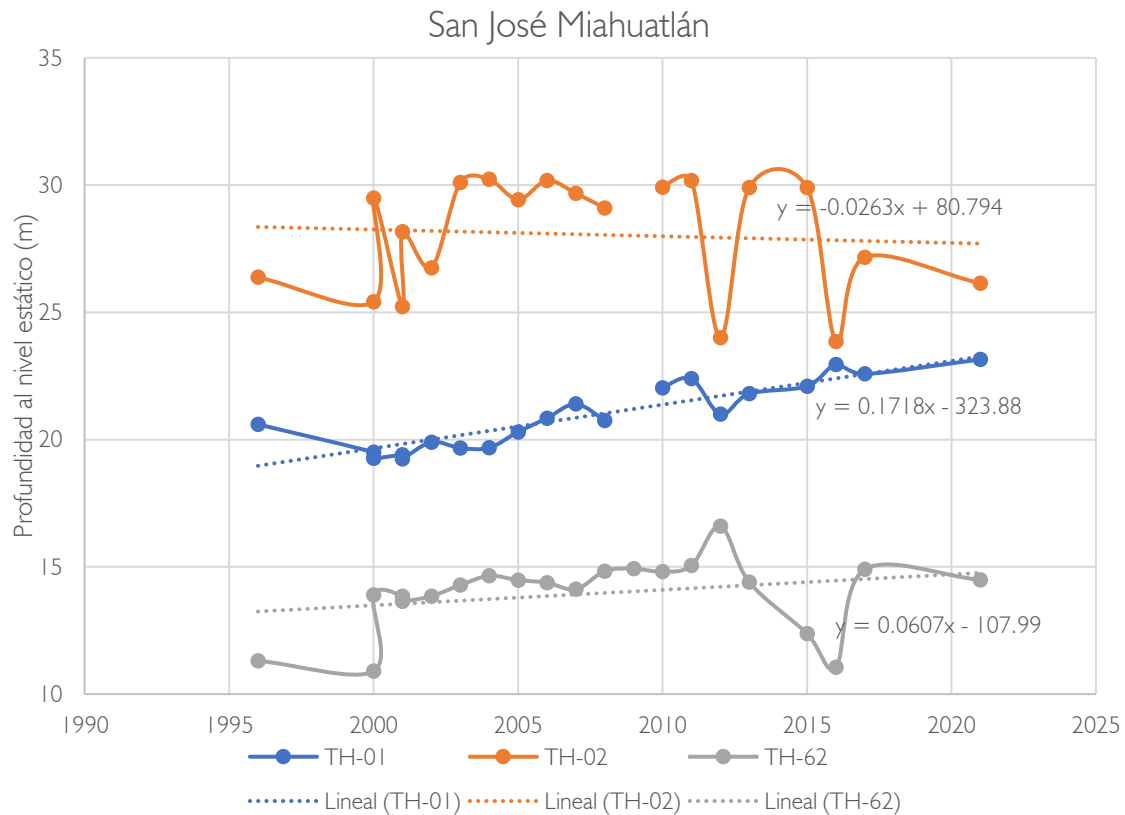


Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

San José Miahuatlán

En San José Miahuatlán se hizo la medición de la profundidad al nivel estático de 3 pozos (TH01, TH02 y TH62, ver mapa 6.12), y en la siguiente gráfica 6.3 se muestra el comportamiento de la variación anual de la profundidad al nivel estático.

Gráfica 6.3 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH01, TH02 y TH62.



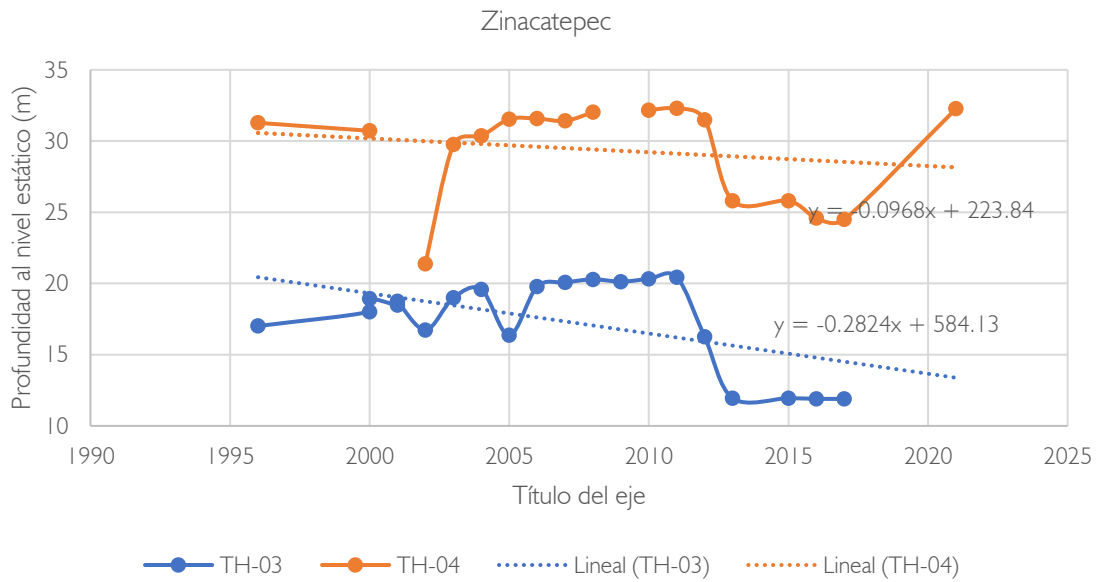
De acuerdo con sus líneas de tendencia, en el pozo TH02 la profundidad va al alza, hay recuperación, a diferencia de los pozos TH01 y TH62 que sus profundidades van a la baja.

Zinacatepec

En Zinacatepec se hizo la medición de la profundidad al nivel estático de 4 pozos (TH03, TH04, TH05 y TH06, ver mapa 6.12), y en las siguientes figuras se muestra el comportamiento de la variación anual de la profundidad al nivel estático.

En los pozos TH03, TH04 y TH05 el comportamiento de las líneas de tendencia de las profundidades van al alza, es decir, que los niveles en estos pozos se han recuperado.

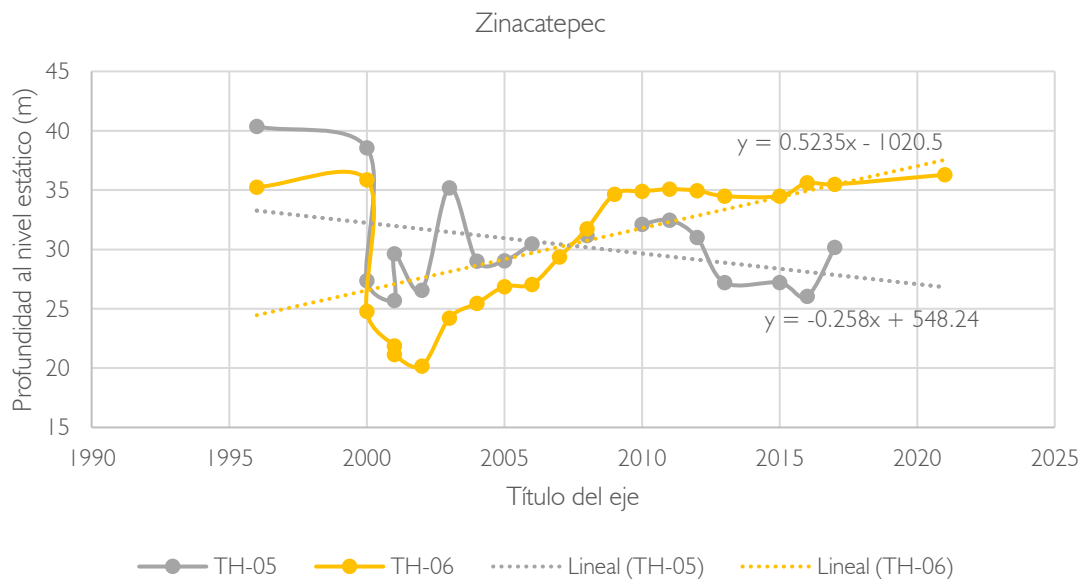
Gráfica 6.4 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH03 y TH04.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

En el pozo TH06, su línea de tendencia lineal muestra un comportamiento de las profundidades a la baja, obteniendo un valor de 0.52 m en la variación anual de profundidad.

Gráfica 6.5 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH05 y TH06.



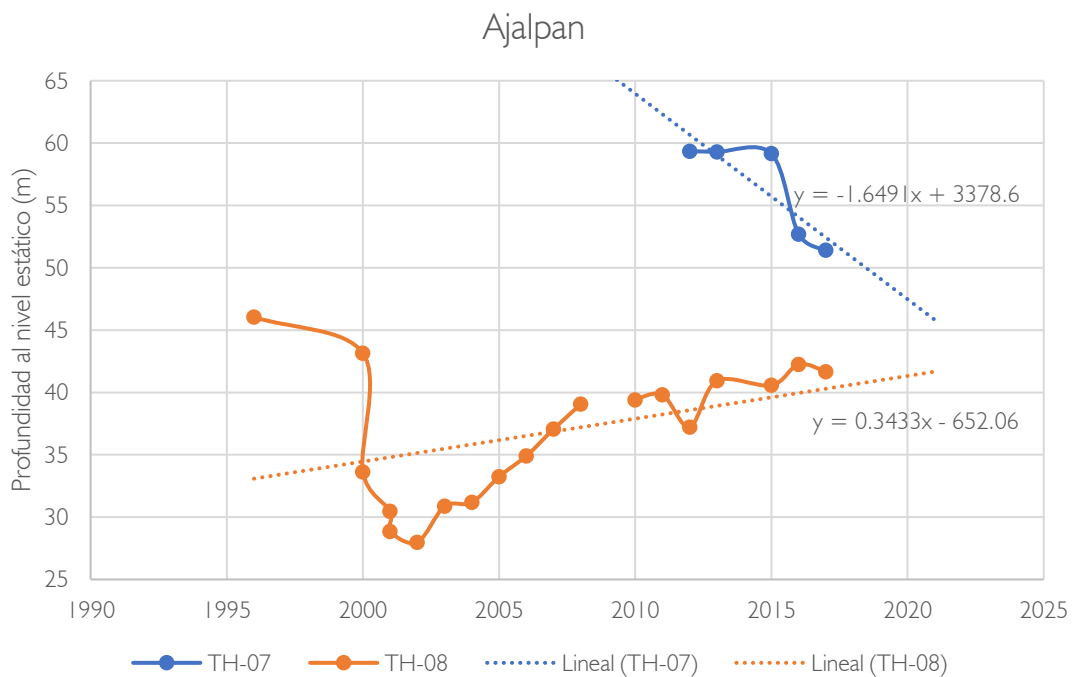
Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Ajalpan

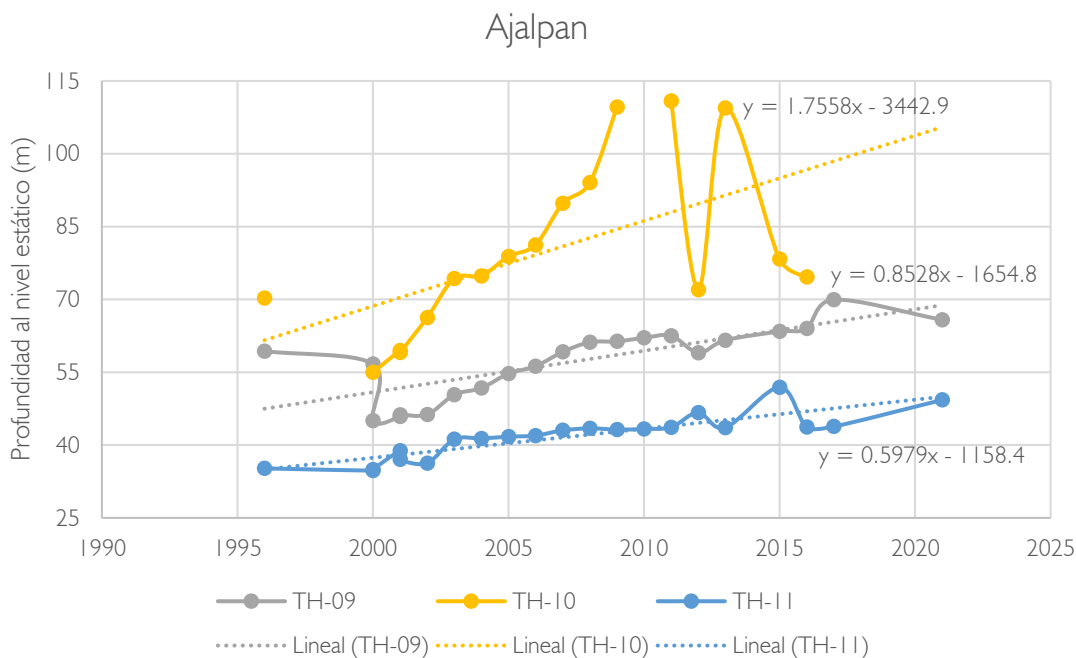
En el municipio de Ajalpan se hizo la medición de la profundidad al nivel estático de 7 pozos (TH07, TH08, TH09, TH10, TH11, TH13 y TH14, ver mapa 6.12), y en las siguientes gráficas se muestra el comportamiento de la variación anual de la profundidad al nivel estático.

De acuerdo con el comportamiento de las líneas de tendencia, los pozos TH07, TH13 y TH14 los niveles de la profundidad se encuentran al alza, por lo que sus niveles de agua se han ido recuperando, a diferencia de los pozos TH08, TH09, TH10 y TH11 que el comportamiento de las líneas de tendencia marca una baja en los niveles del agua.

Gráfica 6.6 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH07 y TH08.

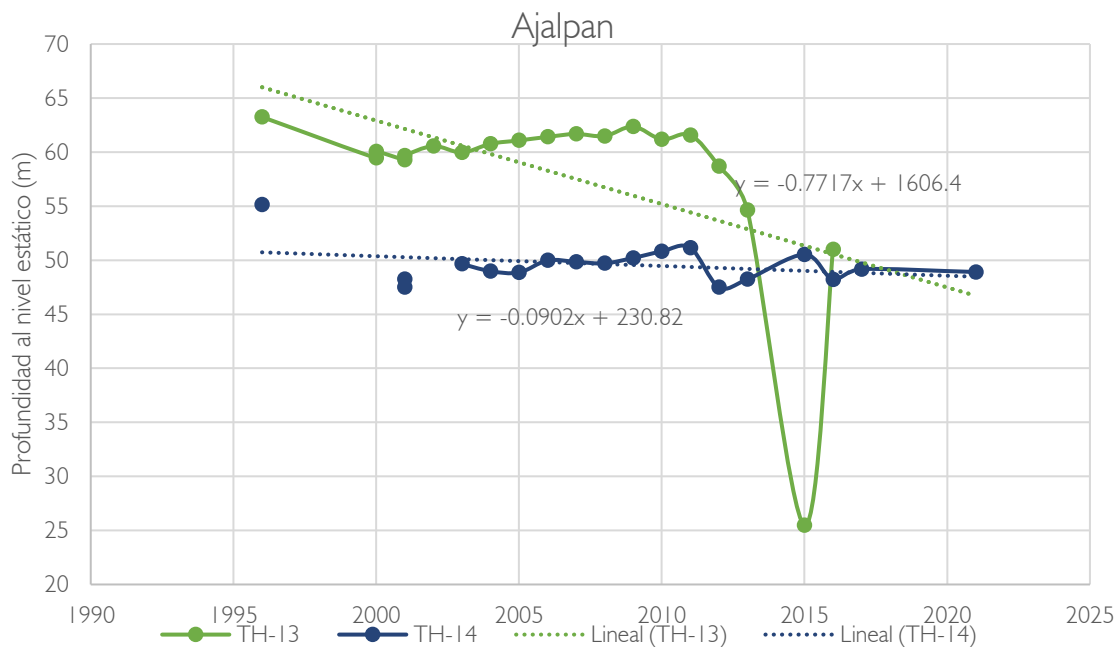


Gráfica 6.7 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH09 y TH10.



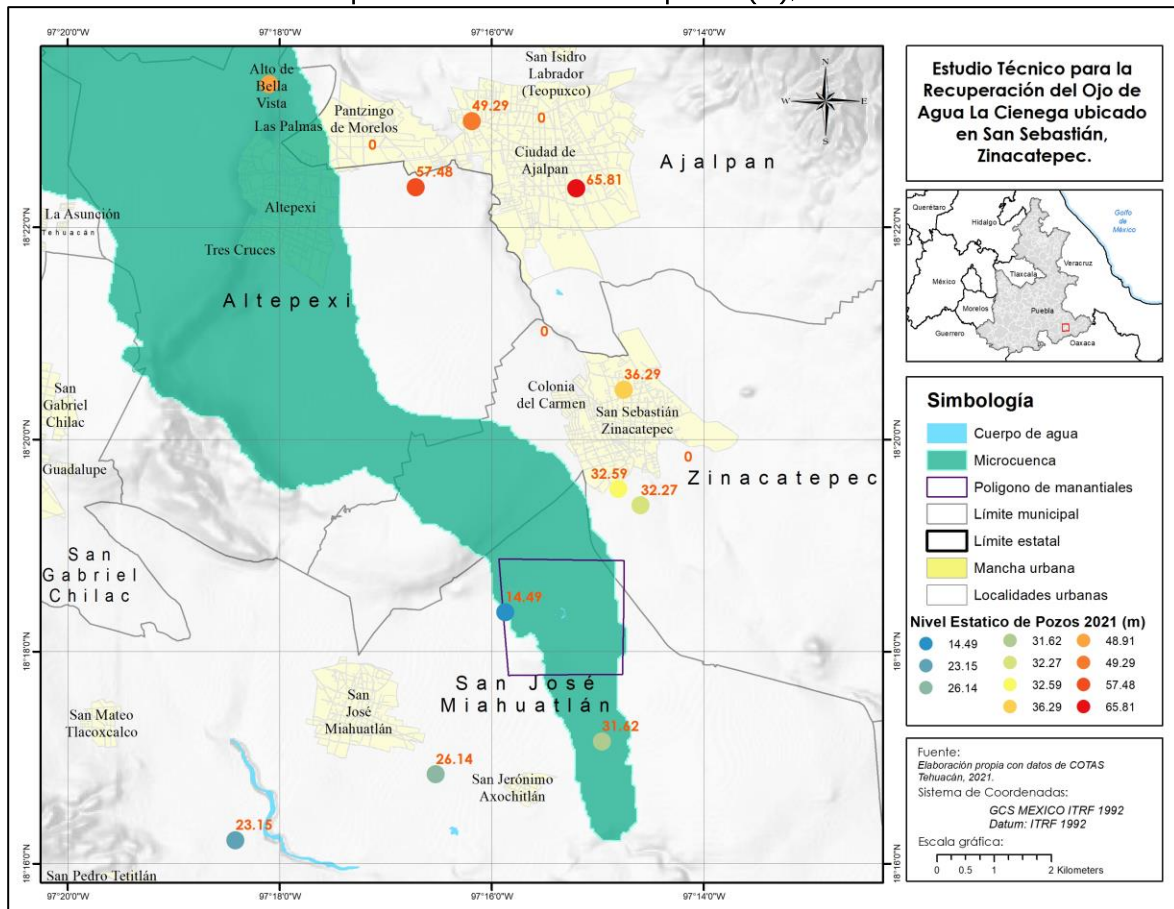
Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Gráfica 6.8 Evolución de la profundidad al nivel estático de los pozos TH13 y TH14.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Mapa 6.14 Nivel estático de pozos (m), 2021.



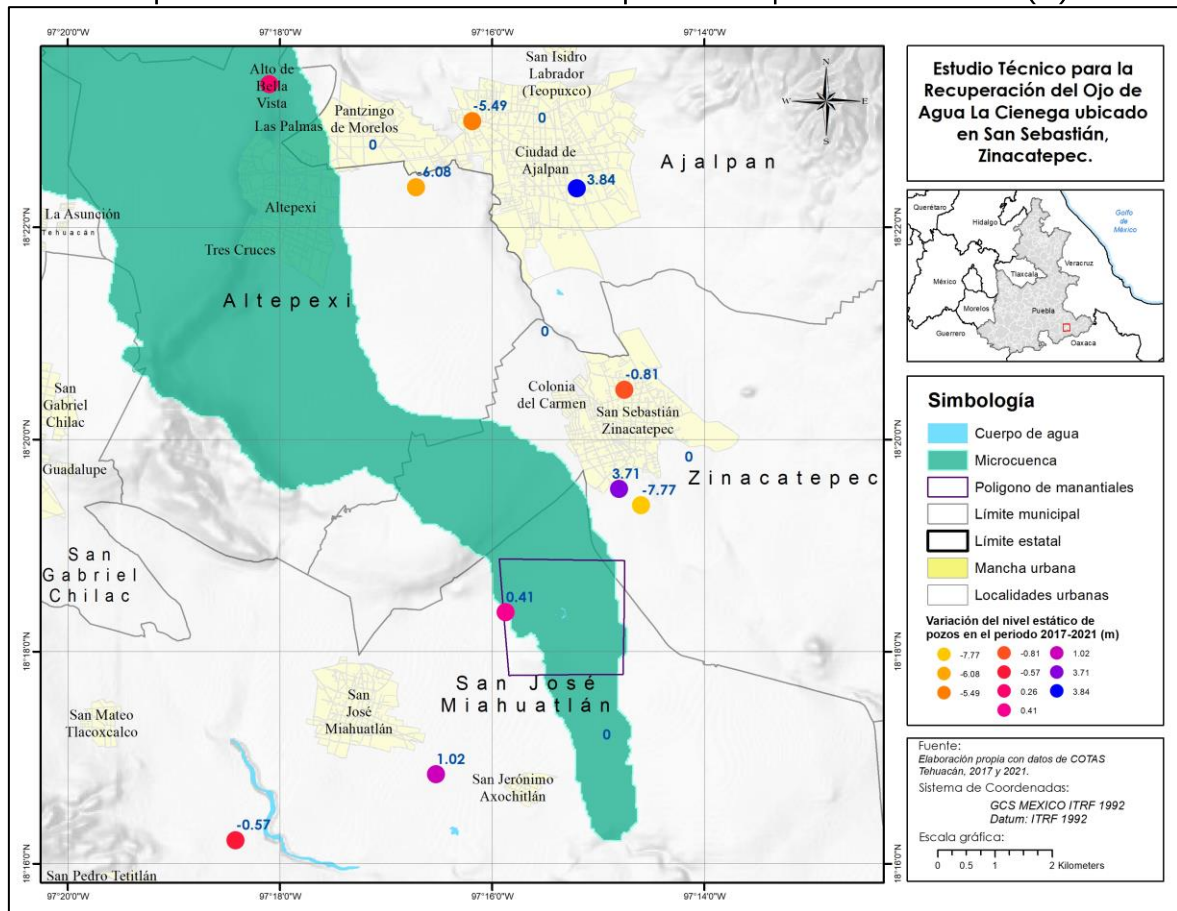
Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

Evolución del nivel estático en el periodo 2017-2021

Se configuró la evolución del nivel estático para el periodo 2017-2021 (4 años), la cual varió en un rango de entre -7.77 m hasta 3.84 m. Los resultados de la configuración indican que las zonas con mayor abatimiento se encuentran al sur de San Sebastián Zinacatepec, con una evolución de -7.77 m. También hubo zonas que registraron evoluciones positivas, como el caso de Ajalpan, con una variación de 3.84 m en el periodo de 4 años.

De las mediciones piezométricas de los pozos circundantes a la zona de los manantiales 2017 – 2021 se denota un abatimiento medio anual, de 28 cm, dato consistente con lo mencionado en CONAGUA 2020, de 30 cm por año en todo el acuífero.

Mapa 6.15 Variación del nivel estático de pozos en el periodo 2017-2021 (m).



Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2017 y 2021.

6.13 Balance del acuífero

Como se mencionó en apartados anteriores, el acuífero Valle de Tehuacán se encuentra parcialmente vedado; en la mayor parte de territorio rigen cuatro decretos de veda.

La porción centro y noroccidental se encuentran sujetas a las disposiciones del “Decreto por el que se amplía la veda para el alumbramiento de las aguas del subsuelo establecida en la zona de Tehuacán, Pue.”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de marzo de 1959. Este decreto se clasifica como tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Las porciones oriente, poniente y sur se encuentran sujetas a las disposiciones del “Acuerdo por el que se establece el Distrito de Riego de la Cuenca del Río Salado, en los Estados de Puebla y Oaxaca, y se declara de utilidad pública la construcción de las obras necesarias para su operación” publicado en el DOF el 19 de marzo de 1965. Este se clasifica como tipo II que sólo permite extracciones para uso doméstico.

Una pequeña porción en el extremo noroeste se encuentra sujeta a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona meridional del Estado de Puebla” publicado en el DOF el 15 de noviembre de 1967. Este decreto se clasifica como tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

La mayor parte del acuífero se encuentra sujeta a las disposiciones del “Decreto que declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Acuicultura Número Dos Cuenca del Papaloapan para preservar, fomentar y explotar las especies acuáticas, animales y vegetales, así como para facilitar la producción de sales y minerales” publicado en el DOF el 6 de agosto de 1973. Este decreto se clasifica como tipo II que sólo permite extracciones para uso doméstico.

Sólo en una pequeña área de la porción occidental del acuífero no rige ningún decreto de veda. La porción no vedada del acuífero Valle de Tehuacán, clave 2105, se encuentra sujeta a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

Adicionalmente, se emitió el “Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región denominada Tehuacán-Cuicatlán ubicada en los estados de Oaxaca y Puebla”, publicado en el DOF el 18 de septiembre de 1998, mismo que establece que desde el punto de vista hidrológico, la reserva protegerá la zona de manantiales y recarga de acuíferos, además del desarrollo de acciones y obras tendientes a evitar la contaminación de los acuíferos.

Una pequeña superficie de la extensión del Área Natural Protegida, hacia el extremo oeste del acuífero, se encuentra en zona no vedada.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de 2013, los municipios Tehuacán y Altepexi se clasifican como zona de disponibilidad 4; los municipios Tepanco de López, Santiago Miahuatlán, Nicolás Bravo, San Antonio Cañada, San Gabriel Chilac, **Zinacatepec**, Tlacotepec de Benito Juárez y Coxcatlán como zona de disponibilidad 5; Chapulco, Cañada Morelos y **San José Miahuatlán** como zona de disponibilidad 6; Vicente Guerrero, **Ajalpan**, Zapotitlán, Caltepec, Atexcal, Juan N. Méndez se clasifican como zona de disponibilidad 8 y los municipios Coyomeapan y Zoquitlán como zona de disponibilidad 9.

El usuario principal es el sector agrícola. El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Río Papaloapan. En la porción noroccidental de su territorio se localiza parte del Distrito de Riego 030 Valsequillo.

La comisión Nacional del Agua, realizó una actualización de la disponibilidad del agua en el Acuífero del Valle de Tehuacán, mismos que se presenta a continuación

De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación de fecha **17 de septiembre de 2020**, el acuífero del Valle de Tehuacán presenta una disponibilidad positiva de **28.19882 hm³**, esto es, al acuífero ingresa más agua de la que se extrae por lo que cuenta con el recurso hídrico disponible para su explotación.

Tabla 6.3 Disponibilidad publicada en el Diario Oficial de la Federación.

Región Hidrológico-Administrativa	Entidad Federativa	Clave	Acuífero	R	DNC	VEAS				DMA	
						VCAS	VEALA	VAPTYR	VAPRH	Positiva	Negativa (DÉFICIT)
						Cifras en millones de metros cúbicos anuales					
X Golfo Centro	Puebla	2105	Valle de Tehuacán	246.9	81.9	133.101	0	3.70018	0	28.19882	0

R: recarga total media anual; **DNC:** descarga natural comprometida; **VEAS:** volumen de extracción de aguas subterráneas; **VCAS:** volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; **VEALA:** volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; **VAPTYR:** volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; **VAPRH:** volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; **DMA:** disponibilidad media anual de agua del subsuelo. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales "3" (fracciones 3.10, 3.12, 3.18 y 3.25), y "4" (fracción 4.3), de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.

Fuente: Diario Oficial de la Federación de fecha 17 de septiembre de 2020.

Considerando lo anterior, se procedió a elaborar una estimación de los usos consuntivos actuales, así como una proyección al 2070 que nos permita identificar las tendencias de la presión que se ejercerá sobre el acuífero en estudio. El estudio mencionado, se realizó para el acuífero del Valle de Tehuacán en el 2015 y en esta ocasión se realizó la actualización del mismo con datos 2020. Para la estimación se consideraron los usos consuntivos público, agrícola e industrial.

Uso agrícola

En la región del acuífero del valle de Tehuacán, gran parte del uso de suelo corresponde a superficie utilizada para uso agrícola, siendo los principales cultivos, el maíz de grano, el frijol, avena forrajera y sorgo. Destacando la agricultura de temporal, sobre la agricultura de riego.

Para el cálculo del uso consuntivo, se considera la superficie de riego, misma que ejerce presión sobre la demanda de agua del acuífero, que, a diferencia de la agricultura de temporal, esta última depende únicamente de la cantidad de precipitación en la zona.

En la siguiente tabla se presentan los cultivos principales y la superficie correspondiente.

Tabla 6.4 Cultivos y superficie de riego (ha), del acuífero Valle de Tehuacán.

Cultivo	Riego	
	Hectáreas	%
Maíz de grano	11,012	43.5
Frijol	1,269	5.0
Tomate rojo (jitomate)	281	1.1

Cultivo	Riego	
	Hectáreas	%
Sorgo grano	1,279	5.1
Elote	11,264	44.5
Avena forrajera	182	0.7
	25,287	100

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2021.

De la tabla 6.4, se puede observar que el elote es el cultivo que ocupa la mayor proporción de superficie con uso agrícola del acuífero.

El agua que los cultivos necesitan para su desarrollo se puede estimar a través del Uso Consuntivo (UC), el mismo que se define como la cantidad de agua que la planta requiere para transpirar y formar tejido celular, más el agua que se evapora del suelo.

Para determinar el uso consuntivo agrícola del acuífero del Valle de Tehuacán se utilizó el método de Blaney y Criddle (Chapingo, 1999), que es uno de los mejores métodos, por su aproximación y facilidad para determinar el UC de los cultivos.

Primero se tomaron los datos de los tipos de cultivos en el acuífero del Valle de Tehuacán, así como las hectáreas dedicadas a cada uno de los cultivos.

Para la determinación del uso consuntivo se deben de considerar diferentes variables como son:

- Cultivo
- Ciclo vegetativo
- Variedad
- Fecha de siembra
- Lugar (latitud y longitud)

Se utilizan, además, los coeficientes globales del uso consuntivo

$$U. C. = K * f$$

Donde:

U.C. = Uso consuntivo en cm

K = Coeficiente global de uso consuntivo

f = Factor de temperatura – luminosidad

El método de Blaney y Criddle es un método indirecto que usa los factores de temperatura media mensual y porcentajes de horas luz para diferentes latitudes, para estimar la evapotranspiración de cultivos. Por lo que f se calcula de la siguiente manera:

$$f = (p (t + 17.8)) / 21.8$$

Donde:

p = Porcentaje de horas luz del mes, con respecto al total anual.

t = Temperatura media mensual en °C.

Utilizando el valor de corrección por temperatura Kt

$$Kt = 0.0314t + 0.2396$$

Donde:

t = Temperatura media mensual en °C.

Kc = Coeficiente de desarrollo de cada intervalo considerado del ciclo total vegetativo del cultivo = K

Una vez que se cuenta con la información general, se debe contar con los datos de temperatura promedio para cada uno de los meses en que se tiene establecido el cultivo. Para ello se contó con los datos históricos y se determinaron las temperaturas promedio con base a la normal.

A continuación, se obtiene el porcentaje de horas–luz en el día para cada mes del período de cultivo (factor P) para la latitud promedio de la zona de estudio. Este dato se puede identificar mediante las

tablas de la FAO, donde de acuerdo con la latitud del lugar, se determinan los porcentajes de horas luz promedio.

Posteriormente se calcula el coeficiente Kt, que depende de la temperatura media mensual. Finalmente se obtiene el coeficiente de desarrollo Kc de cada cultivo para el cálculo del uso consuntivo.

Para llevar un orden en la estimación de los usos consuntivos de los diferentes cultivos, se elaboró una hoja de cálculo, tal como se muestra a continuación.

Tabla 6.5 Formato de hoja de cálculo de uso consuntivo.

Mes	(1) Temp media T°C	(2) Valor de P Horas luz	(3) Factor Kt	(4) Valor f P x Kt (2) x (3)	(5) Valor Kc	(6) Uso consuntivo (cm) (4) x (5)
-----	--------------------------	--------------------------------	------------------	---------------------------------------	-----------------	--

Fuente: Blaney y Criddle, 1996.

De esta manera se realizó el cálculo para cada uno de los cultivos del Valle de Tehuacán: maíz de grano, frijol, tomate, sorgo de grano, elote y avena. A este uso consuntivo se le resta la precipitación promedio en cada uno de los meses del ciclo vegetativo. En la siguiente tabla se muestran los resultados generales del uso consuntivo agrícola para el Valle de Tehuacán.

Tabla 6.6 Superficies de cultivo en el acuífero del Valle de Tehuacán.

Cultivo	Riego		UC	Factor de eficiencia	UC	Lluvia	Demanda neta riego	UC total
	Hectáreas	%	m ³ * ha	FE	m ³ * ha	m ³ /ha	m ³ /ha	m ³ /año
Maíz de grano	11,012.0	35.84	9,216.15	1.35	12,441.80	2,680.00	9,761.80	107,496,990.13
Frijol	1,269.0	5.36	6,685.43	1.30	8,691.06	2,070.00	6,621.06	8,402,122.94
Tomate rojo (jitomate)	281.0	0.54	8,830.18	1.20	10,596.22	3,640.00	6,956.22	1,954,698.05
Sorgo grano	1,279.0	6.41	8,626.61	1.25	10,783.27	3,880.00	6,903.27	8,829,280.04
Elote	11,264.0	33.46	6,933.55	1.30	9,013.62	2,680.00	6,333.62	71,341,911.19
Avena forrajera	182.0	18.39	19,496.78	1.10	21,446.46	4,680.00	16,766.46	3,051,496.05
Total	25,287.00	100.00						201,076,498.41

Fuente: Elaboración propia, con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2021.

Consumo público

La población humana no sólo demanda alimentos, también consume agua para satisfacer necesidades físicas personales (alimentación e higiene) y demanda productos industriales que requieren, a su vez, del uso de agua. Cuando la reserva disponible de agua no permite satisfacer todas las necesidades sociales y requerimientos ambientales existe escasez de agua y, se producen situaciones de competencia entre usuarios. Las situaciones de escasez ocurrirán en regiones con baja disponibilidad de recursos hídricos o con rápido crecimiento de la población, y se verán acentuados cuando el consumo per cápita sea creciente debido a los cambios en las pautas de consumo (Falkenmark, 1989).

El consumo se urbano se calcula con base en la población actual, así como en las proyecciones de población, considerando el porcentaje de población que habita en zonas urbanas y rurales, ya que se tienen un consumo diferido dependiendo de la zona, en su caso urbana o rural. Para esta clasificación se consideraron 2 categorías, localidades con una población menor a 2500 habitantes y de 2500 a más habitantes.

En la tabla 6.7 siguiente se muestra la proyección de población dentro del acuífero por municipio. Es importante mencionar que los datos 2020, se tomaron del censo de población 2020 del INEGI, las proyecciones de 2021 a 2070, son proyecciones lineales, utilizando el método de mínimos cuadrados, para ello se consideró como base la tasa de crecimiento entre el censo de población 2015 y el censo de población 2020, lo anterior, para contar con una mayor certidumbre de la estimación.

Tabla 6.7 Proyecciones de población en el acuífero del valle de Tehuacán.

Nombre	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Ajalpan	48,599	61,187	77,035	96,988	122,109	153,736
Altepexi	22,629	28,490	35,869	45,160	56,857	71,584
Atexcal	463	583	734	924	1,163	1,465
Caltepec	3,220	4,054	5,104	6,426	8,090	10,186
Cañada Morelos	1,859	2,341	2,947	3,710	4,671	5,881
Chapulco	7,538	9,490	11,949	15,043	18,940	23,845
Coxcatlán	20,653	26,002	32,737	41,217	51,892	65,333
Coyomeapan	2,813	3,542	4,459	5,614	7,068	8,899
Juan N. Méndez	212	267	336	423	533	671

Nombre	2020	2030	2040	2050	2060	2070
Nicolás Bravo	6,578	8,282	10,427	13,128	16,528	20,809
San Antonio Cañada	5,938	7,476	9,412	11,850	14,920	18,784
San Gabriel Chilac	15,954	20,086	25,289	31,839	40,086	50,468
San José Miahuatlán	14,018	17,649	22,220	27,975	35,221	44,344
Santiago Miahuatlán	30,309	38,159	48,043	60,487	76,154	95,878
Tehuacán	327,312	412,090	518,826	653,207	822,396	1,035,406
Tepanco de López	17,997	22,658	28,527	35,916	45,219	56,931
Tlacotepec B.J.	548	690	869	1,094	1,377	1,734
Vicente Guerrero	26,293	33,103	41,677	52,472	66,063	83,174
Zapotitlán	6,274	7,899	9,945	12,521	15,764	19,847
Zinacatepec	18,359	23,114	29,101	36,639	46,128	58,076
Zoquitlán	2,440	3,072	3,868	4,869	6,131	7,719
Total	580,006	730,234	919,373	1,157,502	1,457,308	1,834,768

Fuente: Elaboración propia, con datos de INEGI.

Para el cálculo del uso consuntivo público se consideraron 200 lt-hab-día de consumo en áreas urbanas y 150 lt-hab-día en áreas rurales. En la tabla 6.8 se muestran los diferentes usos consuntivos actuales y los escenarios correspondientes. Se estima un crecimiento de hectáreas de uso agrícola en función del crecimiento poblacional. Para el caso del consumo industrial, se consideró una tasa de crecimiento constante.

Tabla 6.8 Usos consuntivos actuales y escenarios.

Descripción	2020 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2030 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2040 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)
Uso agrícola	25,287.00	201,076,498.41	26,551.35	211,130,323.33	27,878.92	221,686,839.49
Uso público urbano		40,752,671.58		51,308,087.39		64,597,478.65
Uso Industrial y otros		8,233,600.00		8,398,272.00		8,566,237.44
Total		250,062,769.98		270,836,682.72		294,850,555.58

Descripción	2050 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2070 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)
Uso agrícola	29,272.86	232,771,181.47	30,736.51	244,409,740.54
Uso público urbano		81,328,976.78		128,915,397.15
Uso Industrial y otros		8,737,562.19		8,912,313.43
Total		322,837,720.43		382,237,451.13

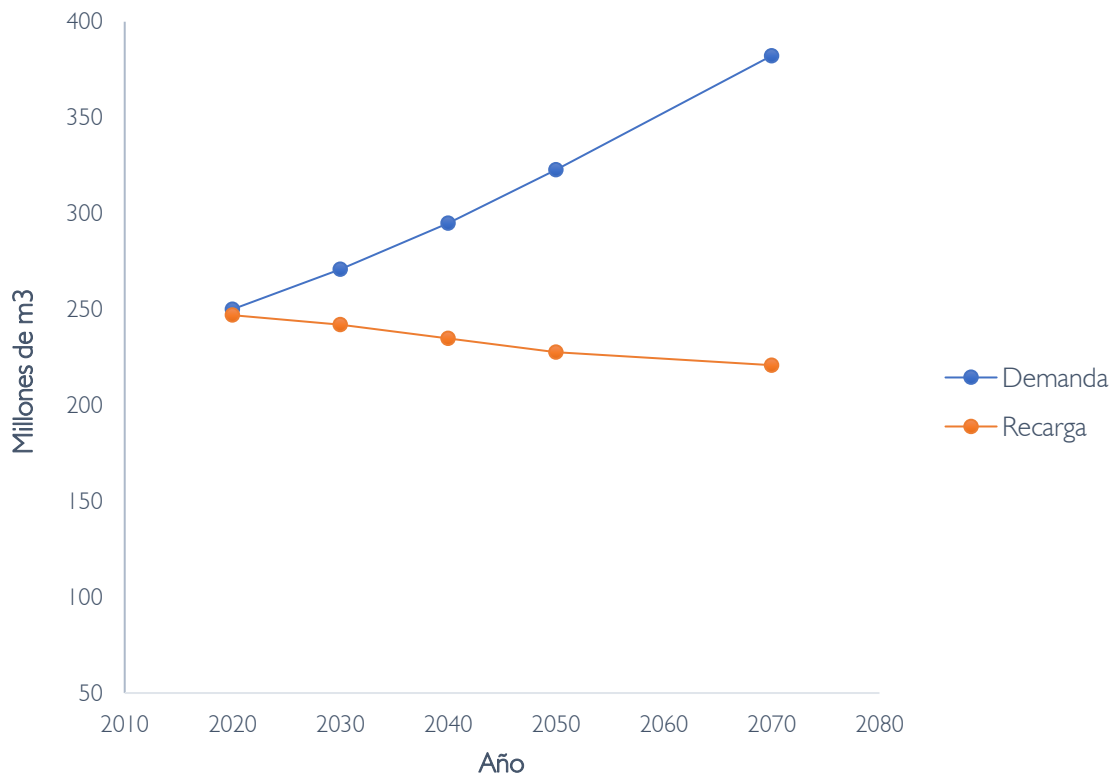
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI y SIAP, 2021.

De acuerdo con estos resultados y tomando en consideración los datos oficiales sobre la recarga, los cuales contemplan entre otras variables la recarga vertical (Rv) y la recarga horizontal (Rh), las cuales se relacionan directamente con las entradas por la infiltración de la lluvia que se precipita directamente

sobre el valle y de zonas montañosas, así como con la recarga por escorrentías que se infiltran a través de las fracturas de rocas. Además, de salidas por extracciones (B) y descargas naturales (Dn y Sh), se muestra el comportamiento de las proyecciones de recarga vs demanda.

Resulta importante mencionar que los escenarios consideran además del crecimiento poblacional, el consumo agrícola e industrial; los escenarios de cambio climático, donde las condiciones de precipitación y temperatura presentan anomalías con respecto a las normales climáticas. Por lo que se considera que la demanda sobre el uso del agua se verá afectado además por las condiciones de incremento de temperatura y olas de calor en la zona.

Gráfica 6.9 Proyección del Balance acuífero del Valle de Tehuacán, recarga vs demanda.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

De acuerdo con los resultados el acuífero se encuentra en condiciones de una mayor demanda, lo que se acrecienta a través del tiempo, propiciando un escenario donde la demanda será mucho

mayor que la recarga natural, por lo que realizar acciones de conservación resulta prioritario para el buen manejo de este.

6.14 Índice de escasez hídrica

Este índice fue construido a partir de las relaciones de presión sobre el recurso hídrico presentadas en la Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo (UN-Consejo Económico y Social, 1997), allí se propone que existe escasez de agua cuando la cantidad de agua tomada de las fuentes es tan grande que se suscitan conflictos entre el abastecimiento de agua para las necesidades humanas, las ecosistémicas, las de los sistemas de producción y las de las demandas hídricas proyectadas hacia el futuro inmediato.

La excesiva presión sobre una fuente de agua puede conducir a su desaparición, en este sentido es importante para la planificación sostenible del recurso hídrico conocer la cantidad de agua disponible, los niveles de demanda y las restricciones de uso necesarias para mantener la salud de la fuente abastecedora de agua. Esto indica, que además de ofrecer agua para el consumo humano y el abastecimiento de las actividades productivas, es necesario que las corrientes abastecedoras mantengan un remanente de agua para atender los requerimientos hídricos de los ecosistemas asociados a sus cauces, preservando así su biodiversidad, productividad y estabilidad (Domínguez, 2008).

De acuerdo con estas consideraciones el índice de escasez se establece como la relación entre la demanda de agua por parte de las actividades socioeconómicas y la oferta hídrica “neta”. La expresión de cálculo del índice de escasez en su forma porcentual es:

$$Ie = \frac{Dt}{On} \times 100\%$$

Donde:

Ie: Índice de escasez (%)

D: Demanda total de agua (m³)

On: Oferta hídrica superficial neta (m³)

En la Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo se distinguen las siguientes categorías de presión sobre el recurso hídrico:

Tabla 6.9 Categorías de presión sobre el recurso hídrico.

Categoría del índice de escasez	Porcentaje de la oferta hídrica utilizada	Color	Explicación
Alto	>40%	Rojo	Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para el ordenamiento de la oferta y la demanda. En estos casos la baja disponibilidad de agua es un factor limitador del desarrollo económico.
Medio	20-40%	Naranja	Cuando los límites de presión exigen entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica disponible es necesario el ordenamiento tanto de la oferta como de la demanda. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para garantizar que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia. Se necesitan inversiones para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos hídricos.
Moderado	10-20%	Amarillo	Indica que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo.
Bajo	< 10%	Verde	No se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico.

Fuente: Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales, 2004.

Derivado del análisis anterior y con base en el porcentaje de la oferta hídrica utilizada se presenta el índice de escases hídrica en el Acuífero del Valle de Tehuacán.

Tabla 6.10 Índice de escasez del acuífero del Valle de Tehuacán.

Año	Índice de escases hídrica	Categoría del índice
2020	-1.22	Bajo
2030	-10.63	Moderado
2040	-19.55	Moderado
2050	-27.99	Medio
2070	-40.40	Alto

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, CONAGUA y SIAP, 2021.

Conclusión

A manera de resumen, podemos concluir que el clima se considera semiseco templado en la parte central del acuífero y cambia a semiseco semicálido al sur del mismo, al extremo sur se clasifica como seco semicálido, mientras que en la parte norte hay la presencia de tres tipos de climas diferentes: templado húmedo con lluvias en verano, semicálido húmedo con lluvias todo el año y semifríos subhúmedos con lluvias en verano, por último en las partes altas de la sierra, al este y oeste, se encuentra un clima templado subhúmedo.

El principal uso del agua subterránea es el agrícola que representa el 78.0% de la extracción total, seguido del uso público urbano que corresponde al 18.2%; para el uso industrial el 3.2% y el 0.6%, para uso doméstico. Del volumen utilizado en el acuífero, 128.4 hm³/año proviene de galerías filtrantes y manantiales, y 128.9 hm³/año se extrae a partir de pozos y norias. De las mediciones piezométricas de los pozos circundantes a la zona de los manantiales 2017 – 2021 se denota un abatimiento medio anual, de 28 cm, dato consistente con lo mencionado en CONAGUA 2020, de 30 cm por año en todo el acuífero. Para las piezometrías del año 2021 de los pozos próximos a La Ciénega y comparando únicamente los pozos que cuentan con información tanto para 2017 como para 2021, se identificó que continua la tendencia de abatimiento del nivel estático, con un incremento en la profundidad de 1.146 m, lo que equivale a 0.2865 m por año.

Si bien, el acuífero se encuentra publicado en el Diario Oficial de la Federación en condición de disponibilidad positiva de 28.19882 hm³, la realidad es que ha presentado un sistemático proceso de abatimiento en la generalidad de su superficie, condición que eventualmente presenta recuperaciones locales en las zonas con mayor susceptibilidad a la recarga durante la época de lluvias. De acuerdo con los resultados de las proyecciones de demanda vs recarga, el acuífero se encuentra propenso a una mayor demanda, lo que se acrecienta de manera gradual a través del tiempo, lo que se puede corroborar a través de los resultados del índice de escasez hídrica, mismo que presenta una presión moderada para el año 2030, por lo que es importante realizar acciones que nos permitan el buen manejo de este.



7

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS A FIN RESTAURAR EL ACUÍFERO



7. Análisis de factibilidad para la aplicación de técnicas a fin restaurar el acuífero

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas, ha manifestado que el calentamiento del planeta es inequívoco (Solomon, 2007). Con esta declaración del IPCC asevera que este comportamiento se está replicando y registrando de manera diferenciada en todas las regiones del planeta, las declaraciones del IPCC se refieren al promedio de la temperatura global de todo el planeta, lo que no ocurre de manera regional, donde el comportamiento del clima se ve afectado por la configuración fisiográfica a menor escala, por esta razón, es necesario realizar estudios específicos de variabilidad climática para analizar sus impactos a nivel local.

Para el análisis del clima, se consideraron 2 escalas, la primera a nivel regional y la segunda a nivel local. El análisis regional se realiza con base a normales climatológicas y nos permite analizar el comportamiento histórico, los escenarios de cambio climático, las tendencias de extremos climáticos, así como las anomalías a corto y largo plazo. Se realizó además un análisis de tiempo de retorno a nivel regional, que nos sirve para identificar las probabilidades de ocurrencia a nivel acuífero.

Por su parte, el análisis local, se realizó para la zona cercana a los manantiales, con base en datos diarios de las cuatro estaciones más cercanas al área de los manantiales (tabla 7.8). Este análisis nos permite identificar el comportamiento del clima local, así como de los indicadores climáticos, eventos extremos y tiempos de retorno en la zona próxima al sitio de estudio.

Vale la pena mencionar que, si bien los eventos extremos se realizaron a nivel local, para el caso del análisis de huracanes, estos se realizaron a nivel regional, lo anterior debido a que este tipo de eventos requieren de un análisis a nivel mesoescalar, debido a que la presencia de estos fenómenos meteorológicos tiene influencia en superficies más amplias.

El nivel regional, muestra un análisis histórico, para responder a la pregunta ¿ha cambiado el clima?. Este se realizó mediante el cálculo de tendencia de promedios anuales y la generación de escenarios, utilizando la base de datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), para conocer las potenciales condiciones climáticas en el futuro y el análisis de extremos climáticos, para

identificar cómo y cuáles fenómenos extremos climáticos se exacerbarán por el cambio de clima y sus potenciales amenazas.

Durante el año 2018 se realizó un análisis de las variables climáticas para la Reserva de la Biosfera Tehuacán Cuicatlán. Este análisis incluye el polígono de la reserva más una zona perimetral a la misma, donde se contempla la zona de estudio. De igual manera se realizan los análisis considerando periodos largos de tiempo, ya que los periodos cortos presentan variaciones mínimas. Estos análisis se basan en las “normales climáticas”. Estas normales consisten en el promedio de los datos climatológicos (Ej. lluvias y temperaturas) calculado para un periodo consecutivo de al menos 30 años. Debido a lo anterior, el análisis realizado con antelación representa de manera fiel la variabilidad climática de la zona.

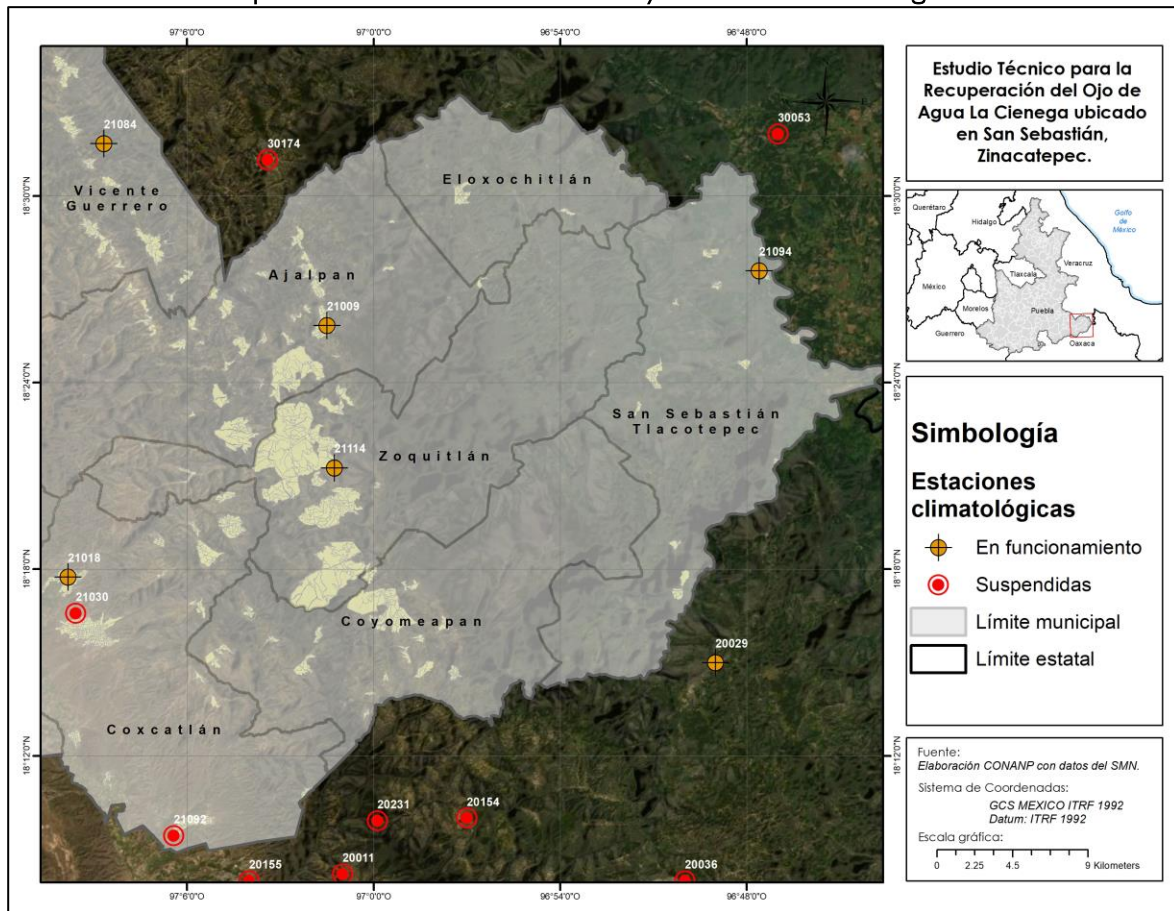
Se debe mencionar que se consideran estaciones tanto de Puebla como las colindantes con Oaxaca. Lo anterior, debido a que los fenómenos atmosféricos no respetan límites políticos y la región comparte características similares como latitud, vientos predominantes, distancia al mar, altitud y relieve, mismas que determinan el clima regional.

Otra de las situaciones es que las bases de datos de CONAGUA no son consistentes en muchas de sus estaciones climatológicas, lo que nos obliga a tomar el mayor número de estaciones cercanas a la región que cuenten con suficiencia de datos, tanto en calidad, como en largos periodos de tiempo. Considerando prudente utilizar todos los datos que abonen a tener como resultado un análisis representativo de la zona de estudio.

7.1 Análisis histórico del clima a nivel regional

Con el fin de comprender el potencial impacto del cambio climático, teniendo en cuenta que la señal de cambio de clima regional puede diferir de la señal planetaria, ya que involucra procesos regionales y locales como se ha mencionado anteriormente. Este estudio se basó en información climatológica del periodo 1951-2014, contando con información de 32 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), presentando, en esta ocasión, las estaciones cercanas al polígono. Para el control de calidad de los datos, la homogeneización de las series de tiempo y cálculo de las tendencias de extremos climáticos, el estudio se realizó con el paquete de análisis de extremos climáticos elaborado por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés), coordinado por la Comisión de Climatología de la Organización Meteorológica Mundial (CCI/OMM) (ETCCDI).

Mapa 7.1 Área de análisis climático y estaciones climatológicas.



Fuente: Elaboración CONANP con datos de SMN.

De acuerdo con el mapa anterior, se demuestra que la zona de estudio se encuentra incluida en el polígono de análisis de las variables climáticas.

Análisis climático

La Sierra Madre Oriental constituye una barrera para los vientos húmedos provenientes del Golfo de México, sus crestas de hasta 2600 m.s.n.m. forman una sombra de lluvia sobre el Valle de Tehuacán que ocasiona la desertificación. No obstante, parte de la humedad atraviesa la Sierra y decrece la precipitación pluvial progresivamente alcanzando como promedio los 400 mm anuales en la región de estudio (Hernández, 1989).

La Sierra Madre Oriental juega un papel fundamental en el clima de la Región, debido a ello se define el área de análisis climático al oriente, con la pendiente de la Sierra que desciende hacia la planicie costera del Golfo (barlovento), que presenta valores de hasta 4000 mm al año. Asimismo, el límite del área se define al sur, suroeste, poniente y norte con territorios que presentan precipitación pluvial menor a 800 mm, donde se encuentra la Región, misma que presenta promedios anuales entre 400 y 600 mm.

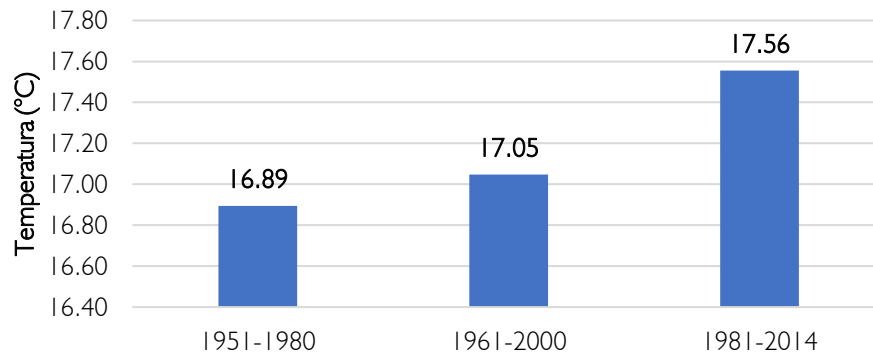
Debido a los registros de observación relativamente cortos y a la gran variabilidad climática, es necesario establecer un promedio regional para identificar cambios en las variables climáticas. El promedio espacial reduce la variabilidad en las series de datos, lo que facilita que la señal de cambio de clima se destaque (Albert, 2009), y además permite saber si la señal de cambio de los datos históricos está alineada con la señal de los escenarios futuros de cambio climático.

Se calcularon los promedios de temperatura media mensual y de precipitación pluvial anual de tres periodos: 1951 - 1980, 1961 - 2000 y 1981 - 2014. Considerando cada uno de estos periodos como normales climatológicas, se realizó un análisis de la variación del promedio de la precipitación pluvial anual y del promedio de la temperatura media anual.

Promedio de la temperatura media anual

En el periodo 1951 - 1980, la temperatura media fue de 16.89 °C, en el periodo 1961 - 2000 de 17.05 °C y en el periodo 1981 - 2014 de 17.56 °C (gráfica 7.1).

Gráfica 7.1 Promedio de la temperatura media anual en el Polígono.

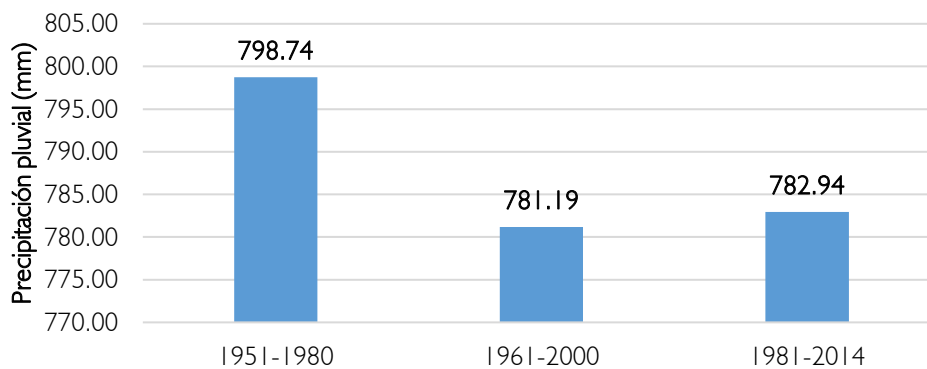


Fuente: Elaboración CONANP con datos de SMN.

Promedio de la precipitación pluvial anual

El promedio de la precipitación pluvial anual, para el periodo 1951-1980 fue de 798.74 mm, para el periodo 1961-2000 fue de 781.19 mm y para el periodo 1981-2014 de 782.94.

Gráfica 7.2 Promedio histórico de la precipitación pluvial en el Polígono.



Fuente: Elaboración CONANP con datos de SMN.

De acuerdo con los resultados anteriores, se concluye que el clima presenta una tendencia a ser más seco y caluroso, aumentando los problemas en materia ambiental, como son: menor precipitación pluvial que incide en menor humedad en el suelo, pérdidas de bosque, incendios forestales, escasez de agua, mayor frecuencia de sequías y efectos severos en la agricultura.

7.1.1 Generación de escenarios y ventanas climáticas

Este estudio se basó en los escenarios publicados por el INECC denominados REA en 2013 con el título de: “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”, este modelo genera dos ventanas de tiempo 2015-2039 y 2075-2099 (INECC, 2013). En esta sección se calcularon los promedios de los diferentes escenarios futuros con sus ventanas de tiempo en el Polígono, para corroborar que la señal de cambio climático observada esté alineada con los escenarios futuros.

Escenarios futuros de temperatura media

En el Quinto Informe del IPCC se definieron escenarios con base en la generación de emisiones, conocidos como Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m² para el año 2100.

Tabla 7.1 Generación de emisiones.

RCP	Forzamiento Radiativo (FR)	Tendencia del (FR)	(CO ₂) en 2100
RCP 2.6	2.6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP 4.5	4.5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP 6.0	6.0 W/m ²	Creciente	670 ppm
RCP 8.5	8.5 W/m ²	Creciente	936 ppm

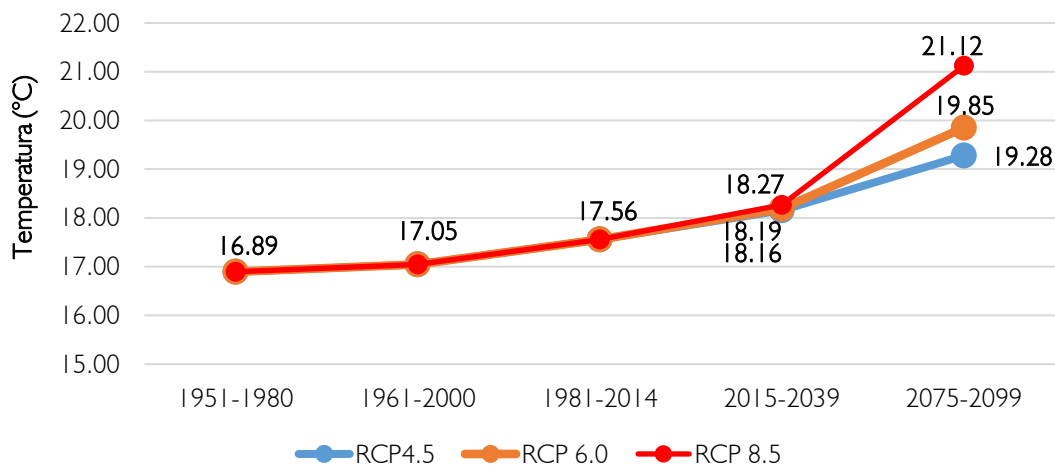
Fuente: Quinto Informe IPCC, 2014.

Los escenarios con base en políticas de mayor mitigación consideran a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización son (RCP 4.5 y RCP 6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones (RCP8.5).

Derivado de lo anterior, se espera que la temperatura media anual para finales de siglo sea de 21.12 °C en el escenario RCP 8.5, de 19.85 °C en el escenario RCP6.0 y de 19.28 °C en el RCP 4.5, lo que representa un aumento de 4.23 °C, 2.96 °C y 2.39 °C respectivamente, con relación al periodo 1951-1980. Cabe resaltar que, tanto en el análisis histórico como en los escenarios, existe una

tendencia ascendente de la temperatura, que corrobora que el comportamiento histórico está alineado en cierta medida con el comportamiento de los escenarios de cambio climático.

Gráfica 7.3 Temperatura media anual.

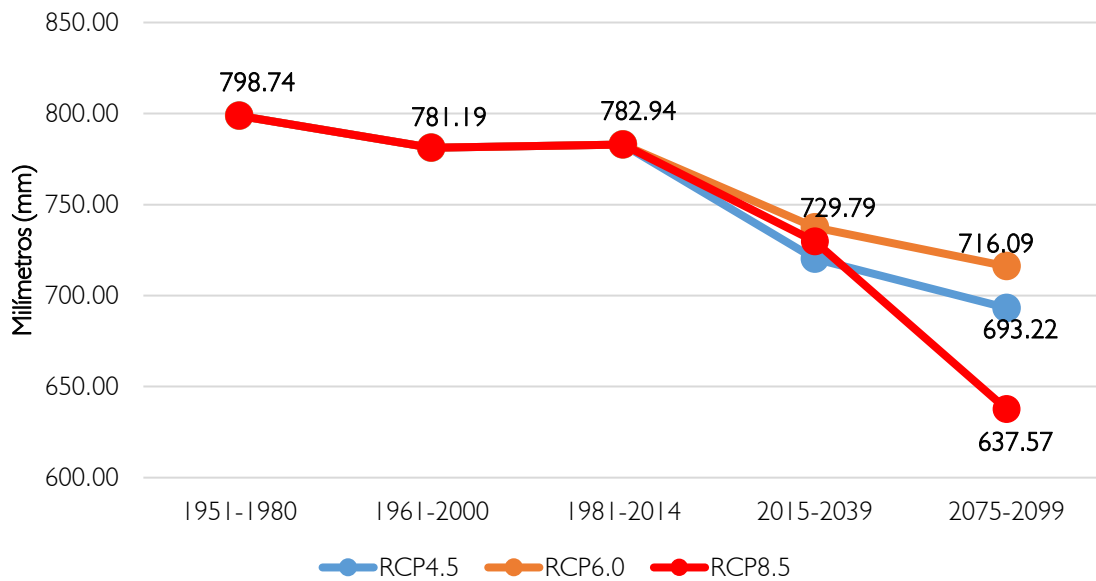


Fuente: Elaboración CONANP con datos de INECC.

Escenarios futuros de la precipitación pluvial media

Para la precipitación se observa que para finales de siglo el escenario RCP8.5 registra 637.57 mm y el escenario RCP4.5 de 693.22 mm, representando una disminución con base al periodo 1951-1980 del 20.17% y 13.21% respectivamente.

Gráfica 7.4 Precipitación pluvial media anual.



Fuente: Elaboración CONANP con datos de INECC.

En el caso de la temperatura, los datos históricos están alineados con los escenarios de cambio climático. Sin embargo, en la precipitación pluvial no se percibe una alineación entre los datos históricos y los escenarios de cambio climático, esto se debe en parte al aumento de la actividad ciclónica en los últimos diez años en la región de estudio. Hay que considerar que, para los escenarios de cambio climático, el comportamiento de ciclones tropicales tiene un nivel de confianza bajo (IPCC, 2013).

Por lo anterior, se concluye que la precipitación pluvial en el futuro tiene una incertidumbre muy alta en la región. No obstante, los modelos del IPCC utilizados indican una tendencia a la baja para finales de siglo de hasta 161 mm, lo que representa una reducción del 20% del volumen de agua con referencia al periodo 1951 - 1980.

Si **temperatura y precipitación** se analizan desde la perspectiva sinérgica, se infiere que esta región tendrá un potencial incremento de estrés hídrico y sequía, poniendo en grave riesgo la sobrevivencia de especies y servicios ecosistémicos asociados.

Tabla 7.2 Escenarios de anomalía de temperatura y precipitación para la microrregión sierra negra.

Microrregión	Municipios pertenecientes a la Región
Tehuacán - Sierra Negra	Ajalpan, Coxcatlán, Coyomeapan, San Gabriel Chilac, Santiago Miahuatlán, San José Miahuatlán y Zinacatepec.

Fuente: Elaboración CONANP con datos INECC.

Se presentan las anomalías de temperatura y precipitación para la región Tehuacán Sierra Negra, zona donde se encuentra el polígono de estudio. Para el caso de los escenarios, el modelo utilizado, se enfoca en el corto y largo plazo, considerando como línea base el periodo 1961 – 2000, mismo que se muestran a continuación.

Tabla 7.3 Aumento de la temperatura media anual (°C).

Escenarios	Tehuacán Sierra Negra
RCP4.5_2015_2039	+0.9
RCP6.0_2015_2039	+1.23
RCP8.5_2015_2039	+1.32
RCP4.5_2075_2099	+2.35
RCP6.0_2075_2099	+2.95
RCP8.5_2075_2099	+4.45

Fuente: Elaboración CONANP con datos INECC.

Tabla 7.4 Porcentaje de disminución de la precipitación.

Escenarios	Tehuacán Sierra Negra
RCP4.5_2015_2039	18.2
RCP6.0_2015_2039	11
RCP8.5_2015_2039	17
RCP4.5_2075_2099	26
RCP6.0_2075_2099	14.6
RCP8.5_2075_2099	41.9

Fuente: Elaboración CONANP con datos INECC.

Para el caso de la temperatura media anual, el escenario RCP8.5_2075_2099 presenta un aumento de la temperatura media anual de 4.45 grados por arriba de la media y una disminución de un 41.9% con respecto a la precipitación actual.

De acuerdo con los escenarios, la región Tehuacán Sierra Negra presentará aumento de temperatura y un mayor porcentaje de disminución de precipitación con respecto a otras microrregiones de la zona.

Prospectiva de extremos climáticos

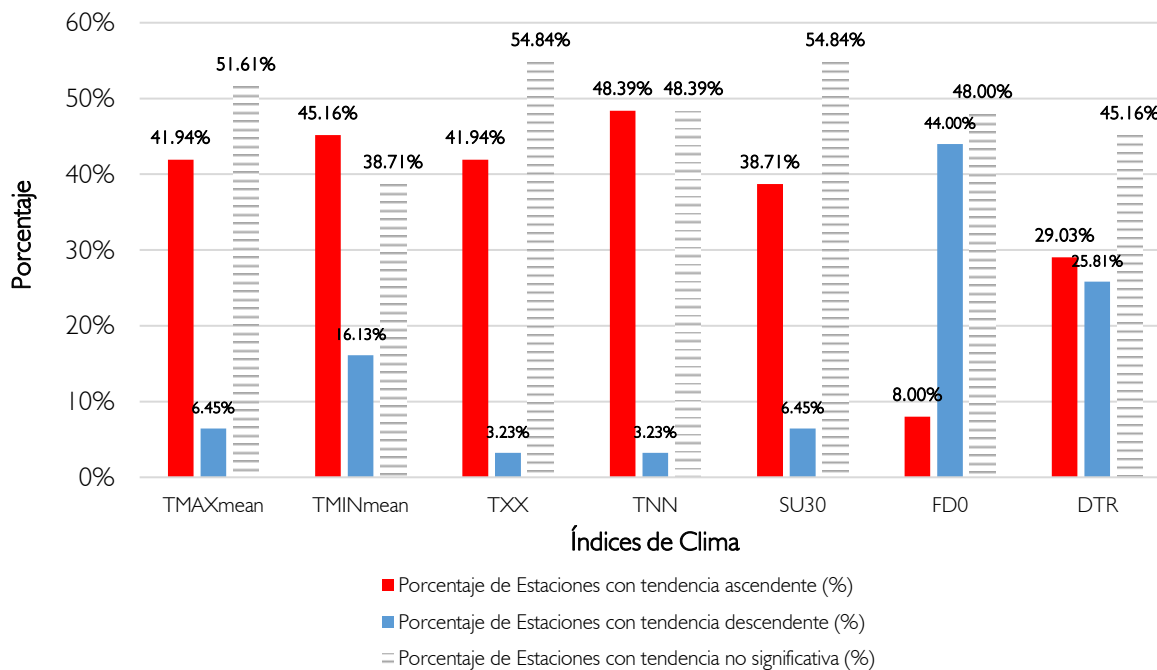
Aumentarán los impactos por fenómenos meteorológicos extremos

En todas las escalas de tiempo el clima varía de forma natural, estas fluctuaciones se superponen a una posible tendencia de cambio climático a largo plazo, la detección de la señal de cambio climático requiere de la aplicación de métodos estadísticos que permitan distinguirla del ruido climático (Albert, 2009). Con el análisis de extremos climáticos se pretende dar una respuesta a la pregunta de si el clima de la Región ha variado significativamente a lo largo del periodo 1951-2014.

Extremos climáticos relacionados con la temperatura

La tendencia de los índices de cambio climático relacionados con la temperatura es ascendente, excepto para el índice FDO (número de días con helada al año).

Gráfica 7.5 Porcentaje de tendencia de extremos climáticos relacionados con la Temperatura en estaciones climáticas.



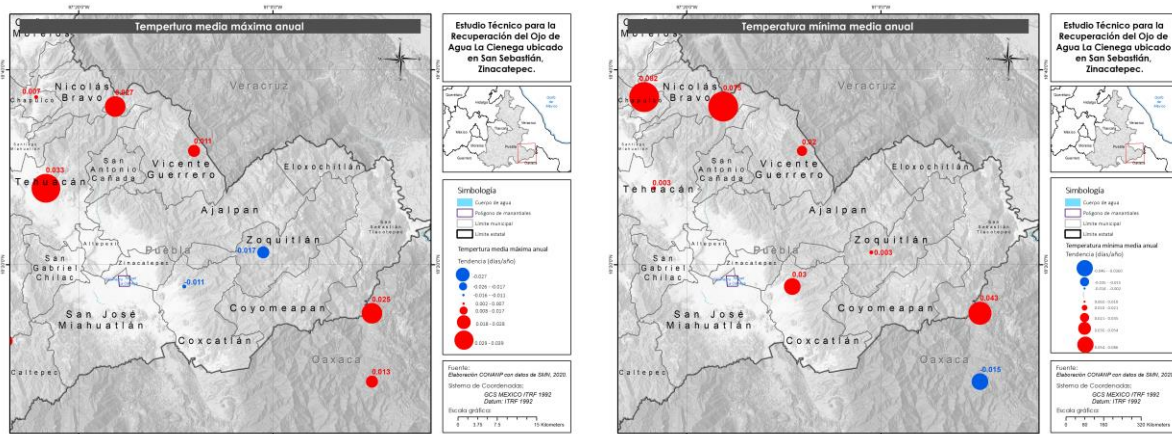
Clave: TMAXmean.-Temperatura máxima media anual, TMINmean.- Temperatura mínima media anual, TXX.- Temperatura máxima extrema, TNN.-Temperatura mínima extrema, SU30.-Días con temperaturas mayores a los 30 °C, FDO.- Días con helada, DTR.- Oscilación térmica media anual.

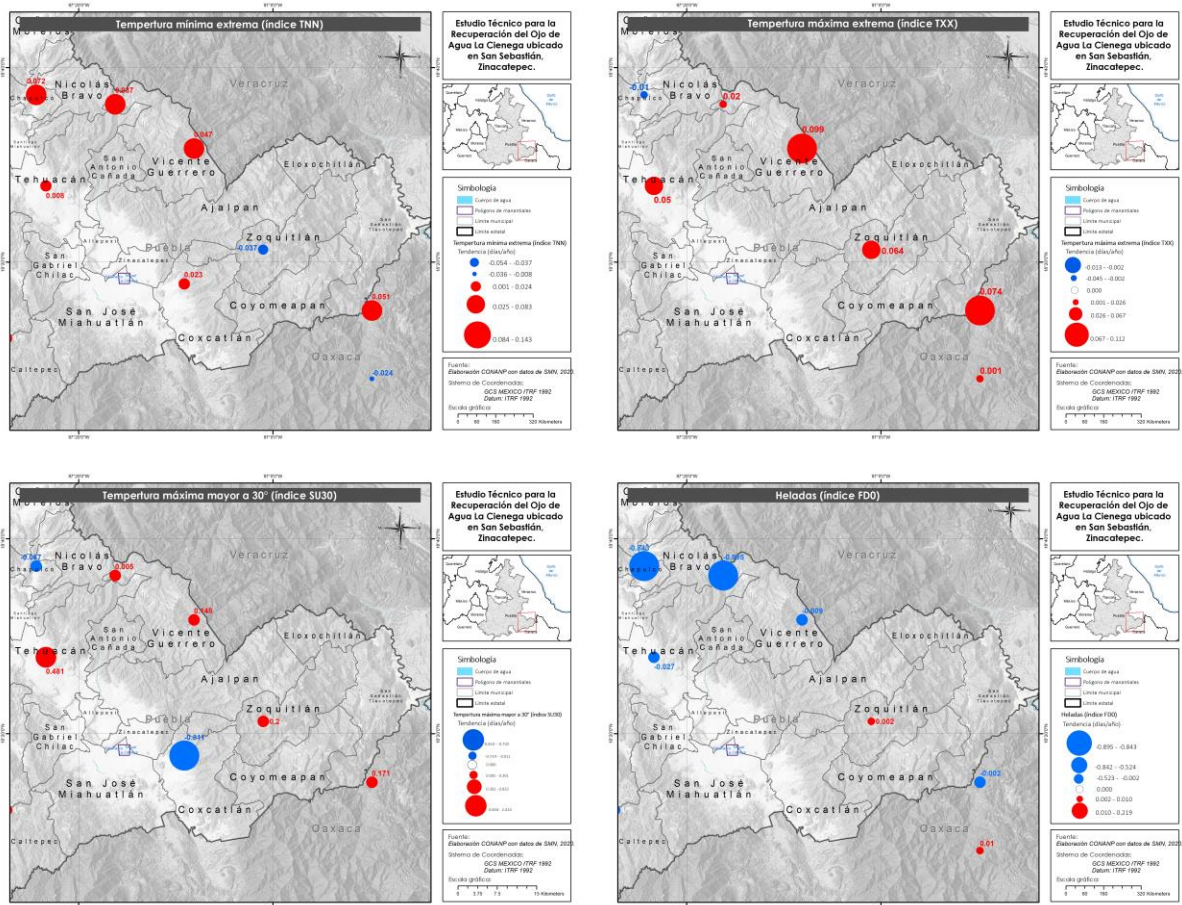
Fuente: Elaboración CONANP con datos de SMN.

En la gráfica 7.5 se presentan el porcentaje (%) de estaciones con tendencias significativas ascendentes, descendentes y no significativas. Una tendencia ascendente significa que los valores promedio de los índices van en aumento, la tendencia descendiente significa que los valores promedio de los índices van a la baja y tendencia no significativa, que no se observa una variación en los valores de los índices. Lo que podemos observar en está gráfica es que un porcentaje elevado de estaciones presentan tendencia a incremento, como es el caso de las temperaturas máximas y mínimas. Así como un decremento marcado en los días con heladas. Esto en conjunto indica que la temperatura se está incrementando paulatinamente en la mayor parte de la zona de estudio.

En el mapa 7.2 se presentan las tendencias de extremos climáticos relacionados con la temperatura, el tamaño de los círculos es proporcional al valor de la tendencia, el color rojo representa tendencia significativa ascendente y el color azul tendencia significativa descendente. Debido a lo anterior, el estrés hídrico y las olas de calor tenderán a aumentar bajo cambio climático.

Mapa 7.2 Tendencias de extremos climáticos relacionados con la temperatura.





Fuente: Elaboración CONANP con datos de SMN.

Extremos climáticos relacionados con la precipitación pluvial

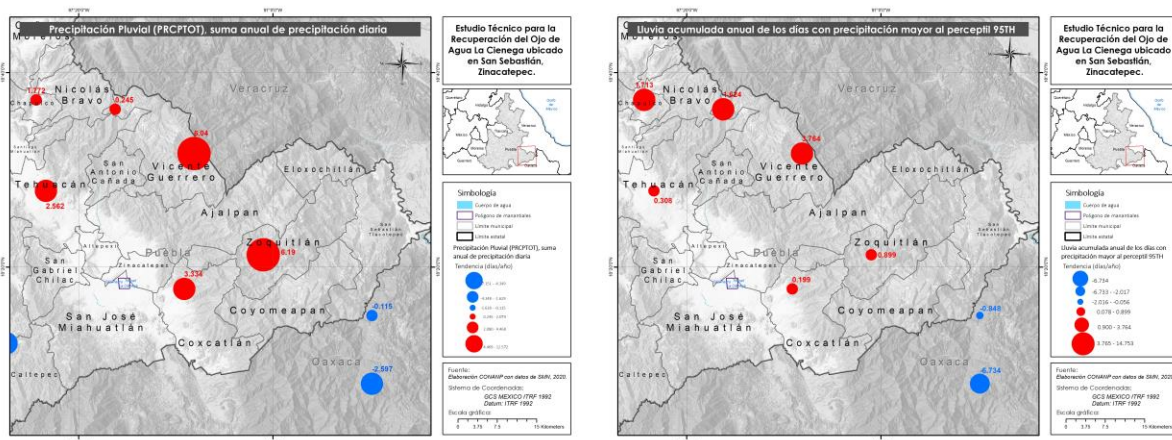
En el índice R95pTOT (lluvia acumulada anual de los días con precipitación pluvial mayor al percentil 95°) el 25% de las estaciones tiene tendencia significativa ascendente (mapa 7.3). La tendencia ascendente representa el aumento de los días con lluvias intensas que pueden ocasionar inundaciones y lo que es peor, deslaves; por el valor de la tendencia, la amenaza es mayor en la microrregión de Tehuacán Sierra Negra y en la parte alta del bosque templado.

En el mapa 7.3 se presentan las tendencias de los extremos climáticos relacionados con la precipitación pluvial, el tamaño de los círculos es proporcional al valor de la tendencia, el color rojo representa tendencia significativa ascendente y el color azul tendencia significativa descendente. Analizando la distribución espacial de las tendencias significativas de los índices, CDD (días secos

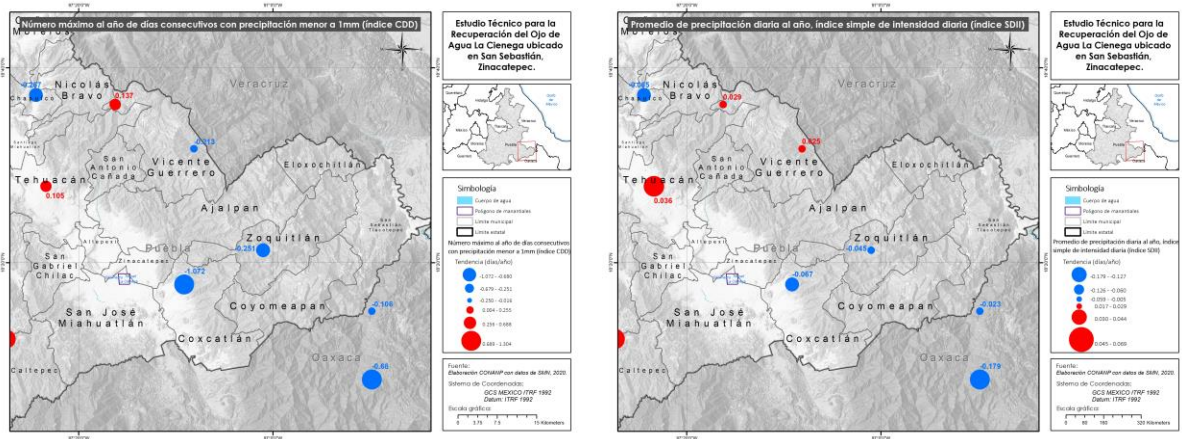
consecutivos), SDII (índice simple de intensidad diaria) y PRCPTOT (lluvia total anual), se concluye que, en condiciones de clima, las sequías serán más intensas y frecuentes.

En algunas estaciones climatológicas la tendencia de la precipitación total anual es ascendente. Sin embargo, considerando que las tendencias de los índices TXX (temperatura máxima extrema) y SU30 (número de días al año con temperatura mayor a 30 °C), son ascendentes, la disponibilidad de agua podría disminuir, teniendo en cuenta que un aumento de la temperatura conduce a una mayor evapotranspiración, por lo que los escurrimientos e infiltraciones disminuirían. Esto generaría efectos negativos sobre los ecosistemas, los objetos de conservación socio ambiental y las actividades productivas, lo que incrementaría la presión sobre los recursos naturales. El análisis climático anterior, nos indica la necesidad de implementar acciones de recuperación y de conservación de la zona de estudio, lo anterior, a que debido a las proyecciones climáticas se presentará una reducción de la precipitación, lo que se traduce en una menor recarga del acuífero en cuestión. Esto aunado a que se espera un aumento de la temperatura promedio, lo cual incrementará la demanda del vital líquido.

Mapa 7.3 Tendencias de los extremos climáticos relacionados con la precipitación pluvial.



Mapa 7.3 Tendencias de los extremos climáticos relacionados con la precipitación pluvial.



Fuente: Elaboración CONANP con datos de SMN.

7.1.2 Tiempos de retorno a nivel regional

Precipitación Media

De acuerdo con la gráfica 7.2 se determina la precipitación media anual de la zona durante el periodo:

Tabla 7.5 Precipitación media anual de la zona.

1951-1980	1961-2000	1981-2014
798.74	781.19	782.94

Fuente: CONANP.

Por lo que la precipitación media anual 1951-2014 es de 787.62.

Es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Esta tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de este se calculan utilizando relaciones precipitación – escurrimiento o bien tránsito de avenidas (Campos-Aranda, 1992).

Como sabemos, la lluvia es definida por tres variables: magnitud (lámina de lluvia), duración (horas, días) y frecuencia (periodo de retorno). Las curvas P – D - Tr (Precipitación – Duración -Periodo de Retorno) concentran estas tres características de las tormentas en la cuenca estudiada.

La construcción de las curvas P- D- Tr a partir de los registros de lluvia máxima se realiza de la siguiente manera:

- 1) Se seleccionan los periodos de retorno que tendrían cada una de las curvas.
- 2) Se calculan los volúmenes representativos de la lluvia máxima en 24 horas para los periodos de retorno, incluyendo el $Tr = 2$ años.
- 3) Se calcula la lluvia en una hora y $Tr = 2$ años.

Con el propósito de uniformizar las curvas P- D- Tr y reducir la dispersión, se acostumbra a representarlas en su forma de curvas Intensidad- Duración- Periodo (I-D-Tr) de retorno.

Método de Bell

Bell combinó las relaciones duración- lluvia y los cocientes frecuencia-lluvia, así, llegó a una relación general de Precipitación- Duración-Periodo de retorno.

$$P_d^{Tr} = [0.21 \ln Tr + 0.52] * [0.54d^{0.25} - 0.5] * P_{10}^{60}$$

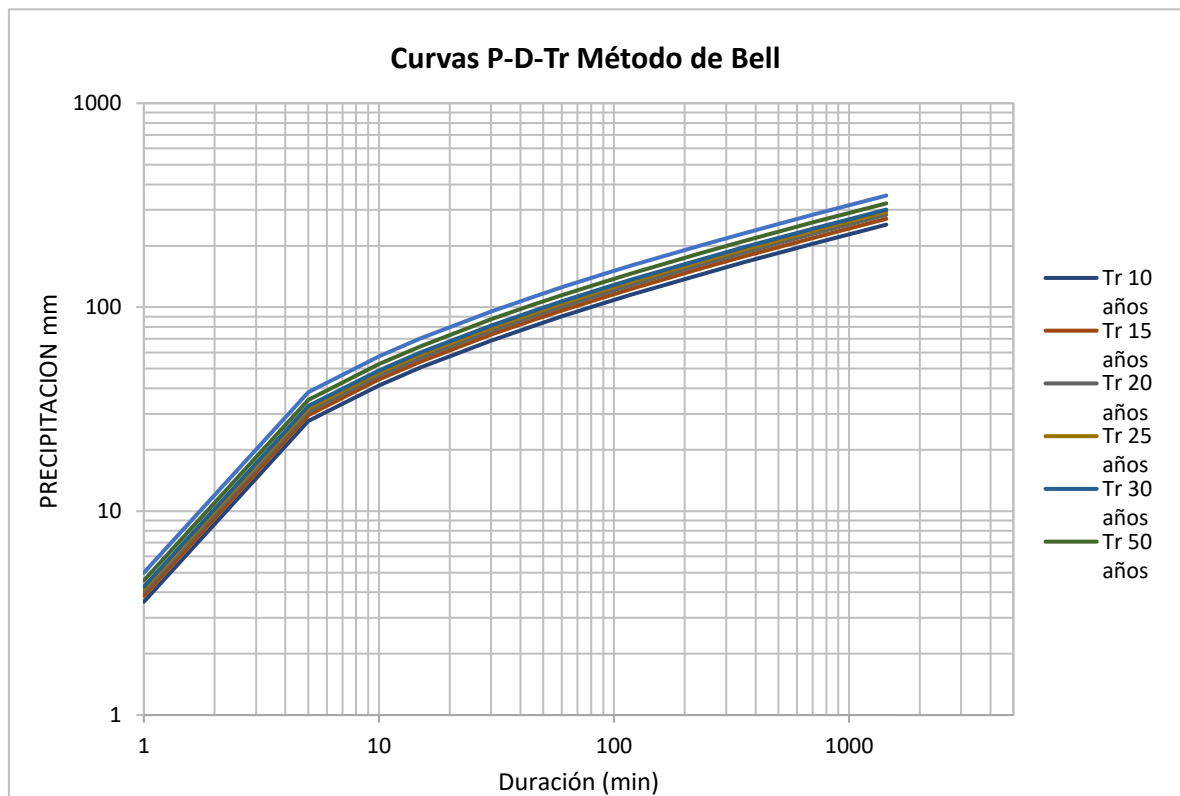
Tabla 7.6 Precipitación-duración-periodo de retorno.

d min Tr años	Precipitación en mm						
	10	15	20	25	30	50	100
1	4.5	4.9	5.2	5.5	5.6	6.2	6.9
5	34.8	37.9	40.2	41.9	43.3	47.3	52.7
10	52.1	56.8	60.1	62.7	64.8	70.8	78.9
15	63.6	69.4	73.5	76.7	79.3	86.5	96.4
30	86.4	94.2	99.8	104.1	107.6	117.5	130.8
45	101.6	110.8	117.4	122.5	126.6	138.2	153.9
60	113.4	123.7	131.0	136.7	141.3	154.2	171.8
90	131.6	143.5	152.0	158.5	163.9	178.9	199.3
120	145.6	158.8	168.2	175.4	181.3	198.0	220.5
240	183.8	200.5	212.3	221.5	229.0	250.0	278.5
360	209.5	228.5	241.9	252.4	260.9	284.9	317.3
720	259.8	283.4	300.1	313.0	323.6	353.3	393.6
1440	319.7	348.7	369.2	385.2	398.2	434.7	484.2

d min: Duración en minutos.

Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

Gráfica 7.6 Curvas P – D – Tr por el método de Bell.



Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

La gráfica 7.6 refleja la conjugación de los resultados de las curvas de precipitación, duración y periodo de retorno.

En la tabla 7.6 se pueden apreciar las intensidades que puede alcanzar un evento de lluvia, en distintos intervalos de tiempo y periodos de retorno. Sin olvidar, que conforme el periodo de retorno sea mayor, la probabilidad de ocurrencia es menor.

Así, por ejemplo, si se escoge el primer resultado de la tabla, se interpreta que la lámina de lluvia puede alcanzar los 4.5 milímetros de altura (4.5 litros por metro cuadrado) durante el primer minuto de la tormenta, con un periodo de retorno de 10 años; esto quiere decir, que se tiene un 10% de probabilidad anual de ocurrencia. Con igual % de probabilidad en 10 años, puede presentarse una lluvia de 34.8 milímetros de altura (34.8 litros por metro cuadrado) durante los primeros 5 minutos.

A partir de investigaciones basadas en esta metodología, se ha deducido la misma ecuación para emplear la precipitación con duración de una hora y periodo de retorno de 2 años.

$$P_d^{Tr} = [0.35 \ln Tr + 0.76] * [0.54d^{0.25} - 0.5] * P_1^2$$

De la cual, se obtiene la intensidad de lluvia con la siguiente ecuación:

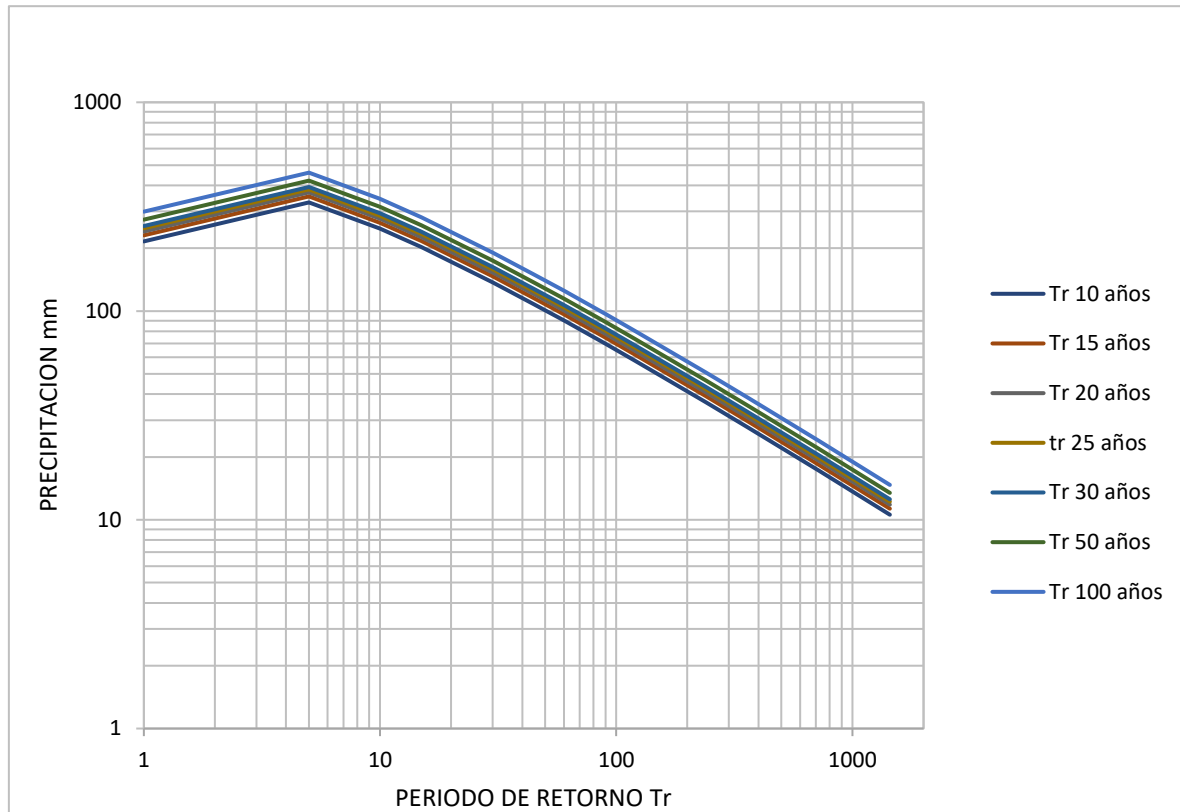
$$i = \frac{60P}{d}$$

Tabla 7.7 Intensidades máximas de lluvia a diferentes tiempos de retorno.

d,min Tr años	Intensidades máximas en mm/h para Tr						
	10	15	20	25	30	50	100
1	215.6	230.3	240.8	248.9	255.6	274.2	299.4
5	331.4	354.1	370.2	382.7	392.9	421.5	460.3
10	248.1	265.0	277.1	286.4	294.1	315.5	344.5
15	202.2	216.0	225.9	233.5	239.7	257.1	280.8
30	137.2	146.6	153.3	158.4	162.7	174.5	190.6
45	107.6	115.0	120.2	124.3	127.6	136.9	149.5
60	90.1	96.3	100.6	104.0	106.8	114.6	125.1
90	69.7	74.4	77.8	80.4	82.6	88.6	96.7
120	57.8	61.8	64.6	66.8	68.5	73.5	80.3
240	36.5	39.0	40.8	42.1	43.3	46.4	50.7
360	27.7	29.6	31.0	32.0	32.9	35.3	38.5
720	17.2	18.4	19.2	19.9	20.4	21.9	23.9
1440	10.6	11.3	11.8	12.2	12.5	13.5	14.7

Fuente: Elaboración propia con datos del SMN.

Gráfica 7.7 Curvas I – D – Tr por el método de Bell.



Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

En la gráfica 7.7 se muestran las intensidades máximas esperadas en mm por hora para los diferentes Tr. Lo que podemos observar es que existe la probabilidad de lluvias intensas en la zona, identificando que en un tiempo de 30 min pueden presentarse eventos con láminas de lluvia similares a las máximas detectadas, como es el caso de tiempos de retorno de 25 a 30 años. Lo importante es considerar que la zona presenta un suelo sin cubierta vegetal, lo que impide una buena infiltración y al mismo tiempo propicia el escurrimiento de azolve de la periferia hacia la zona de manantiales.

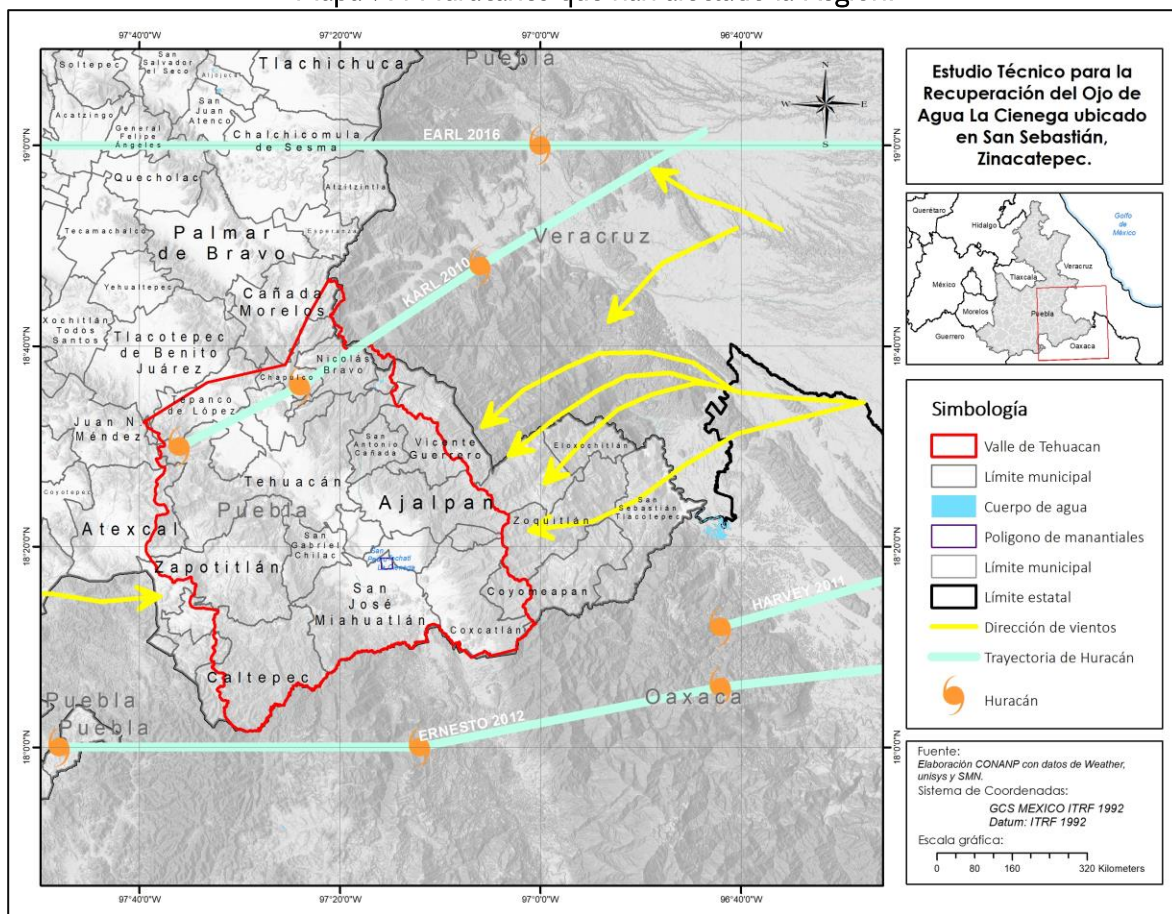
7.1.3 Impacto de los huracanes

Uno de los fenómenos que es menos frecuente en la Región son los ciclones tropicales (huracanes), eventos hidrometeorológicos extremos que se generan en el Mar Caribe y penetran en el Golfo de México entre los meses de junio a septiembre, los cuales son precursores de eventos

hidrometeorológicos extremos y repercuten en impactos sociales negativos. De 1950 a 2016, el polígono ha sido afectado por seis huracanes.

Para este análisis se tomarán bases de datos de 1950 a 1996 de Weather Unisys (Weather) y del SMN (1997-2016). Lo anterior, nos permite contar con un historial más robusto que si sólo nos basamos en los datos del SMN. Con este historial, podemos visualizar en la gráfica 7.8 que, si bien no es frecuente la presencia de huracanes, la probabilidad de que se presenten es mucho mayor en las últimas décadas.

Mapa 7.4 Huracanes que han afectado la Región.



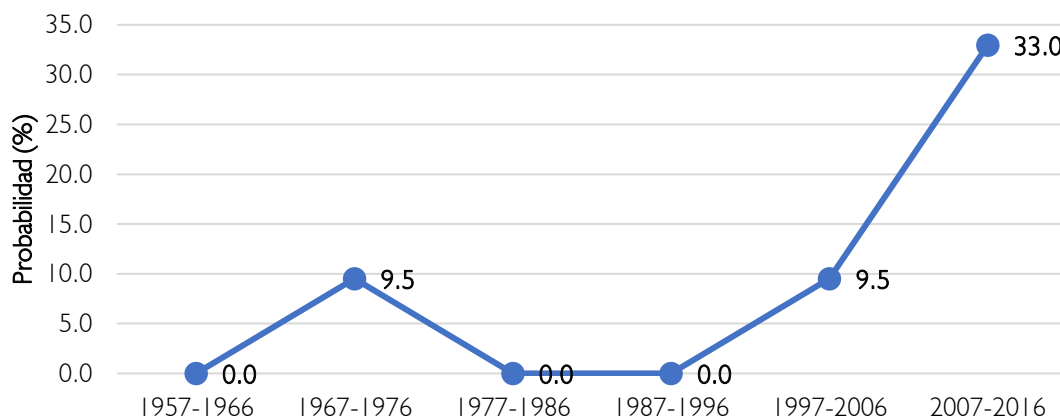
Fuente: Elaboración CONANP con datos de Weather, unisys y SMN.

Si la ocurrencia de huracanes que afectan la Región se considera como un evento independiente que ocurre aleatoriamente en el tiempo, es posible generar un estudio estadístico usando la distribución

de Poisson para calcular por cada diez años la probabilidad de que la región sea nuevamente impactada al menos por un huracán en un año (OMM-Nº100, 2011).

En la siguiente gráfica 7.8 se presenta el comportamiento de la probabilidad por década, correspondiente a los periodos 1997-2006 y 2007-2016, donde la probabilidad ha aumentado de 9.5% a 33% con base a la función de frecuencia de Poisson, información necesaria para el análisis de riesgo.

Gráfica 7.8 Probabilidad por década de que al menos un Huracán afecte la región en un año.



Fuente: Elaboración CONANP con datos de Weather unisys y SMN.

7.2 Análisis climático local

Este análisis se desarrolló con la información de las cuatro estaciones climatológicas administradas por el SMN (Servicio Meteorológico Nacional) más cercanas a la zona de manantiales, en operación y que cumplen con el criterio de suficiencia de datos. La estación de Calipan se localiza a 9.67 km al SSE de la zona de estudio, la estación de Zapotitlán a 23.49 km al NNW, la estación de Caltepec a 24.16 km al NE y la estación de Tehuacán a 22.53 km al NO. La altitud de las estaciones varía de 1131 msnm a 2275 msnm, Zapotitlán es la estación que cuenta con más registros climatológicos (ver tabla 7.8).

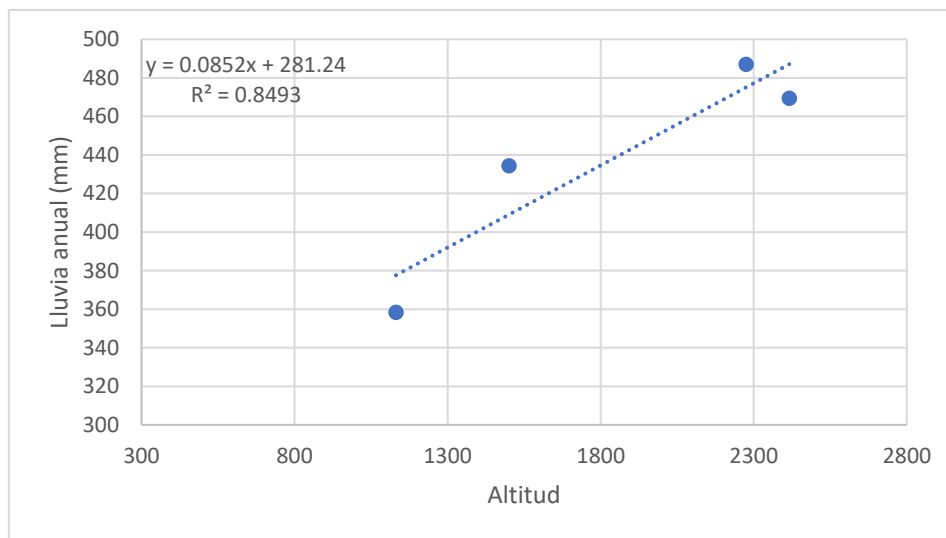
Tabla 7.8. Estaciones climatológicas consideradas para el análisis local.

Estación	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnm)	Periodo	Años completos
Caltepec	18.203°	-97.453°	2275	1954-2019	50
Tehuacán	18.464°	-97.393°	2416	1960-2019	50
Calipan	18.296 °	-97.164 °	1131	1963-2019	48
Zapotitlán	18.332°	-97.474°	1500	1951-2019	60

Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

Anualmente se acumulan 486.9 mm de lluvia en la estación de Caltepec, 469.3 mm en la de Tehuacán, 358.3 en la de Calipan y 434.3 en la estación climatológica de Zapotitlán. Considerando la lluvia anual y la altitud de solo de estas cuatro estaciones, se aprecia una relación directamente proporcional de la lluvia con la altitud, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.8493$, ver gráfica 7.9.

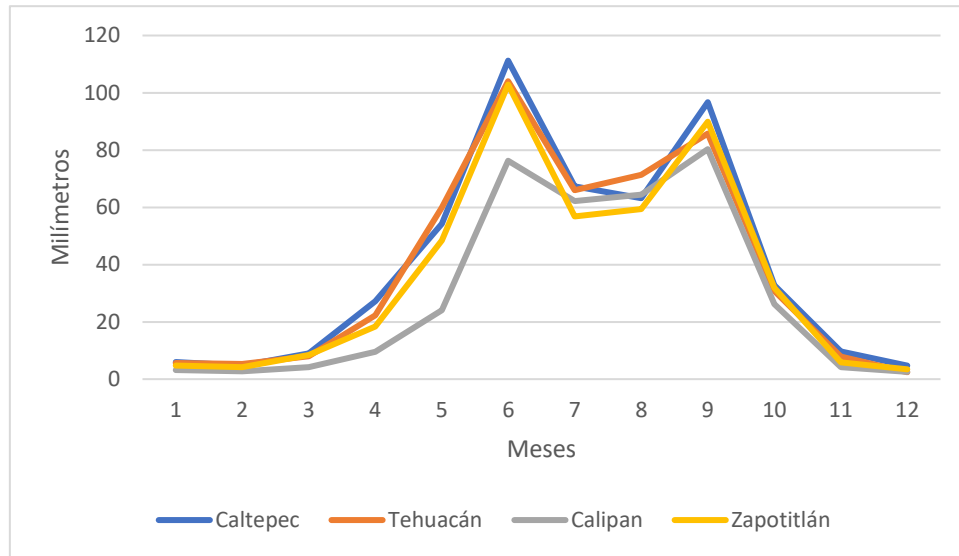
Gráfica 7.9. Relación lluvia anual – altitud.



Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

La marcha anual de la lluvia es similar para las cuatro estaciones, las lluvias se inician en mayo y terminan en octubre con un máximo en el mes de junio en las estaciones de Caltepec, Tehuacán y Zapotitlán, en la estación de Calipan el máximo se registra en el mes de septiembre. En las cuatro estaciones se tiene una disminución de la precipitación pluvial en los meses de julio, que representa la canícula. Ver gráfica 7.10.

Gráfica 7.10. Marcha anual de precipitación pluvial.



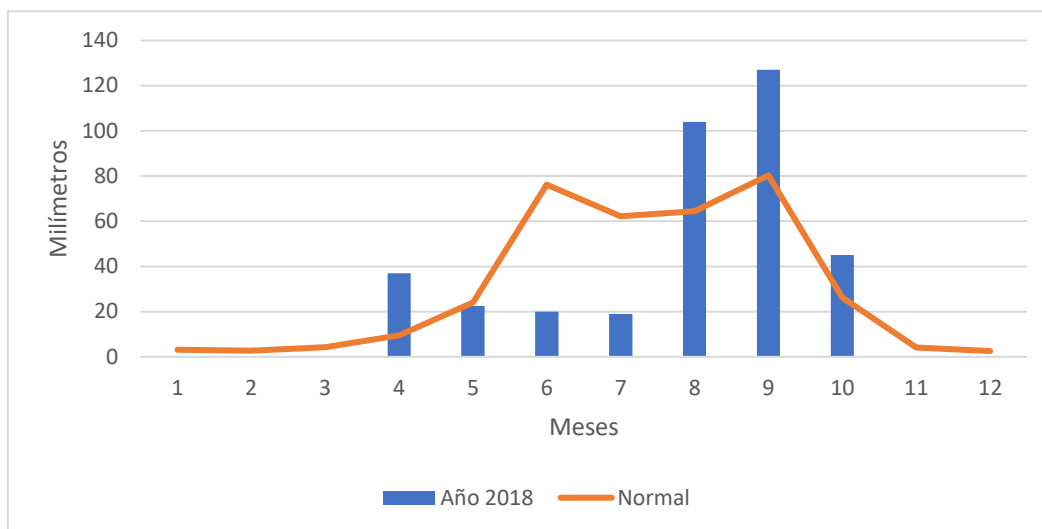
Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

En los meses de la canícula suele registrarse una sequía que agrava las condiciones de falta de agua con resultados catastróficos para la comunidad, es el caso de julio de 2018, citamos a continuación el boletín del SMN para proporcionar un panorama más completo.

En el mes de julio, los sistemas semipermanentes de alta presión de Las Azores y del Pacífico favorecieron una canícula intensa en casi todo el país, sin la presencia de ciclones tropicales cercanos a las costas mexicanas y el ingreso de ondas tropicales poco activas al país, además el predominio de sistemas de alta presión que ocasionaron tiempo estable y temperaturas del mar por debajo del promedio en el Atlántico tropical, fueron entre otros factores los causantes de que en julio de 2018 lloviera apenas 83.8 mm a nivel nacional, que representa el 59.8% del valor promedio (1941-2017). El mes de julio se clasificó como el julio menos lluvioso o más seco observado desde 1941. Los mayores déficits, se observaron en el centro y sur del país, donde: Chiapas (con el 43.4% del valor promedio), Guerrero (42.6% del valor promedio), Oaxaca (32.6%) y Puebla (38.1% del valor promedio) registraran su julio más seco o menos lluvioso desde 1941.

En el mes de agosto persistió la disminución de las lluvias en el noreste, regiones del centro, sur y sureste del país debido a la canícula o sequía de medio verano. SMN julio de 2018.

Gráfica 7.11. Estación de Calipan, sequía de 2018.



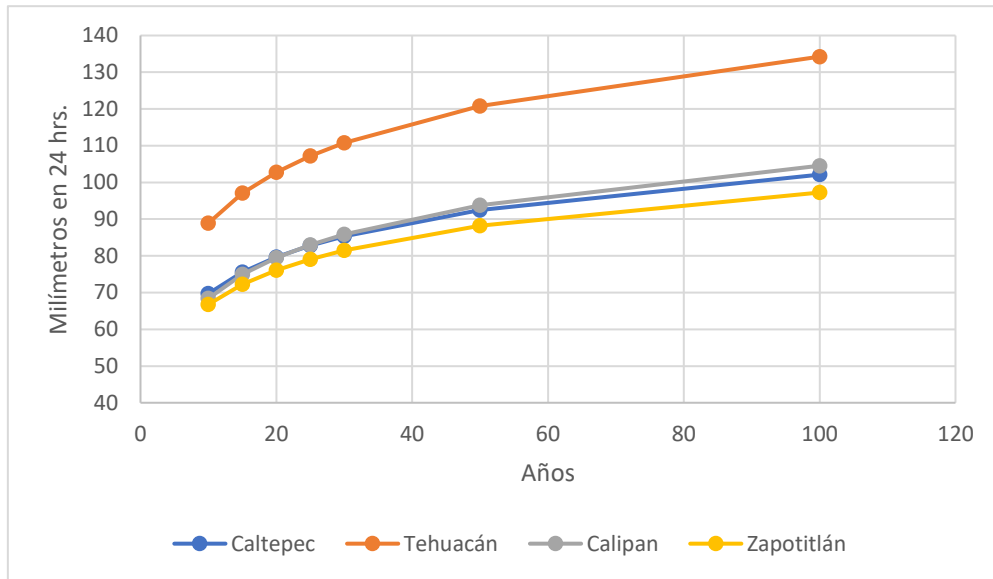
Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

En la estación de Calipan en el mes de junio se registró el 26% de lo normal y en el mes de julio el 30%, los días de 23, 24 y 25 de julio la temperatura fue de 29°C.

7.2.1 Tiempos de retorno a nivel local

Se calcularon los periodos de retorno para las cuatro estaciones basándonos en el método de Gumbel, para la estación de Tehuacán cada cien años se registra en promedio una lluvia máxima en 24 horas mayor o igual a 134 mm. Ver gráfica 7.12.

Gráfica 7.12. Periodos de retorno para las 4 estaciones.



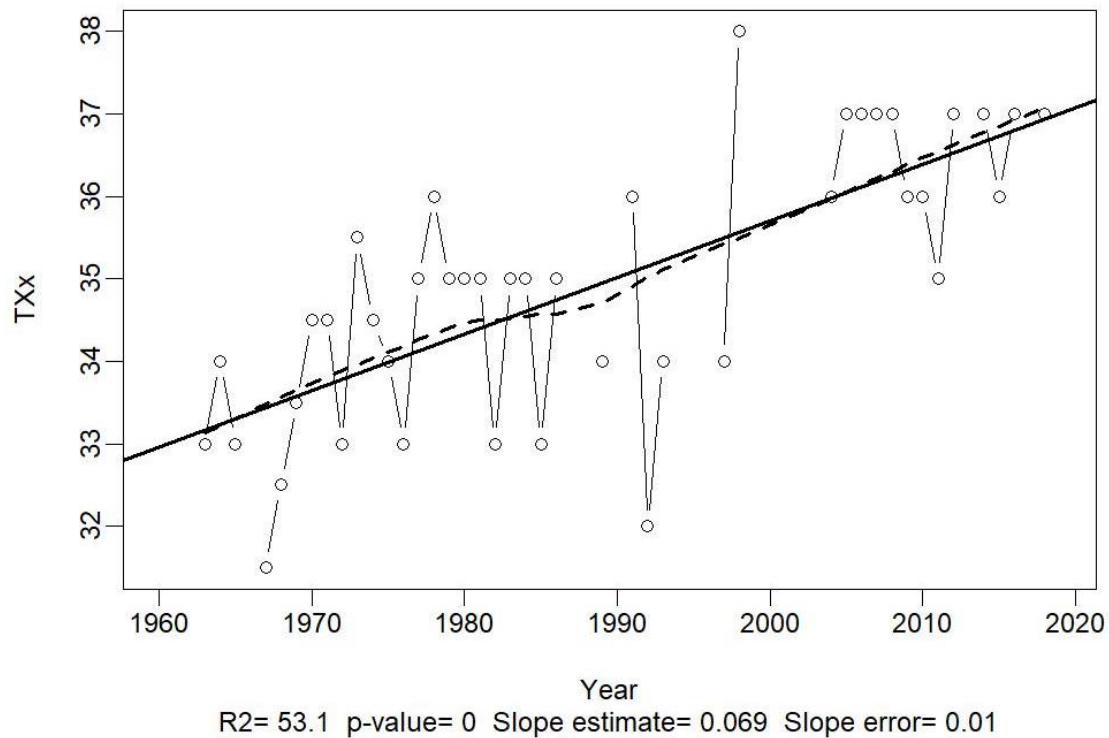
Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

Las lluvias intensas suelen ser provocadas por la presencia de huracanes en las costas del Golfo de México. Recordamos el desastre de los primeros días de octubre de 1999, las consecuencias en la Sierra Norte fueron severas. En la estación de Tehuacán se acumularon en tres días 147 mm de lluvia, que corresponde al 171% de lo que se acumula normalmente el mes de septiembre, que es el mes más lluvioso del año. Por el aumento de la nubosidad, la temperatura máxima disminuyó a 18°C.

El 9 de agosto de 2012 se registraron 51 mm de lluvia por el paso del Huracán Ernesto y en Tehuacán se acumularon 48 mm en tres días.

En el análisis de extremos climáticos solo se comentan los índices que presentaron tendencia significativa en las cuatro estaciones. En la estación de Calipan, la temperatura mínima media registró tendencia positiva. Mientras que, en la estación de Tehuacán, los índices que presentaron tendencia positiva fueron la temperatura máxima media, mínima media, el número de días con temperaturas mayores a 25°C y la temperatura máxima extrema.

Gráfica 7.13. Tendencia significativa de la temperatura máxima extrema (TXX) en la estación de Tehuacán.



Fuente: Elaboración propia, con datos del SMN.

En la estación de Zapotitlán, la temperatura mínima media, la temperatura mínima extrema y el número de días con lluvia mayor a 25mm tienen tendencia positiva; el número de días con helada tiene tendencia negativa.

En Caltepec, la temperatura máxima media y el número de días con temperatura mayor a 30°C, tienen tendencia positiva. En los índices relacionados con la precipitación pluvial se obtuvieron tendencias no significativas, puede ser porque la lluvia es muy aleatoria y por el porcentaje tan alto de datos faltantes.

Los índices relacionados con la temperatura tienen tendencia ascendente, como se comentó anteriormente, la disponibilidad de agua podría disminuir, teniendo en cuenta que un aumento de la temperatura conduce a una mayor evapotranspiración, por lo que los escurrimientos e infiltraciones disminuirían. Esto generaría efectos negativos sobre los ecosistemas, los objetos de conservación

socio ambiental y las actividades productivas, lo que incrementaría la presión sobre los recursos naturales.

7.2.2 Análisis de extremos climáticos

Sequía

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua desarrolló una página en internet denominado Monitor Mesoamericano de Sequía, un monitor de sequía en México, Centroamérica, Colombia y el Caribe. Los mapas proporcionan la evolución espaciotemporal de la magnitud y severidad de la sequía.

Las características más importantes para definir la severidad de una sequía son:

- **Intensidad:** define el grado en que las condiciones de humedad en un momento dado se separan de las condiciones “normales”.
- **Magnitud:** determina la inercia temporal del fenómeno de sequía por medio de su persistencia temporal, la cual se hace equivalente a un tiempo dado en condiciones de sequía severa.
- **Distribución espacial:** es la localización y extensión geográfica de la sequía.

Para evaluar la intensidad de la sequía se basan en el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) por sus siglas en inglés. Sus categorías de intensidad están representadas en la tabla 7.9.

Tabla 7.9 Categorías de intensidad de la sequía.

Rango	Clave	Categoría
$-0.8 < SI \leq -0.5$	D0	Anormalmente seco
$-1.3 < SI \leq -0.8$	D1	Sequía moderada
$-1.6 < SI \leq -1.3$	D2	Sequía severa
$-2.0 < SI \leq -1.6$	D3	Sequía extrema
$SI \leq -2.0$	D4	Sequía excepcional
$0.5 \leq SI < 0.8$	W0	Anormalmente húmedo
$0.8 \leq SI < 1.3$	W1	Moderadamente húmedo
$1.3 \leq SI < 1.6$	W2	Severamente húmedo

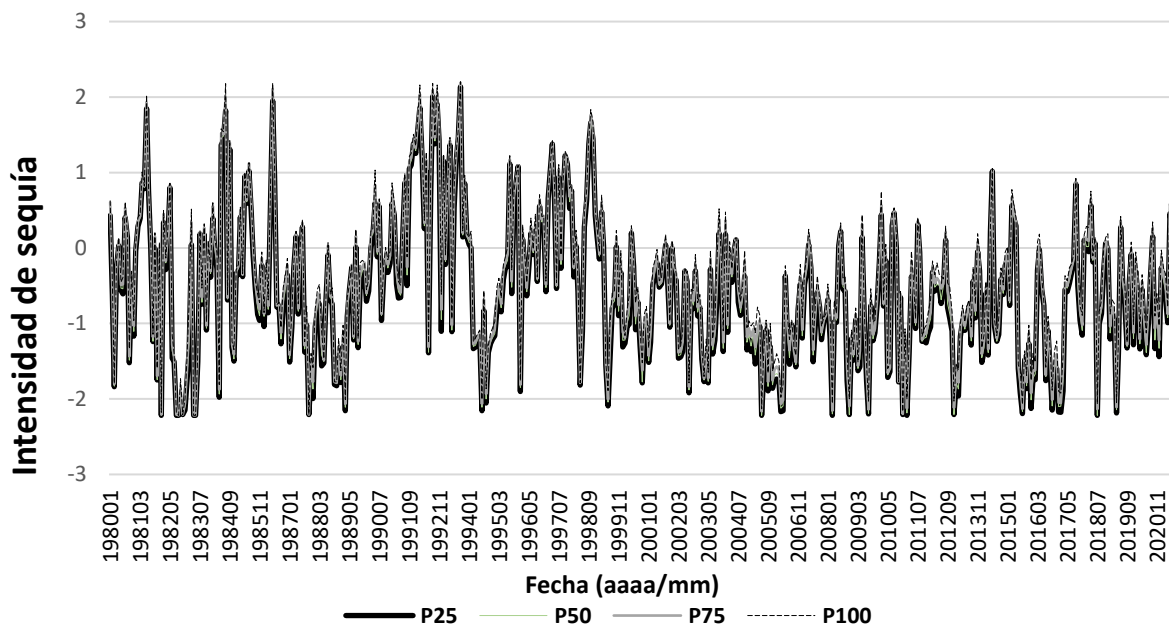
Rango	Clave	Categoría
$1.6 \leq SI < 2.0$	W3	Extremadamente húmedo
$SI \geq 2.0$	W4	Excepcionalmente húmedo

Fuente: Índice Estandarizado de Precipitación.

Si el índice es menor o igual a -2.0 su categoría es sequía excepcional con clave D4, la máxima categoría de intensidad de la sequía.

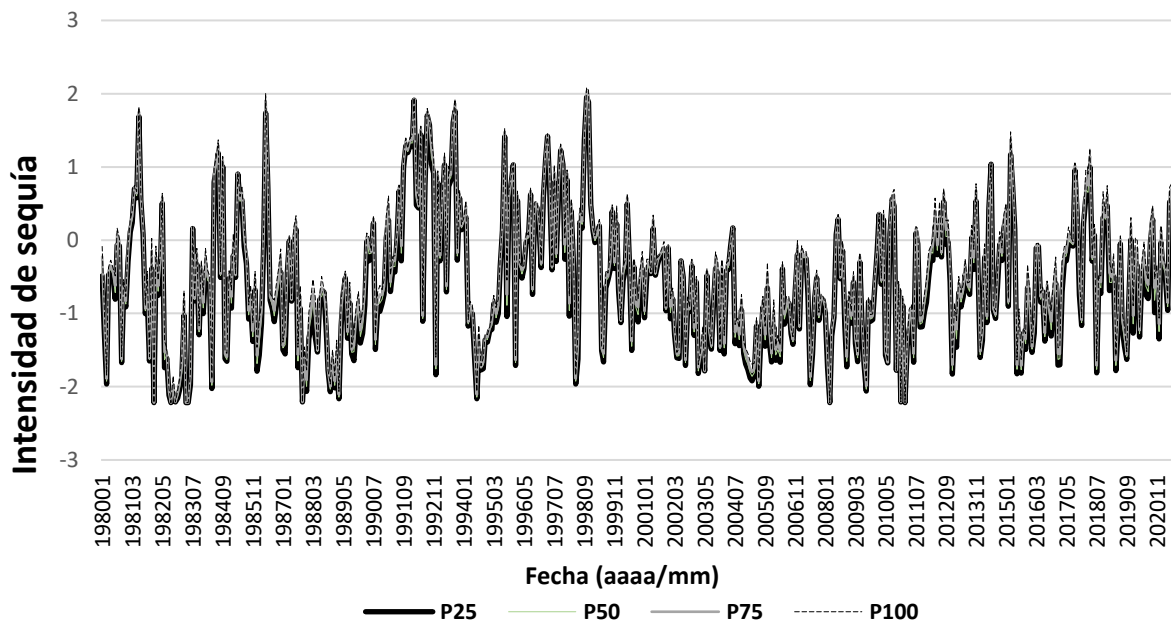
En el municipio de Caltepec, de enero de 1980 a septiembre de 2021 se presentaron 26 meses con sequía excepcional D4, correspondiente al 5.2% del periodo. Ver gráfica 7.14.

Gráfica 7.14 Intensidad de sequía, Caltepec.



Fuente: Monitor Mesoamericano de Sequía.

Gráfica 7.15 Intensidad de sequía, Calipan.



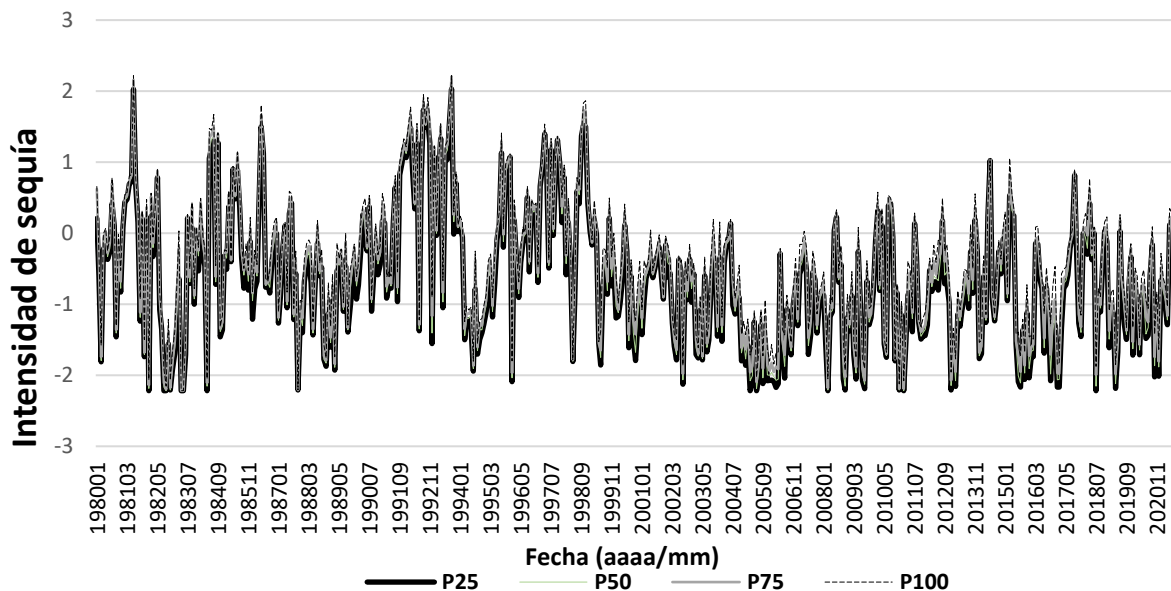
Fuente: Monitor Mesoamericano de Sequía.

En el municipio de Coxcatlán, donde se encuentra la estación de Calipan, la sequía excepcional se registró 17 meses del periodo, equivalente al 3.4 % de los meses. Ver gráfica 7.15.

En el municipio de Tehuacán, la sequía excepcional se registró en 30 meses (gráfica 7.16), el 5.9% del periodo de enero de 1980 a septiembre de 2021.

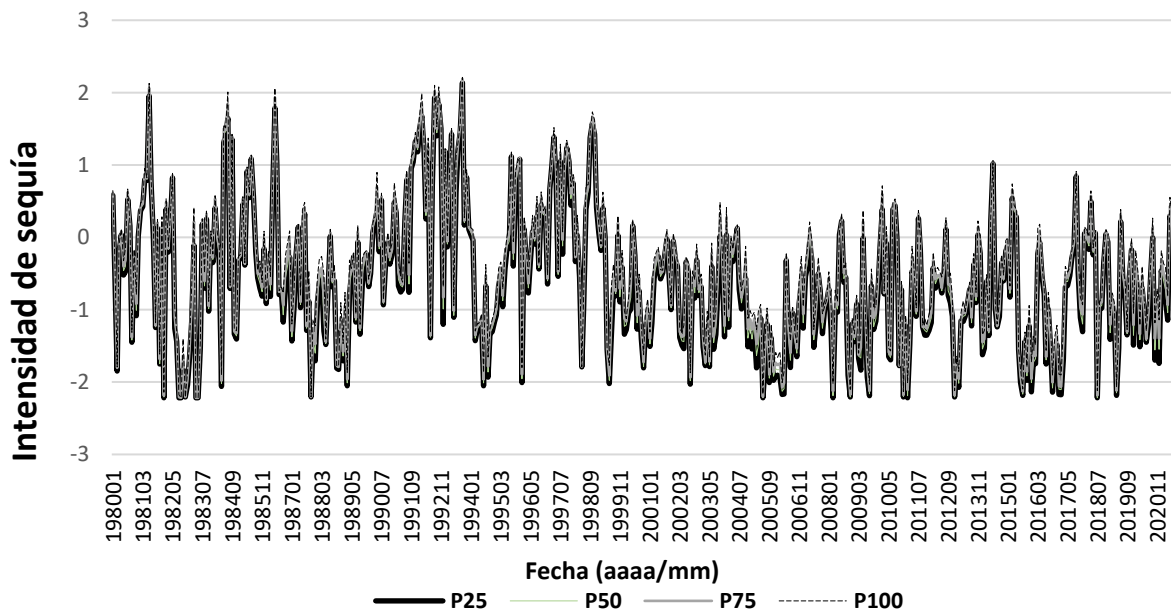
En el municipio de Zapotitlán, en 28 meses se presentó sequia excepcional el 5.6% del total de meses del periodo (gráfica 7.17).

Gráfica 7.16 Intensidad de sequía, Tehuacán.



Fuente: Monitor Mesoamericano de Sequía.

Gráfica 7.17 Intensidad de sequía, Zapotitlán.



Fuente: Monitor Mesoamericano de Sequía.

La intensidad de la sequía afecta en menor proporción al municipio de Coxcatlán, donde se encuentra la estación de Calipan, se infiere que, por su condición geográfica, sea menos afectado por la sombra pluviométrica de la sierra.

En el resto de los municipios el porcentaje de sequía excepcional varía del 5.2 al 5.9 por ciento.

Lluvias intensas

En los reportes de desastres de CENAPRED del periodo 2000-2021, se tiene registrado un reporte de desastre por lluvias intensas en los cuatro municipios durante los primeros días de octubre de 2005, el cual fue provocado por el paso del Ciclón Tropical Stan y la Onda Tropical No. 40.

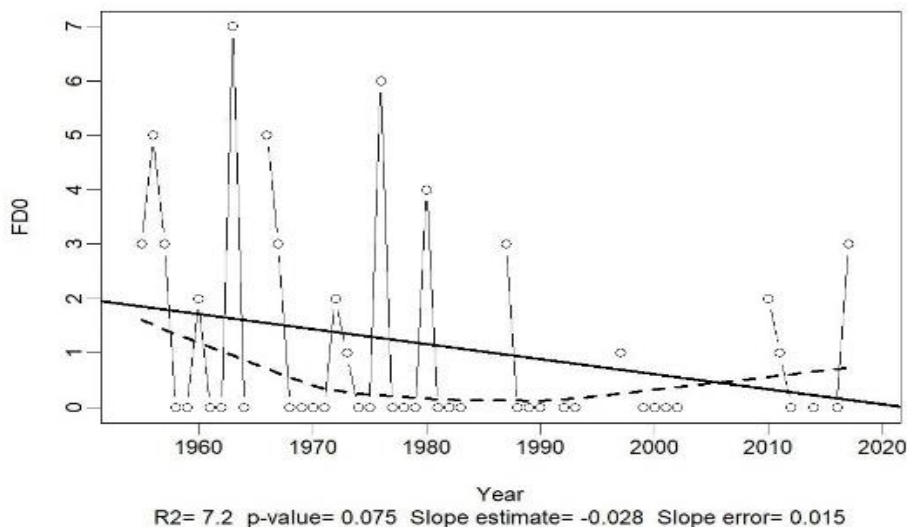
En el municipio de Coxcatlán se tiene otro reporte de desastre por lluvias, del 22 al 23 de agosto de 2011.

Heladas

En el análisis de extremos se tiene que en la estación de Caltepec, el número de días con heladas al año (FD0), tiene tendencia descendente al 0.1 de significación.

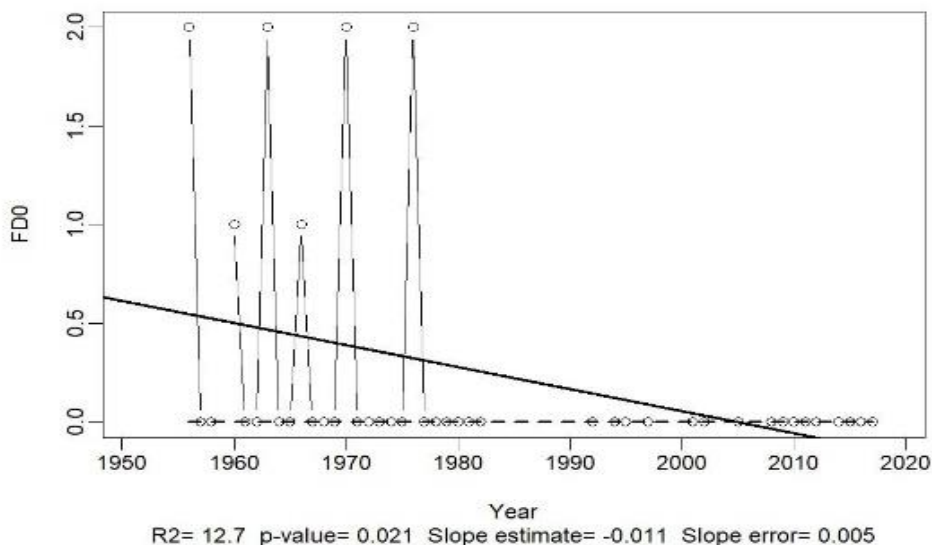
En la estación de Zapotitlán el número de días con heladas al año tiene tendencia descendente significativa al 0.05. Ver gráficos 7.18 y 7.19. Es probable que en la región de estudio el número de días con helada esté disminuyendo.

Gráfica 7.18 Número de días con heladas al año, Caltepec.



Fuente: Elaboración propia con datos de SMN.

Gráfica 7.19 Número de días con heladas al año, Zapotitlán.

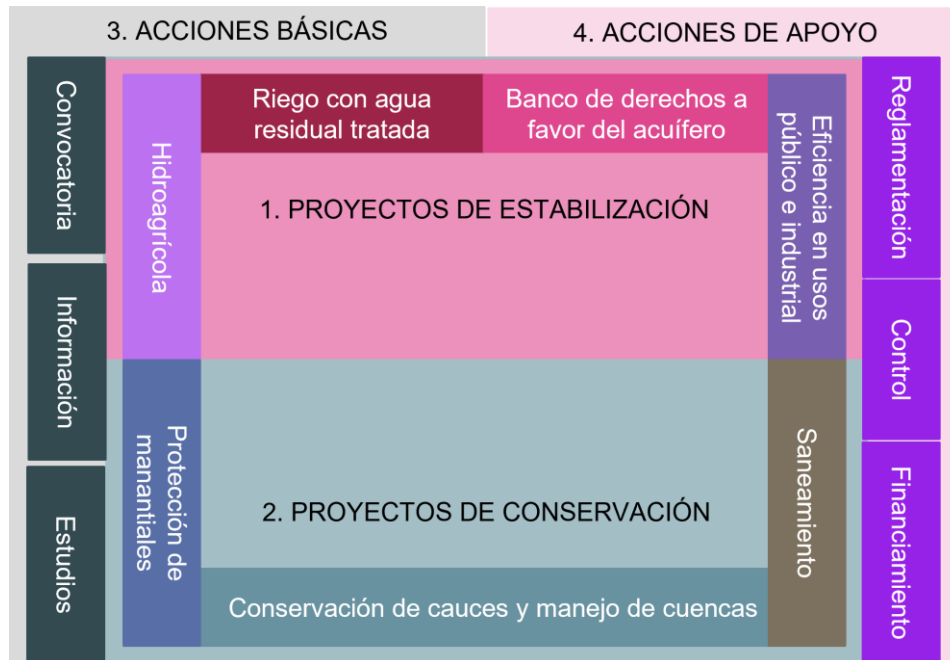


Fuente: Elaboración propia con datos de SMN.

Lo anterior, sustenta de manera apremiante la factibilidad y la necesidad de la implementación de medidas en la zona de los manantiales. Principalmente, las relativas a recuperación y conservación de suelos, así como de obras que incrementen la capacidad de recarga del acuífero. La tarea de recuperar la sustentabilidad del acuífero proviene específicamente de una estrategia que parte de la capacidad, tanto de la sociedad, como de las instituciones, de implementar el conjunto de acciones

para atender la solución a la problemática actual del acuífero, como al cumplimiento de objetivos para el fortalecimiento de la sustentabilidad del acuífero en lo futuro.

Figura 7.1 Estructura del Plan



Fuente: Elaboración propia, 2021.

En dichos términos, la capacidad logística para implementar el plan es, tanto la base de su éxito, como el elemento para apoyar las acciones y soluciones en lo sucesivo.

Las acciones básicas, se refieren a contar con información detallada, capacidad de convocatoria hacia los usuarios y actores del manejo del acuífero y disponer de estudios y proyectos específicos y a nivel ejecutivo, para realizar tanto los proyectos de estabilización, como de conservación.

El seguimiento se logra mediante acciones de apoyo: reglamentación, vigilancia y control y también con financiamiento.

Es recomendable, definir como elemento complementario, una reglamentación que incluya una zonificación, que distinga distintas zonas, como son de recarga, de reserva, de protección de manantiales y galerías filtrantes.

A partir de un inventario de fuentes potenciales y activas de contaminación, será posible realizar un Estudio de riesgo de Contaminación del acuífero, que zonifique al acuífero para respetar lineamientos que protejan la calidad del agua.

Entre las acciones para un manejo sustentable, se encuentran aquellas para recuperar el equilibrio hidrológico del acuífero, como aquellas que permiten proteger las cuencas y la calidad del agua, todas son importantes.

Las técnicas de restauración del acuífero en lo que respecta a la recuperación del equilibrio hidrológico, se clasifican en dos tipos:

- Acciones para proteger, recuperar e incrementar la recarga
- Acciones para disminuir la descarga

Entre las técnicas para proteger la recarga, destacan la reforestación y el manejo de cuencas.

Conclusión

El clima en la zona presenta una tendencia a ser más seco y caluroso, aumentando los problemas en materia ambiental, como son: menor precipitación pluvial que incide en menor humedad en el suelo, pérdidas de bosque, incendios forestales, escasez de agua, mayor frecuencia de sequías y efectos severos en la agricultura.

El número de eventos por año con lluvias intensas tiene tendencia ascendente, se tiene como ejemplo que se acumularon 216.7 mm de lluvia del 9 al 11 de agosto de 2012, aproximadamente el 33% de lo que normalmente se acumula al año, estas fueron provocadas por el paso del huracán Ernesto (DesInventar, 2013).

Cabe resaltar que, tanto en el análisis histórico como en los escenarios, existe una tendencia ascendente de la temperatura, que corrobora que el comportamiento histórico está alineado en cierta medida con el comportamiento de los escenarios de cambio climático.

Con respecto al clima local, las cuatro estaciones analizadas presentan tendencia positiva ascendente en algunos de los índices de temperatura, como son temperatura mínima media, temperatura máxima media y el número de días con temperaturas mayores a 25°C o 30°C.

Lo anterior, nos indica que los índices relacionados con la temperatura tienen tendencia ascendente, como comentamos anteriormente la disponibilidad de agua podría disminuir, teniendo en cuenta que un aumento de la temperatura conduce a una mayor evapotranspiración, por lo que los escurrimientos e infiltraciones disminuirían. Esto generaría efectos negativos sobre los ecosistemas y las actividades productivas, lo que incrementaría la presión sobre los recursos naturales.

Si temperatura y precipitación se analizan desde la perspectiva sinérgica, se infiere que esta región tendrá un potencial incremento de estrés hídrico y sequía, poniendo en grave riesgo la sobrevivencia de especies y servicios ecosistémicos asociados.



8

**DETERMINACIÓN DE GRADO
DE DETERIORO DEL ACUÍFERO**



8. Determinación de grado de deterioro del acuífero

En lo que se refiere al grado de deterioro del acuífero, el conocimiento a la fecha es limitado. Sin embargo, se cuenta con datos que pueden servir en primera instancia para dar una opinión sobre el grado de deterioro del mismo. Este estudio forma parte de esas iniciativas para poder contar con información que nos permita ir definiendo la evolución derivada de la presión ejercida por el crecimiento poblacional y la demanda de servicios que esto conlleva.

Como se puede apreciar a lo largo de lo presentado en este documento, existen mediciones de niveles piezométricos del nivel estático, escenarios de cambio climáticos elaborados para el acuífero en cuestión, algunas referencias sobre la calidad del agua y estimaciones sobre el uso consuntivo del acuífero del Valle de Tehuacán. Si bien, esto no es suficiente, nos permite tener una idea clara de la evolución de las condiciones del área de estudio. Esto aunado a los acercamientos con personas de la zona que comentan con añoranza anécdotas y lo placentero que era ir a nadar y pasar agradables días de campo con la familia.

Si bien los estudios técnicos son sumamente necesarios, los comentarios de las personas robustecen en gran medida la concepción de las necesidades de espacios públicos donde se pueda convivir con la naturaleza y la disposición de las personas a apoyar en jornadas de limpieza o en lo que esté al alcance de sus posibilidades, para la recuperación de La Ciénega.

Con la finalidad de abonar a reducir este vacío de información específicamente de La Ciénega, se realizaron diversos estudios que nos permitirán establecer la línea base para estudios posteriores. A continuación se describen los estudios realizados en sitio.

8.1 Determinación del grado de azolve de “La Ciénega”

Información topográfica de “La Ciénega”

Para realizar el cálculo del grado de azolve de “La Ciénega”, es primordial contar primero con una topografía, lo anterior, para identificar pendientes y posibles escurrimientos de suelo hacia el manantial (ver Anexo I).

La zona de estudio es el cuerpo de agua conocido como La Ciénega. El área definida es de aproximadamente dos hectáreas y media, las cuales cubren el manantial y la formación de pendientes en sus alrededores. Del levantamiento topográfico del manantial La Ciénega se obtuvieron los siguientes resultados:

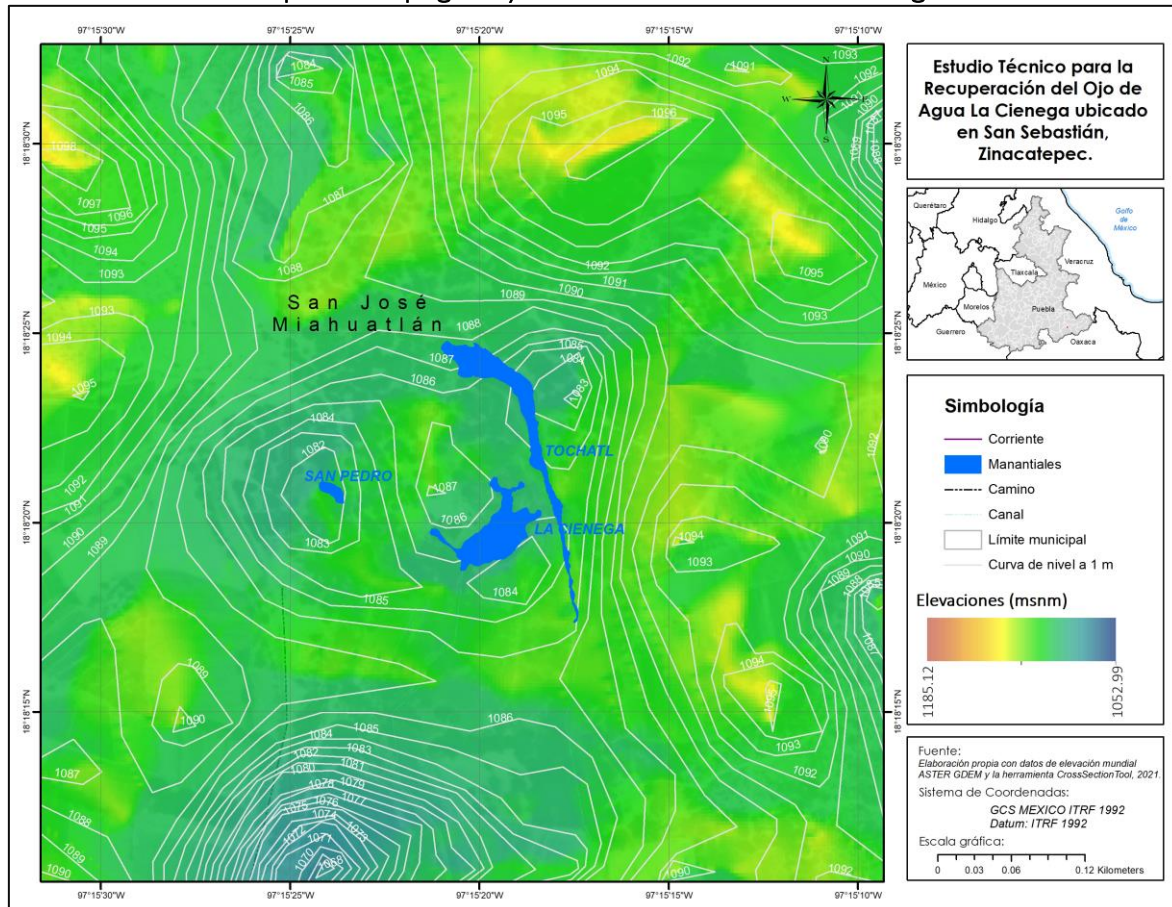
- El área del manantial es de 2,044 m².
- El perímetro es de 0.34 kilómetros.
- El ancho promedio del manantial es de 76 m.
- Mantiene una elevación entre 1075 y 1100 m.
- El área de la zona con sedimento es de 1,841.41 m².

En el plano topográfico podemos observar que la longitud tomada desde la línea de contacto con el espejo de agua hasta el otro extremo rocoso donde está el nacimiento del agua es de 76 m. A primera vista, es casi imperceptible la diferencia de las elevaciones y de formas del área de estudio, pero cuando la información es procesada con los cortes geológicos para la construcción de superficies, se observa una topografía accidentada con variaciones en extensiones de terreno dispersas en el área de estudio.

Como se observa en mapa 8.1 prevalecen alturas considerables de norte a sur, con una curva maestra de 1087 m que disminuye 4 m hacia el sur, terminando en la curva maestra de 1084 m, esta curva de nivel se proyecta en la zona sureste del manantial, que podemos considerar como la parte más baja de su topografía. Otra elevación considerable es la que se localiza en su parte noreste

por donde está el manantial Tochatl que tiene una altura de 1085 m y que va disminuyendo variablemente entre 2 y 3 m hasta mantenerse en su zona baja de La Ciénega a 1084 m de curva maestra.

Mapa 8.1 Topografía y elevaciones manantial La Ciénega.



Fuente: Elaboración propia con datos de elevación mundial ASTER GDEM y la herramienta CrossSectionTool, 2021.

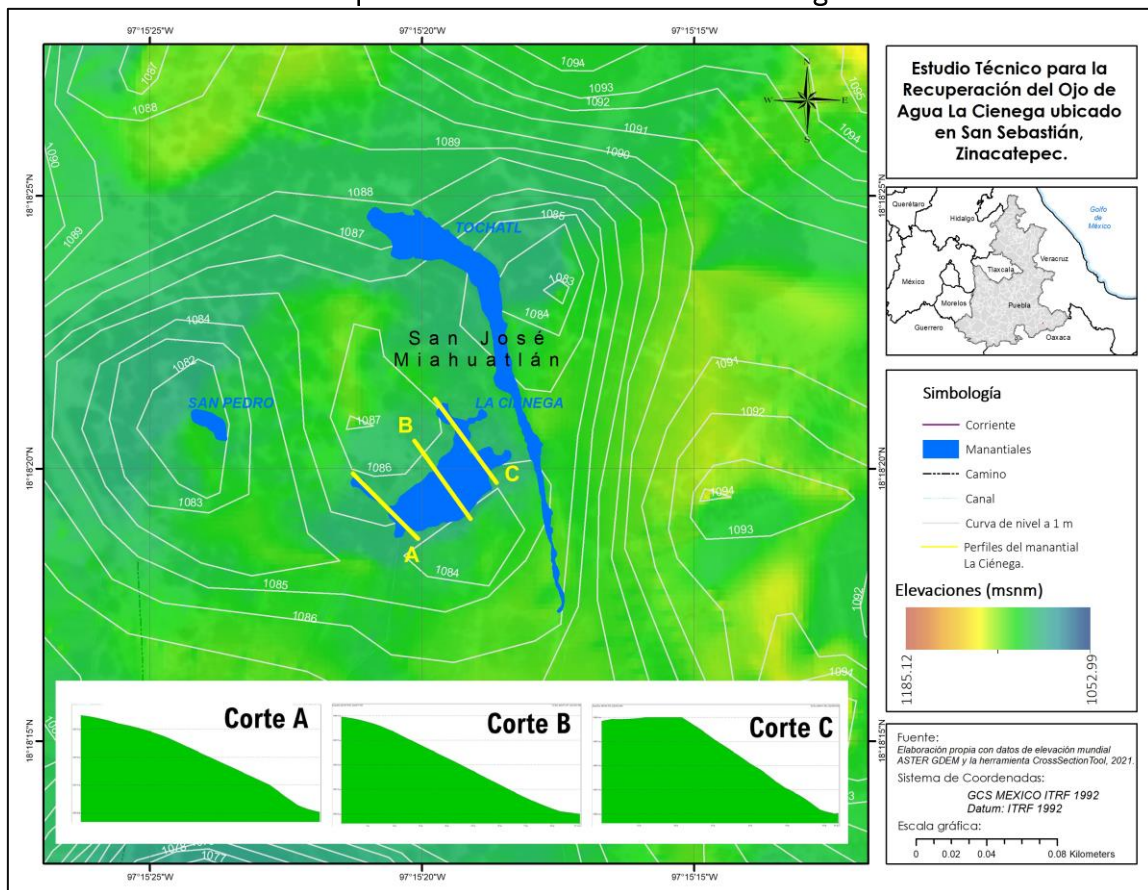
Con relación a lo anterior, se realizó un total de 3 cortes topográficos que integran la información cartográfica para su interpretación. Para la realización de los cortes se utilizan las herramientas CrossSectionTool (Thoms, 2011) y x_section_xacto_v.1, respectivamente, que funcionan sobre Global Mapper.

Estas herramientas construyen un corte topográfico a partir del modelo digital del terreno. Los polígonos correspondientes a las formaciones geológicas del mapa se interceptan con el corte. Para ello, se genera un stratigraphic grid. El stratigraphic grid es una malla 3D regular que puede ser

deformada y cortada por fallas para ajustarla a un modelo estructural de superficies, con lo cual como resultado final se obtiene un perfil preciso en 2D con puntos de referencia en XYZ.

Como se muestra en el mapa 8.2, en los perfiles A, B y C la diferencia que existe entre ambas curvas, la altura que más prevalece en la parte más alta es la curva maestra de 1087, que se mantiene entre un metro de disminución en gran porción en la curva de nivel maestra 1086, en ambos perfiles se puede ver pendientes ligeras y pronunciadas. En este sentido, podemos decir que, a grandes rasgos, sus pendientes más altas se localizan hacia el norte y las más bajas y que se mantienen constantes se localizan en el sur.

Mapa 8.2 Perfiles del manantial La Ciénega.



Fuente: Elaboración propia con datos de elevación mundial ASTER GDEM y la herramienta CrossSectionTool, 2021.

Con relación a lo anterior y con base en la información obtenida de las entrevistas realizadas en campo con los pobladores, quienes comentaron que aproximadamente hace siete o nueve años se

produjeron fuertes lluvias que propiciaron la sobresaturación de humedad en suelo, y como consecuencia, el deslizamiento y acumulación de material dentro del manantial La Ciénega, se deduce que el azolve o sedimento de material acumulado dentro del manantial se produjo como resultado de este suceso.

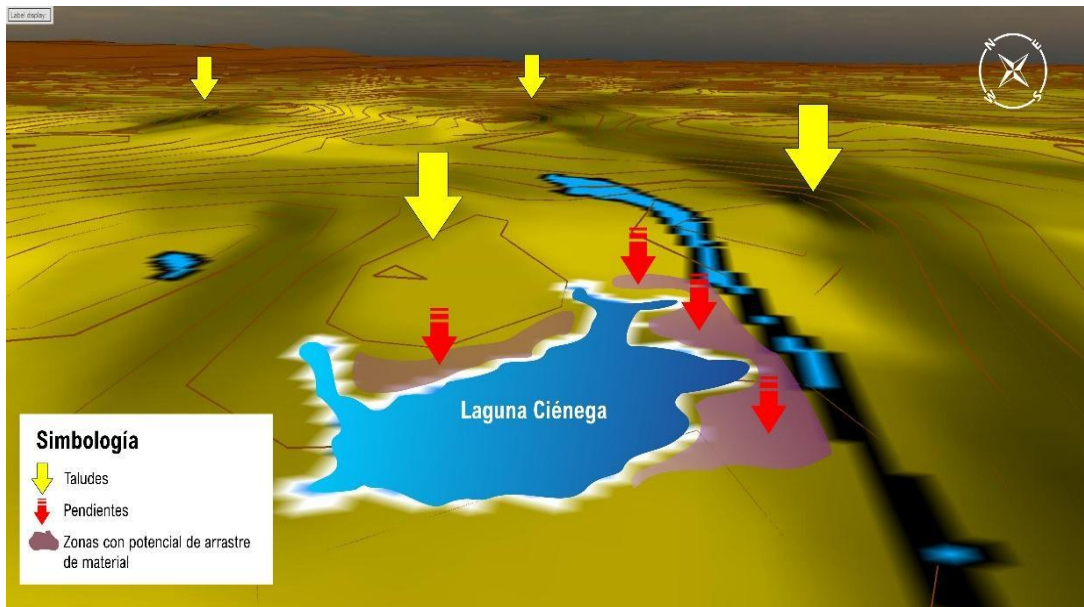
Figura 8.1 Sedimentos del manantial La Ciénega.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Este suceso es debido, por una parte, a la pérdida de vegetación natural en la parte noreste del manantial, que ha propiciado durante mucho tiempo que estos residuos de material vegetal se arrastren y desemboquen en el cuerpo de agua, y por el otro, a su topografía accidentada, que por información obtenida en campo ha sufrido modificaciones por parte de la actividad humana, como por ejemplo, el derrumbe de un talud de la parte superior y lateral izquierda, gran parte del cual hace impacto, permitiendo algunos deterioros en las mismas, así como el aumento de arrastre de material vegetal. Para ello se realizó un estudio de taludes y pendientes cercanos en el manantial con la finalidad de verificar e identificar las zonas con potencial flujo de material vegetal superficial (figura 8.2).

Figura 8.2 Sedimentos del manantial La Ciénega.

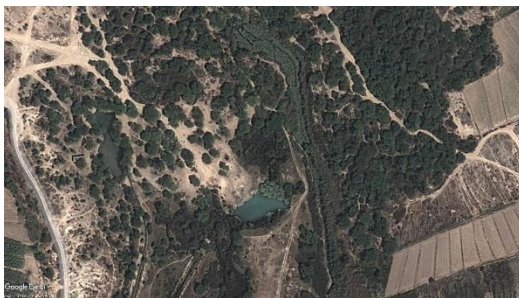


Fuente: Elaboración propia con datos de elevación mundial ASTER GDEM, 2021.

Con relación a lo anterior, comparamos las imágenes satelitales LANDSAT y LIDAR de hace once años para ver los cambios que se han suscitado en el área de estudio. Como se puede observar en la figura 8.3, el volumen del manantial ha disminuido debido a que existe invasión externa hacia su interior, esta invasión se encuentra en la curva de nivel 1086 que es la que prevalece en la topografía del manantial La Ciénega.

Figura 8.3 Temporalidad histórica satelital de los cambios ambientales – naturales que se han suscitado en el manantial La Ciénega.





2015



2016



2017



2018



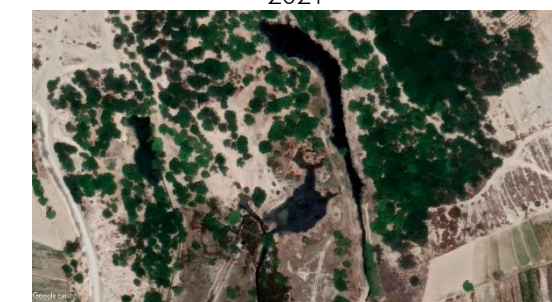
2019



2020



2021



Fuente: Imágenes satelitales Google Earth 2011 – 2021.

Si comparamos los extremos, es decir la primera evidencia de 2011 y la imagen del 2021, se puede observar claramente el nivel de perturbación que se ha dado a través del tiempo en la zona de estudio, principalmente con respecto a la cubierta forestal y la degradación del suelo. Pudiendo apreciarse que, si bien en 2011 no era una zona completamente cubierta de vegetación, para 2021 ya solo quedan manchones de vegetación de estrato bajo y algunos árboles maduros. La pérdida de cubierta forestal favorece en gran medida la presencia de azolve en el cuerpo de agua de La Ciénega.

Figura 8.4 Comparativa pérdida de cubierta forestal y degradación del suelo.



Fuente: Google Earth, 2021.

8.2 Determinación del volumen de azolve en el manantial “La Ciénega”

Una de las actividades realizadas fue la determinación del grado de azolve, de manera específica en el manantial “La Ciénega”. Para ello se realizaron sondeos de profundidad en distintos puntos del manantial y a distintas distancias desde la orilla hacia el centro del mismo. Con ellos se determinó el perfil de azolve y agua acumulados. De igual manera, se realizaron sondeos en el manantial Tochatl. En las imágenes siguientes se muestran las actividades de medición de azolve en distintos puntos del manantial.

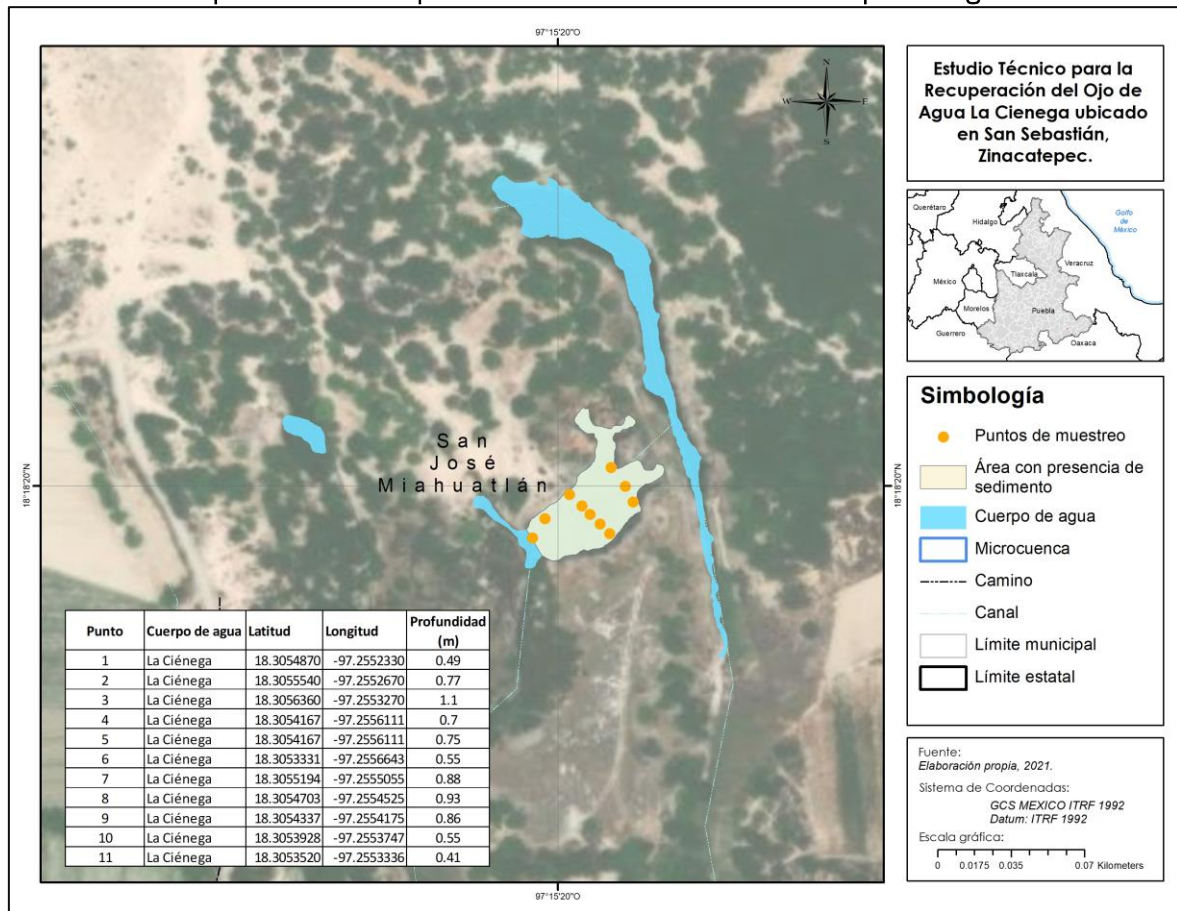
Figura 8.5 Mediciones del azolve realizados en el sitio.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se realizaron diferentes mediciones y se definió el perfil de cada una de ellas para determinar la forma irregular del manantial y poder de esa manera calcular el volumen de sedimento en m^3 . En el mapa siguiente se aprecian las ubicaciones donde se realizaron los muestreos, así como el área donde se encontró presencia de sedimento, misma que cubre una extensión de poco más de 1841 metros cuadrados.

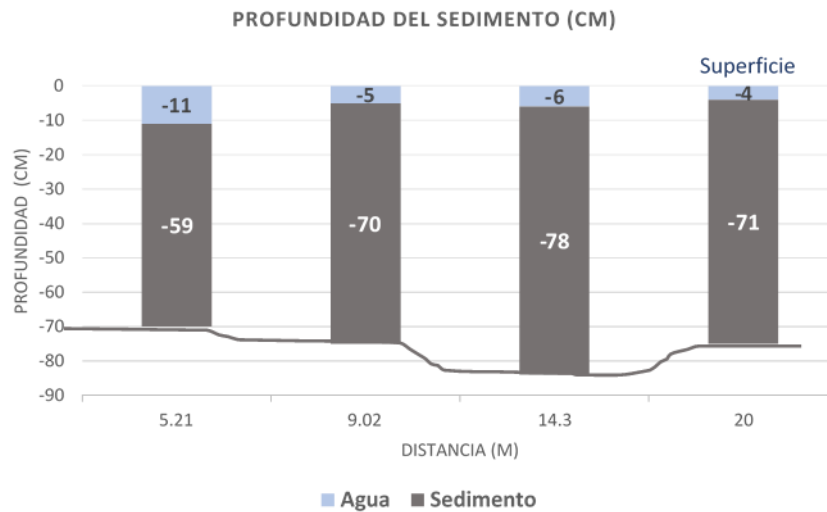
Mapa 8.3 Área con presencia de sedimentos en los cuerpos de agua.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

En los puntos muestreados se encontraron distintos niveles de acumulación de sedimentos, variando la mayor parte de los registros en un rango de entre 30 y 60 cm, pero con un pico de hasta 78 cm, siendo este último valor un extremo derivado de la presencia de sedimento removido con anterioridad pero dejado a la orilla del manantial, y que terminó por caer nuevamente al cuerpo de agua.

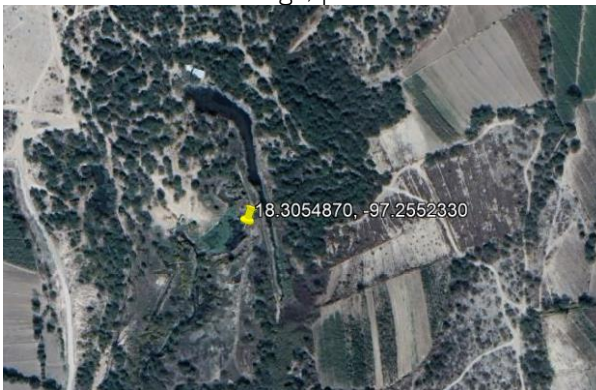
Gráfica 8.1 Profundidad del sedimento en el manantial La Ciénega.



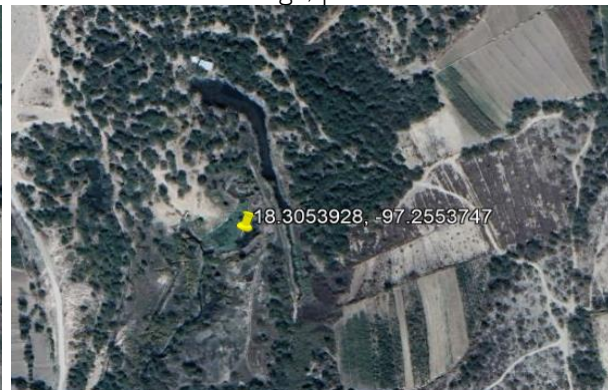
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 8.6 Puntos de medición en el sitio.

La Ciénega, punto I.



La Ciénega, punto I0.



Fuente: Google Earth Pro.

Derivado de lo anterior, se tiene un acumulado de **966.74 m³** de sedimento en el cuerpo de agua La Ciénega. Considerando el valor de 1.45 ton/m³ (Clasificación de texturas y parámetros mecánicos de suelos (SEMARNAT, 2003), correspondiente a la tabla de propiedades físicas de los distintos tipos de suelos en lo referente a limo arcilloso, se tiene en total una acumulación aproximada de **1,401.77 toneladas** de sedimento. Ver Anexo 2.

De igual manera se realizaron sondeos en el manantial Tochatl, sin embargo, este presentó profundidades menores a los 3 cm, por lo que se concluye que no presenta problemas de azolve.

Análisis de sedimentos

Se realizaron 3 estudios diferentes a los sedimentos tanto de La Ciénega como de Tochatl, con el apoyo del Laboratorio de Catálisis, BUAP (Anexo 2):

- I. Análisis de espectroscopía infrarroja (FTIR)
- II. Análisis de espectroscopía por adsorción atómica
- III. Análisis cromatográfico para detección de carbono

Tabla 8.1 Determinación de compuestos minerales en lodos, espectroscopía infrarroja.

Componente	1. Tochatl	2. La Ciénega
Litio (LiNO ₃)	---	---
Zinc (ZnO)	---	---
Silicio (SiO ₂)	*	*
Calcio (CaO)	*	*
Calcio (CaCO ₃)	*	*
Aluminio (Al ₂ O ₃)	---	---
Hierro (Fe _x O _y)	*	*
Magnesio (MgO)	---	---
Titanio (TiO ₂)	---	---
Sal (NaCl)	---	---

Fuente: Laboratorio de catálisis, BUAP 2021.

Claves: * presencia. --- Ausencia

Del análisis anterior se concluye lo siguiente:

- La muestra de La Ciénega presentó fuertes cantidades de SiO₂. Resultado esperado por la presencia de arena (80%).
- La muestra exhibe presencia de compuestos de calcio, tal vez debido a la disolución de piedras tipo mármol y alabastro.
- No se detectó la presencia de elementos de interés comercial tales como litio y aluminio.

Tabla 8.2 Determinación de elementos en lodos, espectroscopía de adsorción atómica.

Componente	1. Tochatl	2. La Ciénega
Zinc	0.0	0.0
Potasio	0.0	0.0
Sodio	0.0	0.0
Calcio	3.8	4.2
Aluminio	0.0	0.0
Hierro	2.8	3.2
Magnesio	0.0	0.0
Titanio	0.0	0.0
Mercurio	0.0	0.0
Plomo	0.0	0.0
Cadmio	0.0	0.0

Fuente: Laboratorio de catálisis, BUAP 2021.

De los resultados de adsorción atómica se concluye lo siguiente:

- La muestra de La Ciénega presentó mayores cantidades de calcio y hierro que la muestra Tochatl.
- No se detectó la presencia de mercurio, plomo y cadmio (metales peligrosos).
- No se detectó la presencia de sodio.

Tabla 8.3 Determinación de carbón orgánico y carbón mineral en lodos.

Muestra	Carbón orgánico gramos/kilo lodo seco	Carbón mineral gramos/kilo lodo seco
Tochatl	19.8	0.0
La Ciénega	124.0	0.0

Fuente: Laboratorio de catálisis, BUAP 2021.

De los resultados presentados en la tabla 8.3 se concluye lo siguiente:

- La muestra de La Ciénega presentó fuertes cantidades de carbón orgánico.
- Ninguna de las muestras contiene carbón mineral (fósil).

En La Ciénega se determinó un valor de 124 g/kg de carbono orgánico, valor superior a los identificados en el estudio de Cambios en propiedades químicas y bioquímicas del suelo asociados al reemplazo de pastizales naturales por *Pinus radiata d. don* y rotaciones agrícolas (Gerónimo, 2018) donde se reportaron valores de 0.71 g/kg, en pastizales naturales y de 0.82 g/kg en bosques de pino y pastizal secundario.

Lo anterior, debido principalmente a que la acumulación de carbón en los humedales es resultado del balance de los procesos de fijación de carbono a través de la fotosíntesis y las pérdidas por descomposición. Las velocidades de fotosíntesis en los humedales son generalmente más altas que en los otros ecosistemas, mientras que las de descomposición son relativamente bajas, debido a las condiciones anaeróbicas, de ahí, que la materia orgánica tienda a acumularse.

8.3 Aforo en el manantial La Ciénega

Se carece de aforos históricos de los distintos efluentes del manantial de La Ciénega, por lo cual se desconoce la evolución de su caudal a través del tiempo, aunque se dice que su disminución es notable. A falta de dichos registros, se carece de elementos precisos para cuantificar esta disminución de caudal. Los registros piezométricos, tal como se refiere previamente, acusan un abatimiento para la generalidad del acuífero, no necesariamente para la zona ubicada aguas abajo de los manantiales, que presumiblemente cuenta con una condición de recarga constante, a través del caudal de estos mismos.

Figura 8.7 Vista del manantial Tochatl.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Mediante el uso de un molinete digital, se realizaron mediciones en los efluentes del manantial La Ciénega, registrando, un caudal conjunto, próximo a los 536.24 litros por segundo. Es conveniente y necesario, disponer de registros para otros períodos, ya sea datos históricos anteriores y nuevos datos a futuro, para conocer el comportamiento de los manantiales.

Desde hace varios siglos el ser humano ha tenido la necesidad de medir el comportamiento físico del agua en movimiento o en reposo. Es por ello por lo que ha inventado muchos aparatos que registran la velocidad, la presión, la temperatura y el caudal. Una de las variables que más interesan es esta última, el caudal, puesto que a través de él se cuantifican consumos, se evalúa la disponibilidad del recurso hídrico y se planifica la respectiva gestión de la cuenca.

El caudal, Q , se define como el volumen de agua, V , que pasa por una sección en un determinado tiempo, t , es decir:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Aforar es medir un caudal. Para realizar un aforo en un sistema hidráulico, se puede medir directamente el volumen, en un recipiente y el tiempo, con un cronómetro.

Este método volumétrico es el más recomendable, sin embargo, a veces es difícil de aplicar, solamente resulta útil para caudales pequeños y donde las características físicas lo permitan. Debido a lo anterior, han surgido los métodos indirectos, que como su nombre lo señala miden otras variables físicas distintas del caudal, como por ejemplo la velocidad o la altura piezométrica, para luego, aplicando los principios hidráulicos, obtener dicho caudal.

Los métodos de medición indirectos de caudales se pueden agrupar en dos tipos: Área-Velocidad y Altura Piezométrica. A continuación, se describe el método de área-velocidad, que fue el que se utilizó para realizar las mediciones en este trabajo.

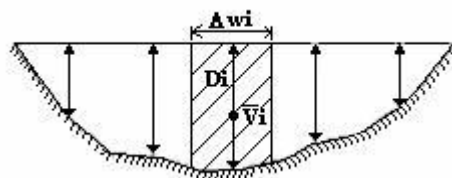
En el método de área-velocidad se utiliza la ecuación de continuidad.

El caudal en una sección transversal de área A está dado por:

$$Q = \iint_A V * dA$$

en donde la integral se aproxima sumando los caudales incrementales calculados para cada medición i , $i = 1, 2, \dots, n$, de velocidad V_i y profundidad D_i . Las mediciones representan valores promedio a lo largo de un ancho ΔW_i del cauce, luego el caudal se calcula como:

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i * D_i * \Delta W_i$$



Por su parte, la velocidad, en un punto, se puede medir, por ejemplo, con alguno de los siguientes dispositivos: flotador y reloj, molinetes y sensores de inducción magnética.

Con el flotador y el reloj se toman lecturas del tiempo que recorre un cuerpo que avanza flotando sobre el agua. El molinete registra el número de vueltas que impone el efecto dinámico del agua y se relaciona esta frecuencia de giro con la velocidad. El sensor de inducción magnética basa su funcionamiento en la ley de Faraday que dice que, si un medio electro conductor se desplaza en un campo magnético, una tensión inducirá dicho conductor; por lo tanto, la tensión es proporcionalmente lineal a la velocidad del conductor eléctrico (corriente de agua).

Método del molinete

El molinete es un instrumento que tiene una hélice, que gira al introducirla en una corriente de agua. El de tipo de taza cónica gira sobre un eje vertical y el de tipo hélice gira sobre un eje horizontal. En ambos casos la velocidad de rotación es proporcional a la velocidad de la corriente; se cuenta el número de revoluciones en un tiempo dado.

Los molinetes pueden ir montados en soportes o suspendidos de cables. Antes de ser usados en el campo, deben ser calibrados por el fabricante para determinar la relación entre la velocidad de rotación de la hélice y la velocidad del agua.

El equipo usado en las mediciones en campo fue un molinete digital de la marca Global Water. El instrumento consta de una hélice protegida y un soporte para el agua, acoplado a un mango de sonda telescópico que termina en un ordenador de flujo con pantalla LCD, el cual viene calibrado de fábrica.

Figura 8.8 Molinete digital.



Fuente: Global Water.

La sección elegida para la medida con el molinete debe estar situada en un tramo recto y de una sección lo más homogénea posible a lo largo de dicho tramo.

Un molinete mide la velocidad en un único punto, es por esto por lo que, para calcular el caudal total se deben realizar varias mediciones.

Según sea el grado de precisión que se quiera obtener en el aforo, se tomarán mayor o menor número de puntos de medida en la sección. Cuando se pretende obtener una alta precisión, se elegirán mayor número de verticales en la sección y se calculará la velocidad media en cada vertical.

Para cada sección entre dos verticales de medida, el área se calcula como el producto del promedio del alto por el ancho, y la velocidad media como el promedio de las velocidades medias en las verticales. El caudal de cada sección resulta directamente como el producto del área y la velocidad media, mientras que el caudal total se calcula como la suma de los caudales entre verticales.

La velocidad media del agua en cada vertical puede determinarse mediante los siguientes métodos, dependiendo del tiempo disponible y teniendo en consideración el ancho, la profundidad del agua, las condiciones del lecho, los cambios de nivel, así como la precisión con que se desea operar:

- a) Método de los puntos: Se deben realizar distintas observaciones de velocidad en cada vertical dependiendo de la profundidad del curso del agua. Para secciones de poca profundidad (menores a 60 cm) se realizan observaciones en cada vertical colocando el molinete a 0.6 de la profundidad total por debajo de la superficie libre. Para profundidades superiores, generalmente, se mide la velocidad a 0.2 y luego a 0.8 de la profundidad de la superficie libre y se usa el promedio de las dos medidas como la velocidad media en la vertical. En la tabla 8.4 se resumen los antecedentes necesarios para el cálculo de la velocidad media de acuerdo con la profundidad del cauce.

Tabla 8.4 Método de los puntos.

Número de mediciones	Profundidad del curso del agua (cm)	Puntos de observación (medidos desde la superficie libre)	Velocidad media
1	30 - 60	0.6 D	$V_{media} = V_{0.6}$
2	60 - 300	0.2 y 0.8 D	$V_{media} = 0.5(V_{0.2} + V_{0.8})$
3	300 - 600	0.2, 0.6 y 0.8 D	$V_{media} = 0.25(V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8})$
5	>600	30 cm, 0.2, 0.6, 0.8 y 30 cm sobre el fondo	$V_{media} = 0.1(V_{super} + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_{fondo})$

Donde D = profundidad del agua.

Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

- b) Método de múltiples puntos: Consiste en medir velocidades en muchas posiciones de la vertical para definir el perfil de velocidad bastante bien y así calcular una velocidad media lo suficientemente exacta. El método es muy preciso, dependiendo del número de puntos de referencia medidos para el perfil, pero requiere de mucho tiempo.
- c) Método superficial: Implica medir la velocidad cerca de la superficie libre y después multiplicarla por un coeficiente que va desde 0.85 a 0.95, dependiendo de la profundidad del agua, de la velocidad, y de la naturaleza del río o canal. La dificultad de determinar el coeficiente exacto limita la utilidad y la exactitud de este método. En general, se utiliza para medir la velocidad en crecidas, en donde no se recomienda efectuar un aforo convencional, para proteger los equipos hidrométricos.

- d) Método de integración: En este método el molinete es sumergido y elevado a lo largo de toda la vertical a una velocidad uniforme. La velocidad de ascenso o descenso del molinete no deberá ser superior al 5% de la velocidad media del flujo en toda la sección transversal y en todo caso deberá estar comprendida entre 0.04 y 0.10 m/s. Se determina el número de revoluciones por segundo. En cada vertical se realizan dos ciclos completos y, si los resultados difieren de más de 10%, se repite la medición.

Descripción de la visita a los manantiales

De acuerdo con la población, se considera como La Ciénega al conjunto de los 3 manantiales ubicados en la zona. Sin embargo, el manantial de la parte central lleva el nombre de La Ciénega propiamente, mismo que es conocido también con el nombre de San José. Es importante mencionar que los manantiales se encuentran ubicados en San José Miahuatlán, no obstante, la concesión de los mismos, la tiene el municipio de San Sebastián Zinacatepec.

Es una zona con aspecto de pantano, que funge como zona de identidad y turismo para ambas poblaciones. Dicho manantial cuenta con una superficie aproximada de 3 hectáreas, las cuales están formadas por la lagunilla, una cueva donde nace el agua y áreas verdes, su agua es utilizada principalmente para riego de campos y cría de ciertas especies de aves y peces, como la mojarra, carpa, pez gato, algunas tortugas de agua dulce, iguanas y lagartijas. De igual manera, se detectaron familias que van a pasar un día de campo y al final llenan sus garrafones de agua para consumo propio.

Manantial Sociedad Tochatl

Durante el recorrido se hicieron las mediciones de las velocidades del flujo mediante un molinete digital, en dos secciones del canal del manantial Tochatl. A continuación, se muestra en la figura 8.9 el proceso que se llevó a cabo para obtener los valores de la velocidad en ese punto de la sección.

Figura 8.9 Sección I. Manantial Tochatl.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

En la siguiente tabla 8.5 se presentan los cálculos que se realizaron para obtener los valores del caudal que pasa por esa sección, el cual fue de 29.57 litros por segundo.

Tabla 8.5 Cálculo del caudal en la sección I manantial Tochatl.

Sección I manantial Tochatl										
Vertical	Velocidad del caudal (m/s)			Profundidad total (m)	Ancho total (m)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área (m ²) 5x6	Caudal (m ³ /s) 4x9	Caudal (Lt/s)
	1er valor	2do valor	Media							
I	0.06096	0.12192	0.09144	0.28	1.155	0.17	0.58	0.3234	0.02957	29.57
Total									0.02957	29.57

Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

Las lecturas de la velocidad se hicieron a 5 metros aguas abajo de la primera sección, donde se observa que el canal es de concreto y de forma rectangular.

Figura 8.10 Sección 2. Manantial Tochatl.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Los resultados de la velocidad para el punto en esta sección se muestran en la tabla 8.6 y de acuerdo con los cálculos se obtuvo un caudal de 27.20 litros por segundo.

Tabla 8.6 Cálculo del caudal en la sección I manantial Tochatl.

Sección 2 manantial Tochatl										
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vertical	Velocidad del caudal (m/s)			Profundidad total (m)	Ancho total (m)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área (m ²) 5x6	Caudal (m ³ /s) 4x9	Caudal (Lt/s)
	1er valor	2do valor	Media							
I	0.18288	0.24384	0.21336	0.25	0.51	0.15	0.26	0.1275	0.02720	27.20
Total									0.02720	27.20

Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

Manantial Coyoatl

Para realizar las mediciones en este manantial se preguntó con el encargado del lugar para saber exactamente donde hacer la medición con el molinete digital, ya que de acuerdo con lo observado

en campo se juntan varios nacimientos de agua por lo que la medición se realizó a 225 m aproximadamente aguas abajo en un canal natural donde lleva el agua total de las vertientes.

En la siguiente figura 8.11 se muestra la sección del canal donde se realizó la primera medición con el molinete digital.

Figura 8.11 Sección I. Manantial Coyoatl.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Los resultados de los cálculos en esta sección indican un caudal de 409.40 litros por segundo a una velocidad de 0.21 metros por segundo.

Tabla 8.7 Cálculo del caudal en la sección I del manantial Coyoatl.

Sección I manantial Coyoatl										
Vertical	Velocidad del caudal (m/s)			Profundidad total (m)	Ancho total (m)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área (m ²) 5x6	Caudal (m ³ /s) 4x9	Caudal (Lt/s)
	1er valor	2do valor	Media							
I	0.18288	0.24384	0.21336	0.78	2.46	0.31	0.9	1.9188	0.40940	409.40
Total									0.40940	409.40

Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

Para la segunda sección, se tomó lectura aguas abajo de la primera sección, a unos 100 metros aproximadamente, como se observa en la figura 8.12.

Figura 8.12 Sección 2. Manantial Coyoatl.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

El cálculo del caudal en la segunda sección resultó de 514.87 litros por segundo a una velocidad de 0.24 m/s.

Tabla 8.8 Cálculo del caudal de la sección 2 del manantial Coyoatl

Sección 2 manantial Coyoatl										
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vertical	Velocidad del caudal (m/s)			Profundidad total (m)	Ancho total (m)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Área (m ²) 5x6	Caudal (m ³ /s) 4x9	Caudal (Lt/s)
	1er valor	2do valor	Media							
I	0.22860	0.25908	0.24384	1.03	2.05	0.41	1.025	2.1115	0.51487	514.87
Total									0.51487	514.87

Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

Manantial La Ciénega

La medición de la velocidad del flujo en este manantial se realizó en un canal de forma trapezoidal, el cual tiene bien definidas sus dimensiones, en la fotografía siguiente se puede observar dicho canal que transporta el agua de esta vertiente.

Figura 8.13 Sección I. Manantial La Ciénega.



Fuente: COTAS Tehuacán, 2021.

Para saber el caudal en ese punto de la sección, se tomaron las medidas de los lados del trapecio que tiene el canal para calcular el área y multiplicándose con la velocidad del agua medido con el

molinete digital se obtuvo el valor del caudal, el cual fue de 45.720 litros por segundo que desaloja este afloramiento.

Tabla 8.9 Cálculo del caudal en la sección I del manantial Ciénega.

Manantial La Ciénega										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Vertical	Velocidad del caudal (m/s)			Profundidad total (m)	Ancho total (m)	Profundidad (m)	Ancho base (m)	Área (m ²) (6+8)x5x0.5	Caudal (m ³ /s) 4x9	Caudal (Lt/s)
	1er valor	2do valor	Media							
I	0.12192	0.18288	0.1524	0.6	0.7	0.13	0.3	0.3	0.04572	45.72
Total									0.04572	45.720

Fuente: Elaboración propia con datos de COTAS Tehuacán, 2021.

De acuerdo con recorridos de campo y testimonios de los habitantes de la zona, existe la perforación de norias y pozos, sin la existencia de un permiso por parte de las autoridades; sin embargo, ocurren en la clandestinidad y en lo secreto, siendo difícil identificar las captaciones a simple vista.

8.4 Monitoreos de calidad del agua

Para la zona de estudio se tomaron muestras de agua tanto del nacimiento del manantial La Ciénega, como del manantial Tochatl, este último es aprovechado mediante la crianza de peces. Las muestras fueron analizadas en un laboratorio acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (Anexo 3).

Figura 8.14 Muestras recolectadas in situ para la determinación de contaminantes.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

A continuación, se muestran resultados del estudio de calidad del agua.

Tabla 8.10 Calidad del agua de manantiales.

Parámetro	2021		Unidad	Límite Norma
	La Ciénega	Tochatl		
Temperatura	19	19	°C	-
pH	6.88	7.02		6.5 - 8.5
Conductividad eléctrica	2,080	2,080	µS/cm	-
Olor	Agradable	Agradable		Agradable
Sabor	Agradable	Agradable		Agradable
Cloro residual libre	<0.2	<0.2	mg/l	0.2-1.5
Nitrógeno amoniacal	<0.4	<0.4	mg/l	0.5
Sólidos totales disueltos	1432	1431	mg/l	1000
Turbiedad	0.51	3.53	UTN	5
Sustancias activas al azul de metileno	<0.099	<0.099	mg/l	5
Color	<2.5	<2.5	Pt/Co	20
Fenoles totales	<0.001	<0.001	mg/l	0.3
Dureza total (como CaCO ₃)	520	504	mg/l	500
Cloruros	263.92	262.05	mg/l	250
Sulfatos	122.879	122.305	mg/l	400
Fluoruros	0.543	0.559	mg/l	1.5
Nitratos	1.384	1.449	mg/l	10
Nitritos	<0.02	<0.02	mg/l	1
Coliformes Fecales	No detectable	8	NMP/100 ml	No detectable
Coliformes totales	4.6	8	NMP/100 ml	No detectable
<i>E. Coli</i>	No detectable	8	NMP/100 ml	No detectable
Aluminio	<0.02	<0.02	mg/l	0.2
Arsénico	0.011	0.012	mg/l	0.025
Cadmio	<0.001	<0.001	mg/l	0.005
Cobre total	<0.09	<0.09	mg/l	2
Cromo total	<0.005	<0.005	mg/l	0.5
Fierro	<0.1	<0.1	mg/l	0.3
Manganeso	<0.097	<0.097	mg/l	0.15
Mercurio	<0.0005	<0.0005	mg/l	0.001
Plomo	<0.003	<0.003	mg/l	0.01
Sodio	261.953	263.211	mg/l	200
Zinc	<0.098	<0.098	mg/l	5
Bario	<0.247	<0.247	mg/l	0.7
Cianuros	<0.020	<0.020	mg/l	0.07

Fuente: Laboratorio ACAMA, 2021.

Con respecto a los análisis realizados en 2021 a los dos manantiales se puede concluir que la calidad del agua es similar a lo mencionado en el estudio de 2009 (CONAGUA, 2020), sin embargo, se presentan algunas diferencias debidas principalmente a la procedencia del agua de cada uno de ellos.

Del estudio de 2009, se menciona que los sólidos disueltos se encontraban por arriba de la NOM, con valores hasta de 2,300 mg/l, así como que la concentración de cloruros variaba de 40 a 700 mg/l, encontrando un máximo en San Sebastián Zinacatepec, por lo que también se rebasaba el LMP de 250 mg/l.

Para el caso del estudio 2021, los valores detectados para sólidos totales disueltos, 1432 mg/l, se encuentran por arriba del límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994, Agua para uso y consumo humano (1000 mg/l). Misma situación se presenta para el carbonato de calcio, donde el valor encontrado es de 520 mg/l, mientras la norma presenta un LMP de 500 mg/l. Respecto al consumo humano, el agua con un alto contenido de sales de calcio puede afectar a riñones, debido a que este órgano filtra el agua y elimina los residuos.

En cuanto al sodio, es común en el agua, ya que procede de rocas y de suelos que contienen este elemento. Para el caso de los cloruros, su presencia se debe principalmente a la elevada solubilidad de sales de cloruro presentes en rocas y debido a ello estos pasan rápidamente a la fase acuosa, de igual manera el agua de lluvia es una fuente importante de ion Cl⁻. Encontrando un valor de 263.92 mg/l, mismo que se encuentra arriba del LMP de 250 mg/l.

Uno de los parámetros importantes de considerar son los referentes a los resultados bacteriológicos. Para el caso de La Ciénega, se identifica la presencia de coliformes totales y para el caso del manantial Tochatl tenemos presencia de coliformes fecales, totales y *E. Coli*. Esto demuestra que el grado de contaminación de este último es mayor, presumiblemente por la presencia de los criaderos de peces.

La presencia de coliformes totales en el manantial de La Ciénega nos muestra que tenemos la presencia de enterobacterias que viven en el tracto intestinal de animales de sangre caliente, nos indica contaminación microbiana reciente sin informar de su origen y una deficiente calidad del agua. Es importante mencionar que los coliformes totales, no son específicos de contaminación fecal, excepto el género *Escherichia* (del cual no se tiene presencia).

Para el caso de Tochatl, al tener presencia de *Escherichia coli*, esto es un indicador específico de contaminación fecal en el agua, responsable de gastroenteritis. Su supervivencia en medios no entéricos es limitada, por lo que su presencia indica una contaminación reciente.

Podemos observar, además, que la calidad del agua del manantial Tochatl es ligeramente menor a la calidad del agua de La Ciénega. Hay que recordar que la muestra de este último se tomó cercana a la zona de criaderos de peces.

Indicadores de deterioro

Se observa a lo largo del registro histórico, una tendencia piezométrica a la baja, es decir, un proceso de profundización de los niveles del acuífero, lo que puede deberse, tanto a causas naturales como antropogénicas.

1. La pérdida de bosques en la Sierra Negra ha disminuido la recarga del acuífero en un orden de 8 millones de metros cúbicos.
2. Pérdida anual de volumen almacenado, de un orden de 25 millones de metros cúbicos.
3. Abatimiento promedio anual del acuífero: 35 cm.
4. Abatimiento medio anual de pozos circundantes a la zona de estudio: 28 cm.
5. Disminución de caudal, tanto en galerías filtrantes, como en manantiales. Se requiere un monitoreo continuo del caudal, tanto de las galerías, como de los manantiales, para medir dicho impacto.

Para el caso particular de la zona de estudio:

La zona de los manantiales de La Ciénega, dentro de su contexto geográfico, identifica los siguientes factores que podrían incidir en la disminución de su caudal:

- Factores naturales.
 - Regionales
 - Cambio climático global

o Locales

- Comparativamente, con otras microcuencas de la Sierra Negra, la cuenca, denominada 5, en el Estudio Hidrológico de 2010, presenta un sistema local de recarga mediante escurrimiento proveniente de microcuencas, que:
 - Corresponde a superficies con menor pendiente topográfica.
 - Menor longitud y área de captación por corriente.
 - Menor precipitación de la Sierra Negra.

Estos factores implican menor escurrimiento, favorable para su infiltración en la zona de aprovechamiento.

Posibles causas antropogénicas.

o Regionales

- La disminución del flujo subterráneo proveniente del acuífero del Valle de Tecamachalco, que se encuentra sobreexplotado, afecta en lo general al acuífero del Valle de Tehuacán.

o Intermedias

- La sobre - concesión de volúmenes para el aprovechamiento del acuífero.
- El aprovechamiento de agua sin un título de concesión, o por encima de los volúmenes concesionados.
- La concentración excesiva de aprovechamientos en la zona de recarga del manantial o en otras zonas de influencia.
- La intensificación del aprovechamiento de agua subterránea, mediante pozos y norias.
- Su zona de recarga presenta un proceso de deforestación crítico, de acuerdo con CONAFOR, siendo una zona sugerida para su restauración, toda vez que la tala desmedida y el cambio a uso de suelo agrícola de temporal, han promovido un proceso de desertificación, con incremento del coeficiente de escurrimiento y disminución de la infiltración al acuífero.

o Locales

- El posible incremento de captaciones subterráneas en las inmediaciones de los manantiales.
- La máxima concentración de volúmenes concesionados en la microcuenca en que se encuentran los manantiales, que es la más importante del acuífero del Valle de Tehuacán, ya que es en la cual confluye la mayor descarga de los afluentes.

Conclusión

El levantamiento topográfico de la zona de La Ciénega, nos indica que sus pendientes más altas se localizan hacia el norte y, las más bajas, que se mantienen constantes, se localizan en el sur. Lo anterior, ha propiciado arrastre de material acumulándose dentro del manantial La Ciénega. Del análisis se tiene como resultado un acumulado de **966.74 m³** de sedimento en el cuerpo de agua La Ciénega, correspondiente a **1,401.77** toneladas.

Los resultados del análisis de los sedimentos realizados en el laboratorio de Catálisis de la BUAP nos indican que la muestra presentó fuertes cantidades de SiO₂, resultado esperado por la presencia de arena (80%). Se presentan además compuestos de calcio, tal vez debido a la disolución de piedras tipo mármol y alabastro, así como la presencia de fuertes cantidades de carbón orgánico, mismo que proviene de la descomposición de los residuos vegetales y animales y actúa como la principal fuente de nutrientes para los microorganismos y las plantas.

Por otra parte, no se tiene presencia de elementos como litio y aluminio; ni de mercurio, plomo y cadmio (metales peligrosos).

Como resultado de este estudio, se determinó, además, un caudal en conjunto de 536.24 litros por segundo. Es conveniente y necesario, disponer de registros para otros períodos, es decir, datos a futuro, para conocer el comportamiento de los manantiales.

La calidad del agua del manantial presenta sólidos totales disueltos valores por arriba del límite máximo permisible (LMP) establecido en la NOM-127-SSA1-1994 Agua para uso y consumo humano. Misma situación se presenta para el carbonato de calcio. En cuanto al sodio, es común en el agua, ya que procede de rocas y de suelos que contienen este elemento. Para el caso de los cloruros, su presencia se debe principalmente a la elevada solubilidad de sales de cloruro presentes en rocas y debido a ello estos pasan rápidamente a la fase acuosa, de igual manera el agua de lluvia es una fuente importante de ion Cl⁻.

Los resultados obtenidos en el presente estudio concuerdan con los resultados mencionados en la Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Tehuacán, estado de Puebla, 2020 (CONAGUA, 2020). Donde se menciona que en el estudio realizado en 2009, los sólidos disueltos se encontraban por arriba de la NOM, con valores hasta de 2,300 mg/l, así como que la concentración de cloruros variaba de 40 a 700 mg/l, encontrando un máximo en San Sebastián Zinacatepec, por lo que también se rebasaba el LMP de 250 mg/l.

Uno de los parámetros importantes de considerar son los referentes a los resultados bacteriológicos. Para el caso de La Ciénega se identifica la presencia de coliformes totales y para el caso del manantial Tochatl tenemos presencia de coliformes fecales, totales y *E. Coli*. Esto demuestra que el grado de contaminación de este último es mayor, presumiblemente por la presencia de los criaderos de peces.

Como se comentó con anterioridad, el principal uso del agua subterránea es el agrícola, que representa el 78.0% de la extracción total, seguido del uso público urbano que corresponde al 18.2%. Las principales fuentes son pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales.

Los mayores abatimientos se presentan hacia la localidad de Ajalpan, donde el nivel del agua subterránea ha descendido 21.4 metros en el período de 1996 a 2008, lo que representa abatimientos de 1.8 metros por año.

De las mediciones piezométricas 2008 – 2017 se denota un abatimiento medio anual del acuífero de 35 cm. Esto implica una pérdida próxima de 23 hm³ por año.

Para las piezometrías del año 2021 de los pozos próximos a La Ciénega y comparando únicamente los pozos que cuentan con información tanto para 2017 como para 2021, se identificó que continúa la tendencia de abatimiento del nivel estático, ya que para 2017 se tenía un promedio de 37.5 m de profundidad y para 2021 se presentó una profundidad promedio de 38.64, lo que representa un incremento en la profundidad de 1.146 m, lo que equivale a 0.2865 m por año; situación que denota un proceso de incremento en la demanda del acuífero en comento.



9

**PROPUESTAS ALTERNATIVAS DE
RESTAURACIÓN INTEGRAL DEL ACUÍFERO**



9. Propuestas alternativas de restauración integral del acuífero

La restauración ecológica, según la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica, consiste en asistir a la recuperación de ecosistemas que han sido degradados, dañados o destruidos (Balaguer, 2013). Ofrece la oportunidad de reparar los daños ecológicos, renovar oportunidades económicas, rejuvenecer prácticas culturales y mejorar la capacidad ecológica y social de adaptarse a cambios ambientales (Cairns, Dudley, Hall, Keeneleyside & Stolton, 2014).

Las propuestas de alternativas de restauración del acuífero planteadas en este capítulo tienen como objetivos asociados contribuir a la conservación de la biodiversidad y el bienestar humano de las comunidades de la región, fortalecer la conectividad del ecosistema, mejorar las oportunidades de experiencia de los visitantes y mejorar los servicios ecosistémicos. Como resultado, se contribuiría a mejorar la resiliencia al cambio climático.

El capítulo está estructurado en el siguiente orden:

1. Se inicia con la revisión de las acciones prioritarias del Plan de Manejo existente del acuífero del Valle de Tehuacán.
2. Continúa con una propuesta de zonificación del acuífero.
3. Se proponen alternativas de restauración acordes con la nueva zonificación.

9.1 Revisión del Plan de Manejo existente

Se sugiere primordialmente actualizar el Plan de Manejo del acuífero del Valle de Tehuacán y crear un Reglamento del Acuífero. Esta tarea es requerida para definir una zonificación y establecer reglas para proteger y promover la funcionalidad de cada zona del acuífero.

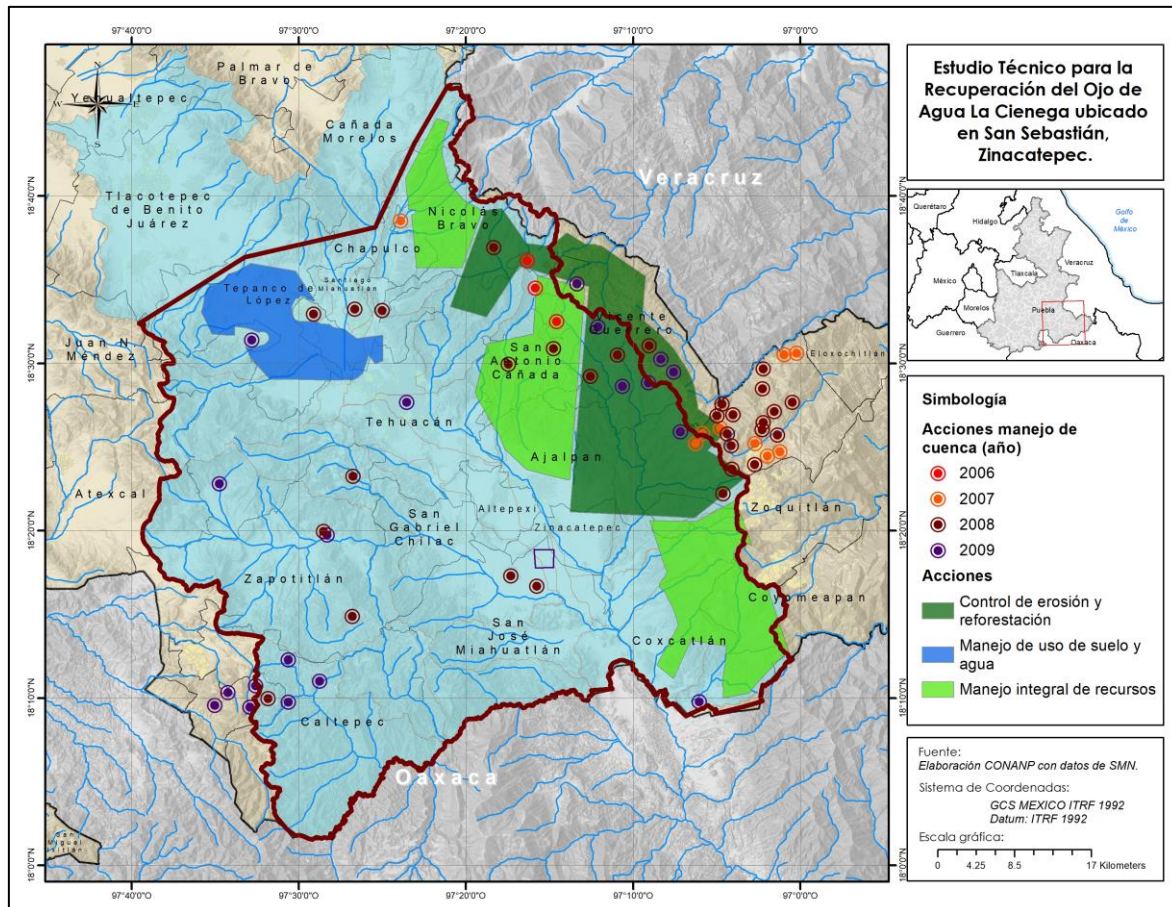
Del Plan de Manejo existente, se identifican las siguientes acciones prioritarias:

I. Protección y restauración de microcuencas

- a. Protección de cuencas. Es necesario detener los procesos de cambio de uso de suelo, que disminuyen la superficie de bosque en la Sierra Negra y la transforman en áreas de agricultura de temporal. Dicho cambio de uso de suelo se acompaña de procesos de deforestación, que conllevan una disminución de retención de humedad en la cuenca, así como un menor escurrimiento.

Entre las acciones estratégicas para la restauración integral del acuífero destacan las acciones para control de erosión y la reforestación en la Sierra Negra.

Mapa 9.1 Acciones de manejo de cuenca 2006 – 2009.



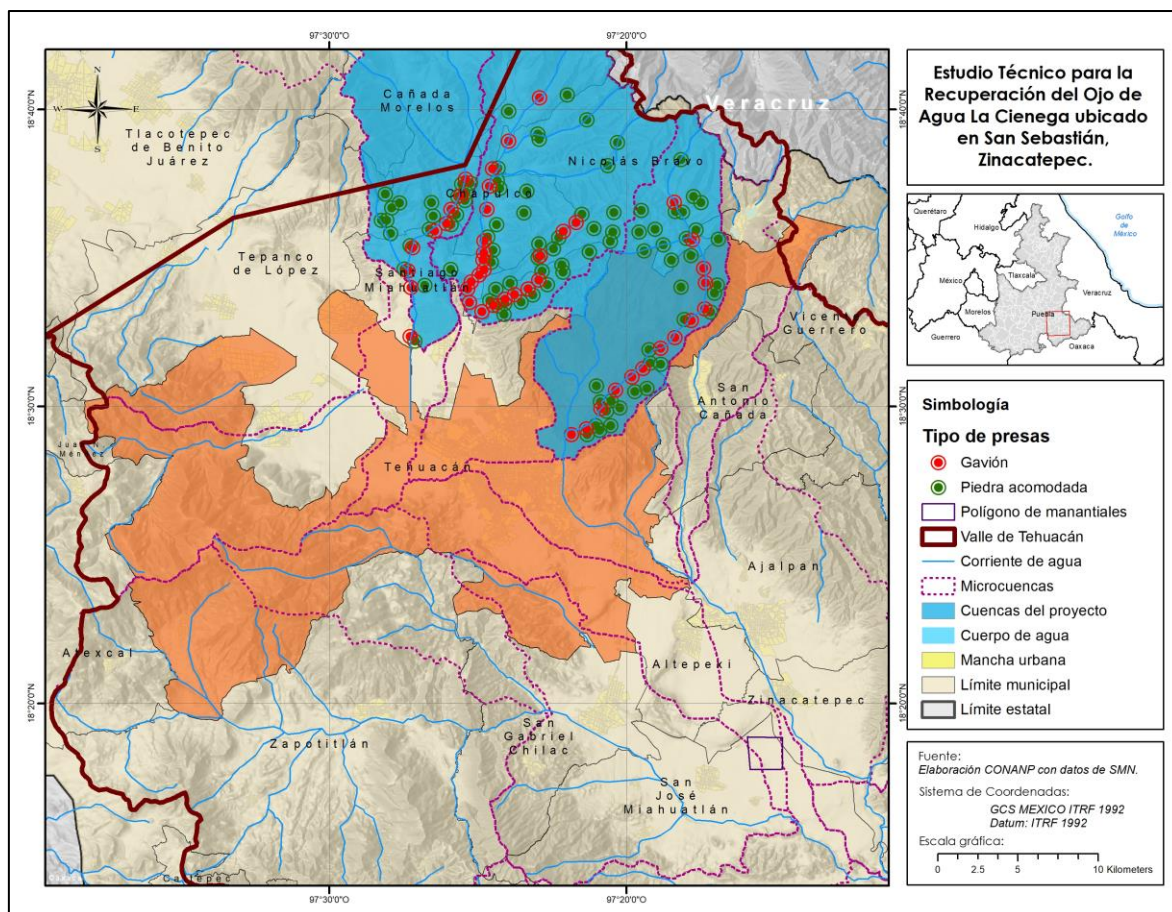
Fuente: Elaboración CONANP con datos de SMN.

Igualmente se recomienda llevar acciones para favorecer la recarga con agua pluvial en la Sierra Negra, las cuales cuentan ya con propuestas en años pasados.

- b. Restauración de cuencas. A través de actividades de reforestación y manejo de cuencas en general. Con ello se protegerá y recuperará la recarga del acuífero.
 - i. Proyectos y obras, para incrementar la recarga natural, tanto pluvial como fluvial.

En el siguiente mapa 9.2 se muestra la ubicación de presas de gaviones, para favorecer la recarga del acuífero en las microcuencas de la Sierra Negra, próximas al Valle de Tehuacán.

Mapa 9.2 Presas de gavión en Sierra Negra.



Fuente: Elaboración CONANP con datos de SMN.

2. Protección de manantiales y galerías filtrantes.
 - a. Estudio de delimitación y demarcación de zonas de recarga de manantiales y galerías.
 - b. Definición de acciones de protección.
3. Protección de la calidad del agua subterránea
 - a. Estudio de vulnerabilidad intrínseca y riesgo potencial de contaminación del acuífero.
 - b. Saneamiento de cauces y cañadas.
 - c. Tratamiento de agua residual.
4. Control del aprovechamiento de agua subterránea
 - a. Actualización del censo, para evitar la existencia de captaciones irregulares.
 - i. Medidas de autoridad para asegurar la existencia única, de captaciones regulares y con derecho.
 - b. Implementación de métodos de medición y estimación de extracciones de agua subterránea.
 - i. Instalación de medidores volumétricos en aprovechamientos, primordialmente en los de mayor caudal.
 - ii. Estimación de consumos de agua a partir de consumos de energía u otras técnicas indirectas.
5. Fortalecimiento de la participación de usuarios y de la sociedad organizada.
6. Complementación de estudios y proyectos.

9.2 Zonificación

Para garantizar el éxito de las medidas de restauración es necesario que los gestores de su implementación trabajen en conjunto con los grupos interesados dentro y fuera de los límites del área a restaurar.

La zonificación del acuífero Valle de Tehuacán tuvo como propósito determinar zonas relativamente homogéneas en cuanto a su comportamiento y características intrínsecas con vistas a establecer un plan de manejo con base en su fragilidad, limitantes y potencialidades. Los pasos para la zonificación

se dividen en 2 grandes rubros: generación de cartografía de los criterios de zonificación y zonificación según aptitud intrínseca del territorio.

Generación de cartografía de los criterios de zonificación

El primer paso fue la obtención de la capa del acuífero Valle de Tehuacán, del conjunto de datos de aguas subterráneas de la zona hidrogeológica Tehuacán, escala 1:250,000, del INEGI.

Posteriormente, se elaboraron los mapas con los criterios para la zonificación del acuífero, con base en el conjunto de datos vectoriales disponibles del INEGI, los cuales se indican en la tabla 9.1 a continuación.

Tabla 9.1 Información cartográfica temática utilizada para la construcción de los criterios de zonificación del acuífero Valle de Tehuacán.

Categoría	Información cartográfica temática	Información obtenida
Aptitud de uso de suelo	-Conjunto de datos vectoriales de la cartografía de Uso potencial de las tierras, escala 1:1 000 000, edición 2016, INEGI.	-Uso potencial agrícola -Uso potencial forestal -Uso potencial pecuario -Requerimientos de riego
Aptitud hídrica	-Conjunto de datos de aguas subterráneas de la zona hidrogeológica Tehuacán, escala 1:250,000, 2012, INEGI.	-Áreas de recarga y zonas de extracción -Vulnerabilidad -Transmisividad y recarga potencial
Zonas prioritarias	-Sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad, escala 1:1 000 000, 2009, CONABIO. -Regiones hidrológicas prioritarias, escala 1:4 000 000, 2002, CONABIO. -Manantiales La Ciénega, Tochatl y San Pedro	-Sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad -Regiones hidrológicas prioritarias -Buffer de 200 m alrededor de los manantiales La Ciénega, Tochatl y San Pedro
Erosión	- Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I Continuo Nacional, 2014, INEGI.	-Tipo, forma y grado de erosión -Factores nocivos

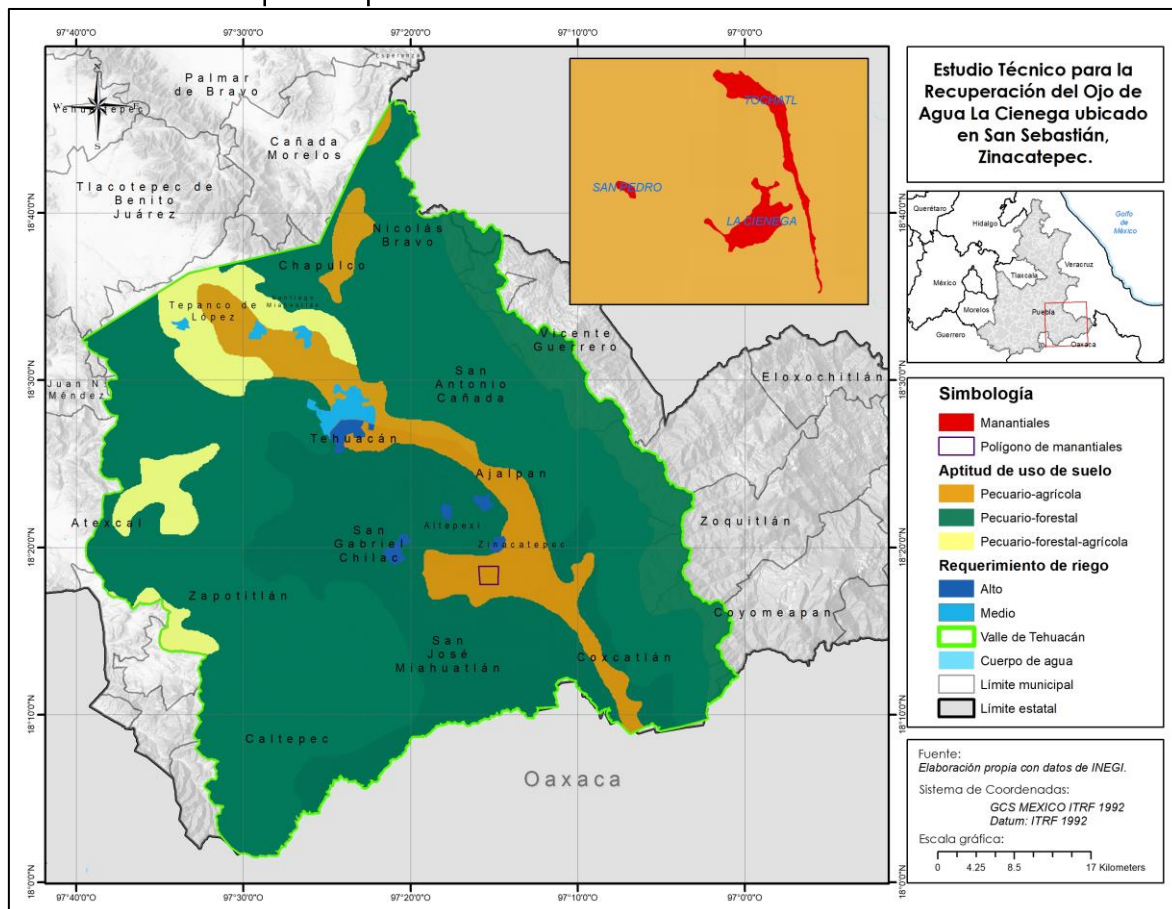
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Aptitud de uso de suelo

Se utilizó para identificar las zonas con aptitud de uso agrícola, pecuario y forestal, así como los requerimientos de riego que necesitarían los cultivos.

De acuerdo con la información proporcionada por INEGI, las zonas aptas para agricultura incluyen tierras aptas para agricultura mecanizada continua, agricultura manual estacional y agricultura con tracción animal continua; las zonas con aptitud para la actividad ganadera incluyen tierras aptas para el desarrollo de praderas cultivadas y para el aprovechamiento de la vegetación natural; y las zonas de uso potencial forestal son tierras aptas para uso forestal doméstico y comercial.

Mapa 9.3 Aptitud del uso de suelo del acuífero de Tehuacán.

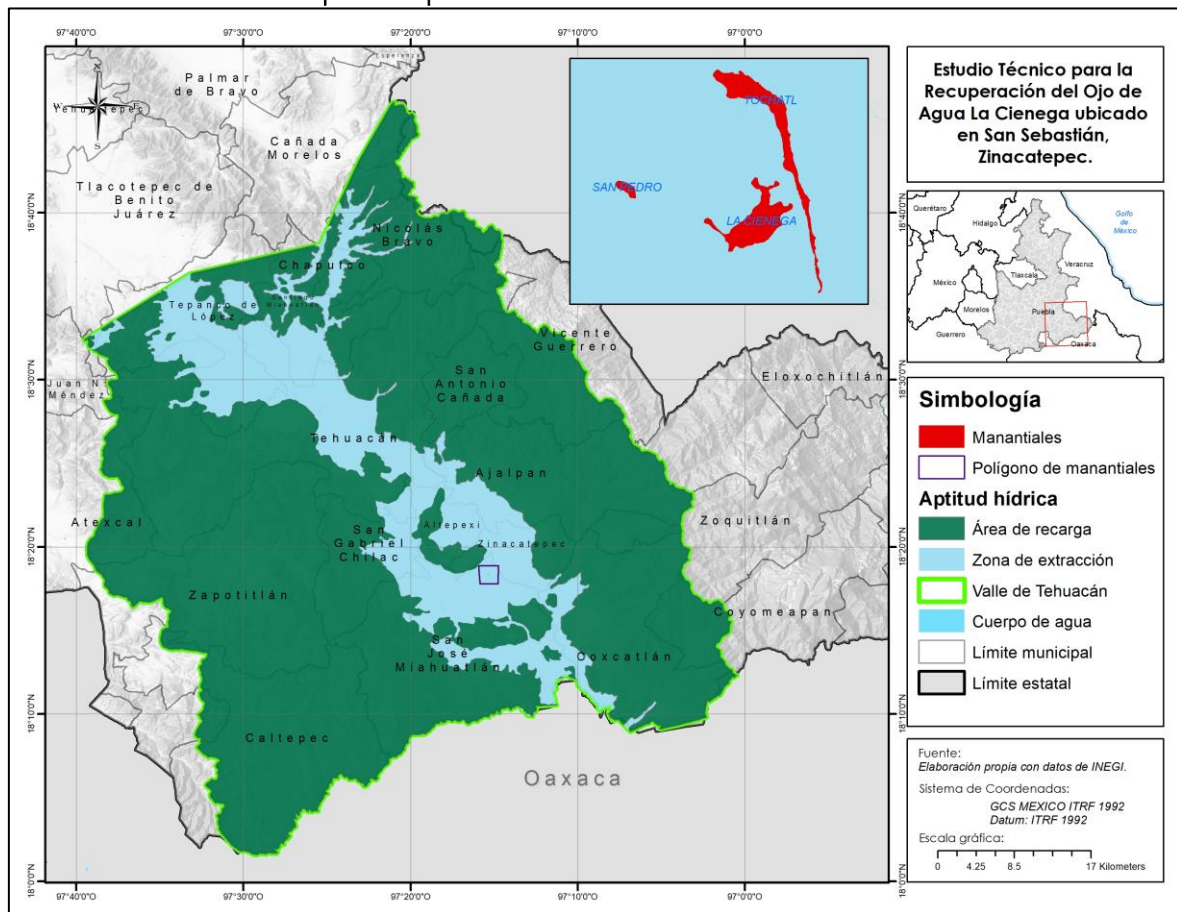


Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Aptitud hídrica

En el mapa 9.4 de aptitud hídrica se identificaron las zonas de recarga y de extracción en el acuífero. Esta distinción entre la zona de explotación o extracción del agua subterránea y su área de influencia o zona de recarga, es el producto de la aplicación de la metodología correspondiente desarrollada por el Departamento de Hidrología, que tiene como finalidad el estudio y evaluación del estado de preservación que guarda el recurso agua en cada zona hidrogeológica del país.

Mapa 9.4 Aptitud hídrica del acuífero de Tehuacán.

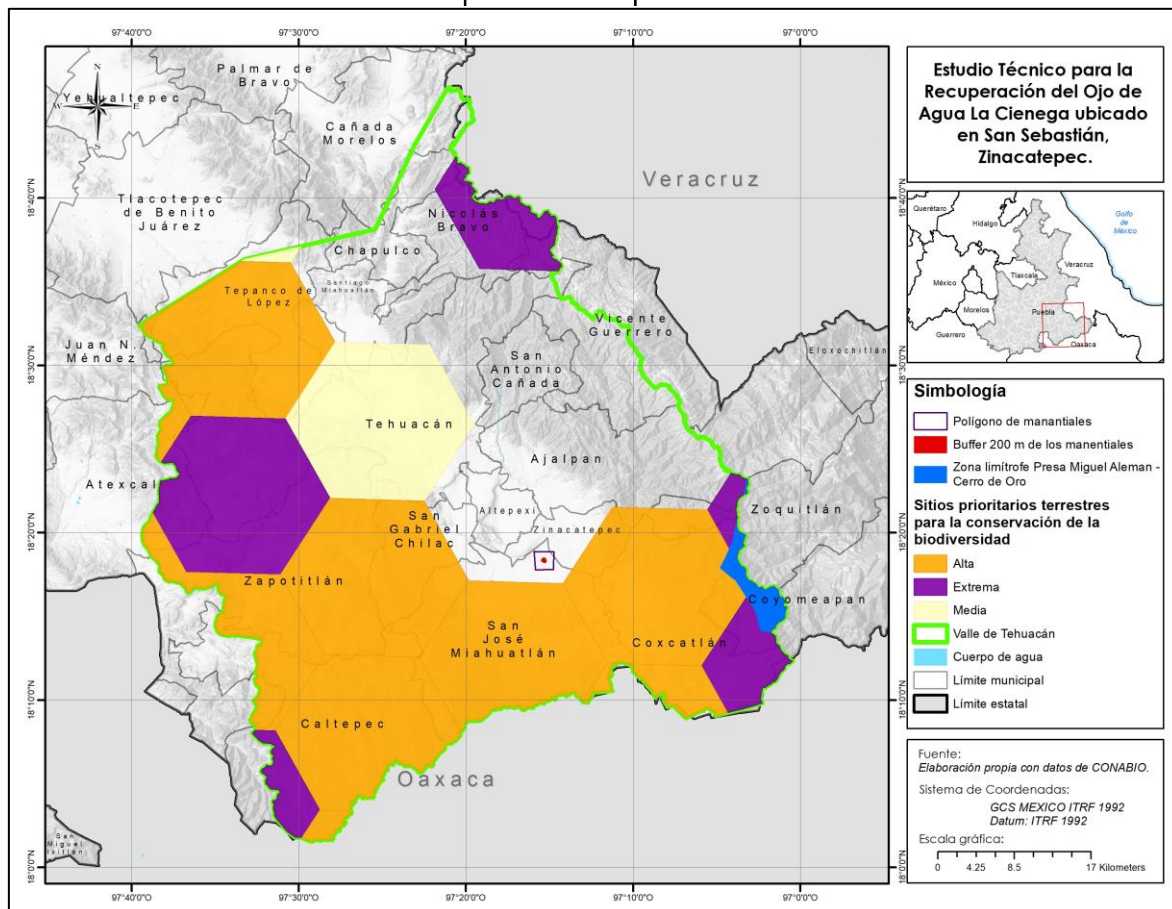


Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Zonas prioritarias

En el caso de las zonas ambientalmente valiosas dentro del acuífero, se encontraron sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad y una sección colindante a la región hidrológica prioritaria "Presa Miguel Alemán – Cerro de Oro". También se aplicó un buffer de 200 m de radio alrededor de los manantiales La Ciénega, Tochatl y San Pedro para proponer estas áreas como zonas de restauración. Es importante establecer limitaciones al uso ya que la pérdida de servicios ambientales de los manantiales se debe en gran parte al desmonte de la superficie circundante por actividad humana, la cual origina aportes de sedimentos hacia estos, azolvándolos.

Mapa 9.5 Zonas prioritarias.



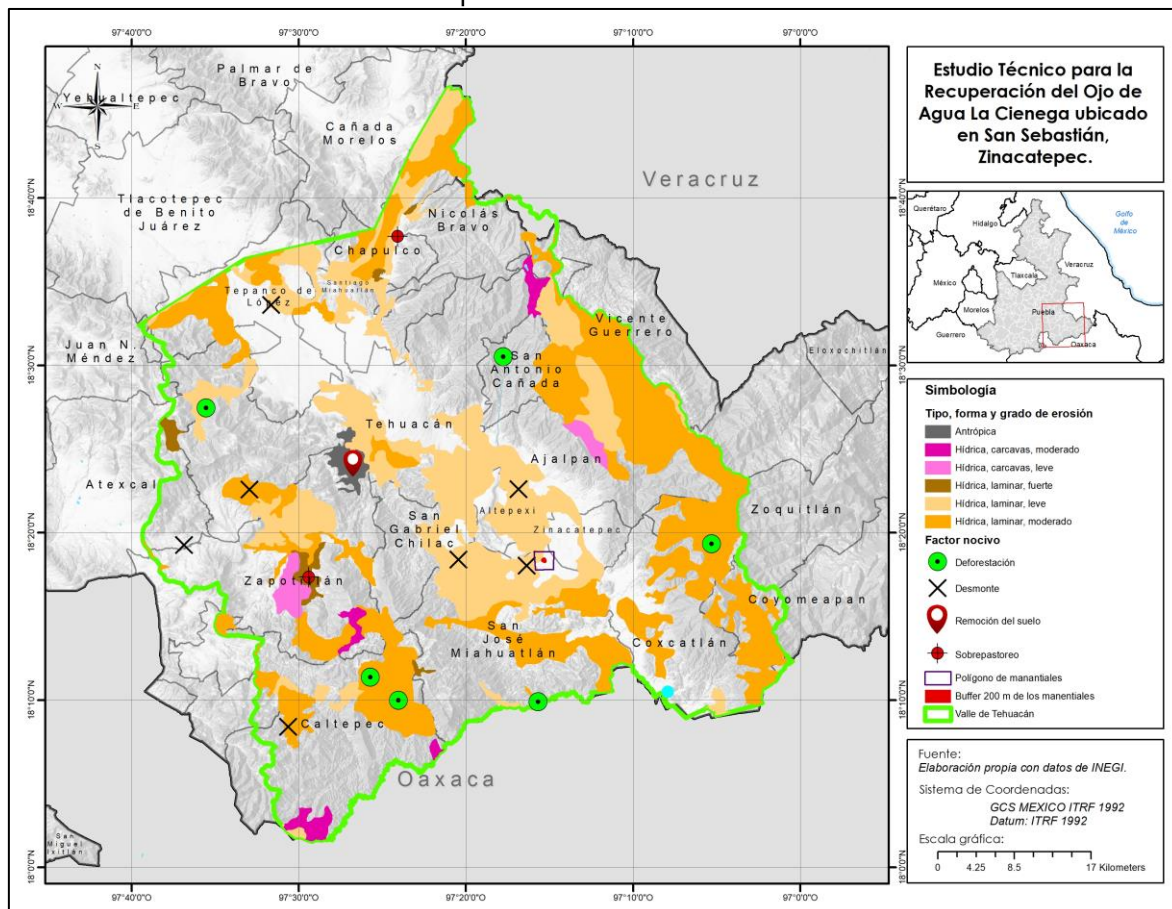
Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO.

Erosión

Para definir zonas adicionales con necesidad de restauración se usó la información del INEGI del Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I Continuo Nacional.

A partir de esta información se identificaron los tipos, formas y grados de erosión, así como los factores nocivos o los elementos que pueden ser la causa directa o indirecta de la erosión. En el acuífero se encontró erosión antrópica, hídrica en forma de cárcavas moderada y leve, e hídrica laminar fuerte, moderada y leve. En cuanto a los factores nocivos se encontraron la deforestación, el desmonte, la remoción del suelo y el sobrepastoreo.

Mapa 9.6 Zonas de Erosión.



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Zonificación según aptitud intrínseca del territorio

La zonificación propuesta presenta las siguientes características:

- Zonas para protección: Comprende sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad, las regiones hidrológicas prioritarias colindantes y zonas consideradas valiosas.
- Zonas para aprovechamiento o manejo: Los usos y actividades que se ejecuten en esta zona no requieren precauciones o medidas especiales.
- Zonas para conservación: Comprende zonas de aprovechamiento con limitaciones al uso, dados por el nivel de pendientes, considerándose sectores frágiles.
- Zonas de restauración: Son sectores del acuífero que requieren de una restauración ecológica.

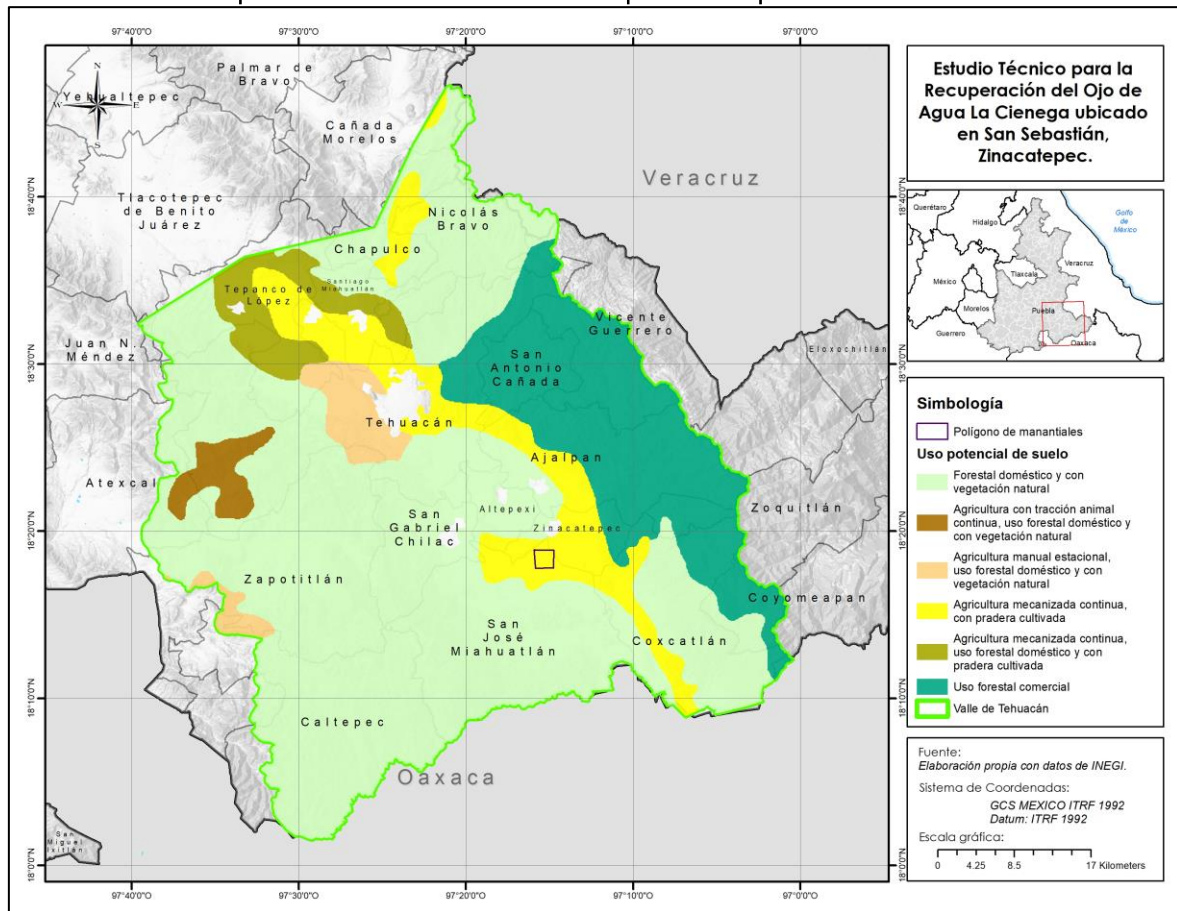
A continuación se mostrará la zonificación y los criterios utilizados de acuerdo a cada una de las categorías de aptitud de uso de suelo, aptitud hídrica, de las zonas prioritarias y con erosión.

Tabla 9.2 Criterios de zonificación para la categoría de aptitud de uso de suelo.

Categoría	Criterios	Zona
Aptitud de uso de suelo	Tierras aptas para uso forestal comercial	Conservación
	Tierras aptas para uso forestal doméstico y con vegetación natural	Conservación
	Tierras aptas para agricultura con tracción animal continua, uso forestal doméstico y con vegetación natural	Conservación
	Tierras aptas para agricultura manual estacional, uso forestal doméstico y con vegetación natural	Conservación
	Tierras aptas para agricultura mecanizada continua con pradera cultivada	Aprovechamiento
	Tierras aptas para agricultura mecanizada continua, uso forestal doméstico y con pradera cultivada	Aprovechamiento

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Mapa 9.7 Criterios de zonificación por el uso potencial del suelo.



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Para zonificar la aptitud hídrica se usaron como criterios las áreas de recarga, las zonas de extracción, la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, su transmisividad y recarga potencial.

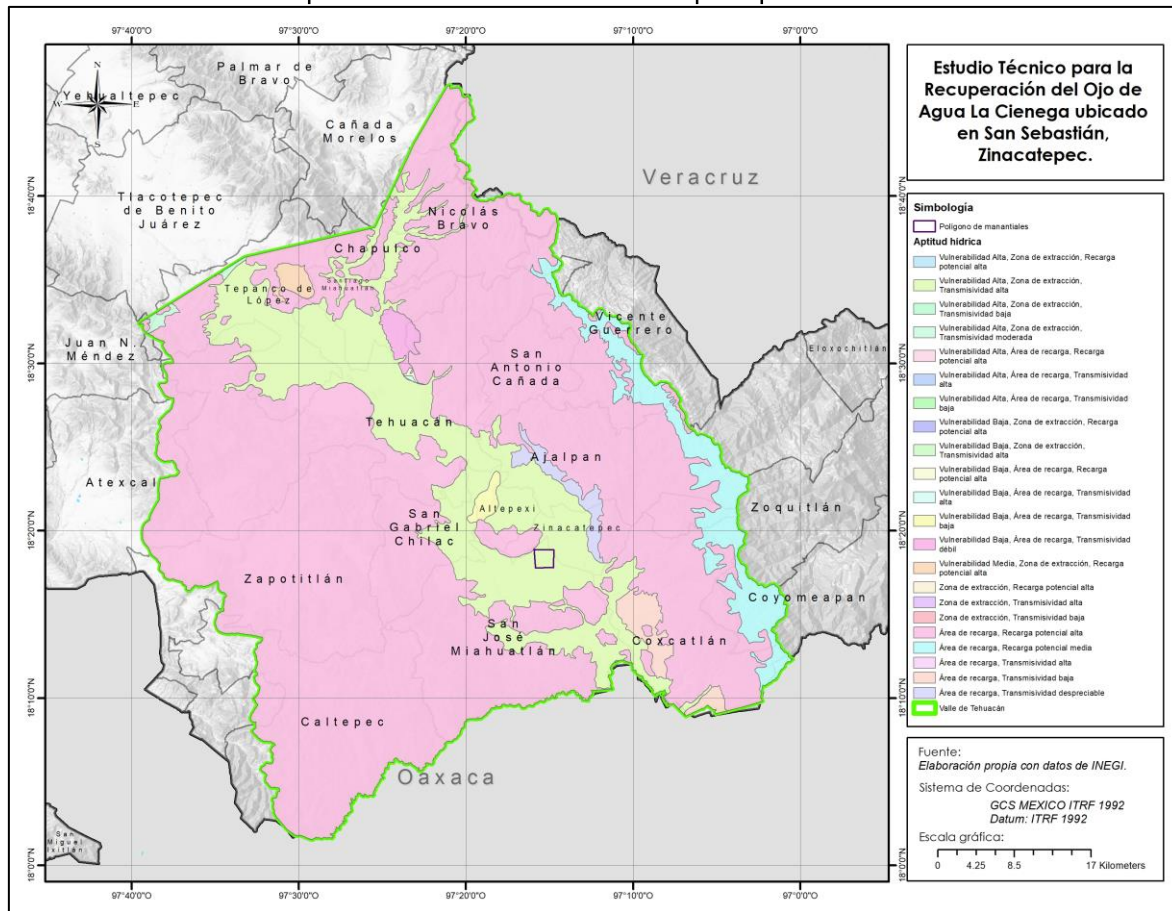
De acuerdo con la información proporcionada por el INEGI, para determinar la vulnerabilidad a la contaminación se usó el método GOD modificado. Hasta esta etapa de la metodología, las zonas con vulnerabilidad alta se identificaron como zonas de protección o restauración. La resolución final entre zona de protección o restauración se hizo posteriormente, con el mapeo de las zonas erosionadas.

Tabla 9.3 Criterios de zonificación para la categoría de aptitud hídrica.

Categoría	Criterios	Zona
Aptitud hídrica	Área de recarga potencial alta	Protección
	Área de recarga potencial media	Conservación
	Área de recarga con transmisividad alta	Conservación
	Área de recarga con transmisividad baja	Conservación
	Área de recarga con transmisividad despreciable	Conservación
	Zona de extracción con recarga potencial alta	Conservación
	Zona de extracción con transmisividad alta	Conservación
	Zona de extracción con transmisividad baja	Conservación
	Vulnerabilidad alta, área de recarga potencial alta	Protección / Restauración
	Vulnerabilidad alta, área de recarga con transmisividad alta	Protección / Restauración
	Vulnerabilidad alta, área de recarga con transmisividad baja	Protección / Restauración
	Vulnerabilidad alta, zona de extracción con recarga potencial alta	Protección / Restauración
	Vulnerabilidad alta, zona de extracción con transmisividad alta	Protección / Restauración
	Vulnerabilidad alta, zona de extracción con transmisividad baja	Protección / Restauración
	Vulnerabilidad alta, zona de extracción con transmisividad moderada	Protección / Restauración
	Vulnerabilidad baja, área de recarga potencial alta	Conservación
	Vulnerabilidad baja, área de recarga con transmisividad alta	Conservación
	Vulnerabilidad baja, área de recarga con transmisividad baja	Conservación
	Vulnerabilidad baja, área de recarga con transmisividad débil	Conservación
	Vulnerabilidad baja, zona de extracción con recarga potencial alta	Conservación
Vulnerabilidad baja, zona de extracción con transmisividad alta	Conservación	
Vulnerabilidad media, zona de extracción con recarga potencial alta	Conservación	

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Mapa 9.8 Criterios de zonificación por aptitud hídrica.



Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Respecto a las zonas prioritarias, los criterios de zonificación fueron los siguientes:

Tabla 9.4 Criterios de zonificación para la categoría de zonas prioritarias.

Categoría	Criterios	Zona
Zonas prioritarias	Buffer a 200 m de los manantiales	Restauración
	Zona limítrofe a región hidrológica prioritaria	Protección
	Sitios de prioridad extrema para la conservación de la biodiversidad	Protección
	Sitios de prioridad alta para la conservación de la biodiversidad	Conservación
	Sitios de prioridad media para la conservación de la biodiversidad	Conservación

Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO.

Finalmente, a partir de los tipos, formas y grados de erosión se identificaron zonas de restauración y de conservación.

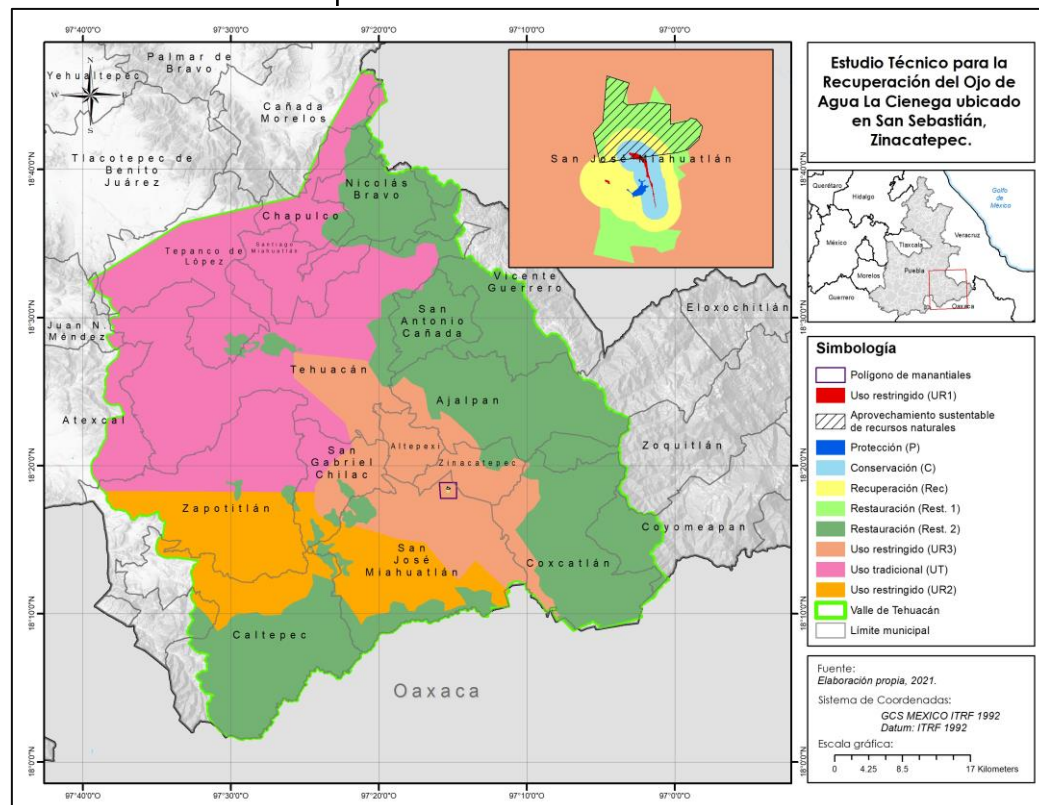
Tabla 9.5 Criterios de zonificación para la categoría de zonas prioritarias.

Categoría	Criterios	Zona
Erosión	Antrópica	Restauración
	Hídrica, cárcavas, moderado	Restauración
	Hídrica, cárcavas, leve	Conservación
	Hídrica, laminar, fuerte	Restauración
	Hídrica, laminar, moderado	Restauración
	Hídrica, laminar, leve	Conservación

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

Posterior a la clasificación de las zonas según los criterios previamente mostrados para las categorías de aptitud de uso de suelo, aptitud hídrica, zonas prioritarias y erosión, se usó la herramienta de unión del software ArcMap para zonificar el acuífero de acuerdo con sus unidades de paisaje. Como resultado, se obtuvieron zonas de protección, de uso restringido, de uso tradicional, de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, de recuperación, conservación y restauración.

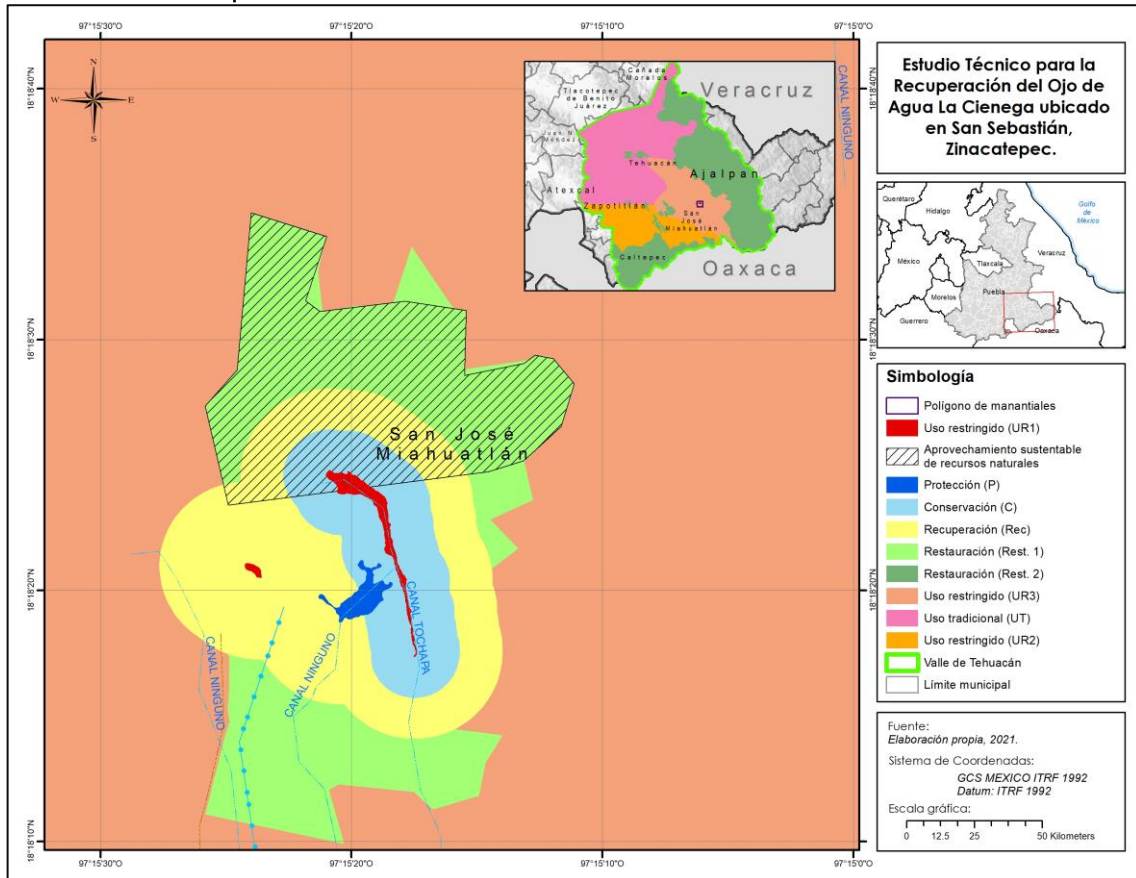
Mapa 9.9 Zonificación a nivel acuífero.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

La zonificación en el área circundante a los manantiales sería la siguiente:

Mapa 9.10 Zonificación del área circundante a los manantiales.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

9.3 Alternativas de restauración

A partir de la zonificación según la aptitud intrínseca del territorio y sus unidades de paisaje, a nivel acuífero, se obtuvieron 2 zonas de restauración, una circundante a los manantiales (Rest. 1) y otra en las áreas forestales en la parte alta y media del acuífero (Rest.2).

Zona de Restauración I (Rest. I)

La zona de restauración I (Rest. I) se ubica dentro del municipio San José Miahuatlán, abarca un área de 0.21 km², comprende las áreas forestales adyacentes a los manantiales, cuenta con zonas de erosión hídrica laminar leve y se caracteriza por ser zonas de extracción de agua con transmisividad y vulnerabilidad alta.

Como alternativas de restauración para esta zona se proponen:

I. Implementación de un método de almacenamiento y recuperación de acuíferos (ARA) con un esquema de gestión de recarga de acuíferos (GRA).

ARA/GRA son herramientas comunes para la gestión integrada del agua. El almacenamiento y recuperación de acuíferos (ARA) es un método probado para incrementar el suministro de agua por medio del uso de embalses subterráneos. La reposición de las aguas subterráneas o el aumento del agua subterránea almacenada en acuíferos durante periodos húmedos puede contribuir a mejorar la seguridad y la sostenibilidad del suministro de agua. El agua recuperada puede ser utilizada para el abastecimiento de agua potable, riego y proyectos de restauración de ecosistemas, con lo que se suele completar el abastecimiento de agua superficial. De acuerdo con Daus (2019), económicamente, el método ARA puede ser más barato y fácil de implementar que otros métodos de almacenamiento, además de ser muy rentable en comparación con el desarrollo de fuentes alternativas de agua.

El método ARA generalmente se combina con otros tipos de esquemas de gestión de recarga de acuíferos (GRA), útiles para mantener o mejorar los suministros de agua dulce o mitigar la baja calidad del agua superficial.

La Gestión de la Recarga de Acuíferos y la captación de agua de lluvia involucra, en su forma más simple, restringir la escorrentía superficial y favorecer la infiltración hacia los acuíferos a través de la construcción de montículos de tierra en los campos (González, 2017).

Hay tres grupos de métodos basados en infiltración para recargar acuíferos no confinados:

- 1) Fuera del cauce
- 2) Dentro del cauce
- 3) Pozos secos

Tabla 9.6 Métodos basados en infiltración para recarga de acuíferos no confinados.

Grupo de método de infiltración	Método	Descripción
Fuera del cauce	Piscinas de infiltración	Se desvía el agua superficial del cauce, por gravedad o bombeo, y se recolecta en una o más piscinas de poca profundidad y de gran área de superficie. Normalmente se requiere una tasa de infiltración de ≥ 0.5 m/día
	Tratamiento suelo-acuífero	Es una variación del método de piscinas de infiltración, que generalmente se aplica a la recarga del efluente de aguas residuales tratadas. El agua se recarga de forma intermitente utilizando ciclos húmedos y secos para facilitar la eliminación de nutrientes y patógenos.
	Galerías de infiltración	Son zanjas de percolación cubiertas que contienen el material de suelo o una estructura de soporte con espacios vacíos internos para facilitar la infiltración.
	Zanjas de infiltración	Son canales construidos en laderas que tienen el objetivo de captar el escurrimiento de agua, evitar procesos erosivos y conservar el suelo y el agua. Son relativamente poco profundas y permiten la infiltración de agua en el suelo, pero también pueden recargar los acuíferos poco profundos y no confinados.
	Canales de infiltración	Canales que desvían y capturan la escorrentía de aguas pluviales proveniente de las laderas altas y zonas afectadas por la erosión, llevándola hasta áreas protegidas y de baja pendiente, para conservar el suelo y facilitar la infiltración adicional de agua.
Dentro del cauce	Estanques de percolación	Construcciones en ríos intermitentes, donde el agua se detiene y se infiltra en el lecho para aumentar el almacenamiento en acuíferos no confinados. La técnica es más efectiva cuando el curso del agua es relativamente estrecho y la topografía adyacente permite construir muros de represas.
	Represas subterráneas	Se construye una zanja a través del lecho del río y se excava en la roca madre que luego se rellena con material de baja permeabilidad para ayudar a retener los flujos en el material aluvial saturado.
	Descargas de aguas de represas	Uso de represas en ríos intermitentes para detener y liberar el agua lentamente aguas abajo, lo que coincide con la capacidad de infiltración a través del lecho del río al acuífero y por ende la recarga aumenta significativamente.
Pozos secos	Pozos secos	Técnica de infiltración que usa pozos de gran diámetro para recargar un acuífero no confinado por gravedad. Es un método útil para emplear cuando hay capas de suelos de

Grupo de método de infiltración	Método	Descripción
		baja permeabilidad (por ejemplo, ricos en arcilla) en los primeros metros de superficie.

Fuente: Comisión Nacional de Riego de Chile (s.f.).

A continuación, se presenta una comparación entre los diferentes criterios de selección para los diferentes grupos de métodos:

Tabla 9.7 Criterios de selección del método de recarga.

Método de recarga	Costo de inversión	Baja permeabilidad de suelo	Requerimiento de calidad de agua	Superficie requerida
Fuera del cauce				
Piscinas de infiltración	*	X	**	***
Galerías de infiltración	***	✓	***	**
Tratamiento suelo-acuífero (SAT)	**	X	*	***
Canales de infiltración (existentes)	*	X	*	*
Zanjas de infiltración	*	X	*	**
Dentro del cauce				
Estanques de percolación	**	X	**	**
Represas subterráneas	***	X	*	**
Descarga de agua de represa	*	X	*	*
Pozos secos				
Pozos secos (de la zona vadosa)	***	✓✓	***	*

* Bajo; ** mediano; *** alto; X no adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad; ✓ adecuado para penetrar capas poco profundas de baja permeabilidad; ✓✓ adecuado para penetrar capas profundas de baja permeabilidad.

Fuente: Comisión Nacional de Riego de Chile (s.f.).

De los diferentes esquemas ARA/GRA se propone iniciar con un desarrollo de bajo impacto, que incluya la recarga y colecta de aguas pluviales, sin grandes alteraciones al terreno. Este esquema puede tener un efecto significativo en los recursos hídricos locales a través de la percolación de agua de la superficie para aumentar el suministro de agua subterránea local (Daus, 2019).

A partir del análisis previo de las características de los métodos de recarga de acuíferos no confinados y de los criterios de selección, se propone implementar zanjas de infiltración, ya que requieren un bajo costo de inversión, no requieren de un control estricto de la calidad del agua, la superficie requerida es de baja a mediana y los suelos presentes son de alta transmisividad.

Las zanjas de infiltración suelen construirse perpendiculares a la pendiente del terreno (pendientes de 10 a 40 % de inclinación), con un trazado paralelo a las curvas de nivel, dejando un pequeño terraplén en un margen construido con el material excavado y normalmente estabilizado mediante la plantación de vegetación. Típicamente las dimensiones son 40 cm de ancho de la base y 40 cm de profundidad (Comisión Nacional de Riego de Chile (s.f.)).

La zanja se debe construir aguas arriba de la zona que se desea conservar. El bordo se debe formar aguas abajo, con el producto del suelo extraído mínimo a 10 centímetros de distancia de la zanja. Es conveniente compactar el bordo formado para evitar que el agua arrastre el suelo. De ser posible, se recomienda coronarlo con vegetación para darle mayor estabilidad (CONAFOR, 2007).

No obstante, la decisión final sobre qué método aplicar dependerá de una serie de factores que incluyen el costo, el suelo y las condiciones hidrogeológicas locales, la calidad de la fuente de agua y el área de terreno disponible, entre otros factores potenciales.

Asimismo, deberá asegurarse el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.

2. Programa de saneamiento de los manantiales.

Esta propuesta busca recuperar el estado natural de los manantiales, para promover la biodiversidad, la gestión de crecidas, la recreación y desarrollo del paisaje.

Como primer paso, para recuperar el espacio de los manantiales, se propone la remoción de sedimentos de fondo, con técnicas de bajo impacto a la fauna presente. En esta etapa se debe hacer uso de los datos disponibles de profundidad a diferentes zonas de los manantiales, también se sugiere apoyarse de los datos históricos y fotografías previas de la zona.

Como segundo paso, se deben eliminar las causas que dirigen el arrastre de suelo hacia los manantiales o mitigar sus efectos, en otras palabras, reducir la erosión hídrica laminar.

Las obras de conservación del suelo recomendadas para erosión laminar son terrazas, zanjas y prácticas vegetativas.

Tabla 9.8 Obras de conservación de suelo recomendadas para erosión hídrica laminar.

Categoría	Tipo	Descripción	Beneficios	Condiciones	Sugerencias
Terrazas	Terrazas de muro vivo	Son terraplenes que se forman gradualmente, a partir del movimiento de suelo que se da durante las labores de cultivo en terrenos de ladera y es retenido por setos de diversas especies de árboles o arbustos que se establecen siguiendo curvas a nivel	-Controlan el escurrimiento superficial a velocidades no erosivas y lo dirigen hacia una salida estable. -Impiden la formación de cárcavas. -Favorecen una mayor infiltración. -Aportan materia orgánica al suelo. -Mejoran el paisaje.	-Para terrenos preferentemente forestales. -Utilizar especies de rápido crecimiento, que no compitan por luz con los cultivos y de fuerte desarrollo radical.	-Plantar especies forestales maderables que se adapten a la zona, o bien especies frutales de las cuales se pueda obtener un ingreso adicional.
	Terrazas de formación sucesiva	Son terraplenes que se forman por el movimiento del suelo entre los bordos de tierra. Éstos detienen el suelo que proviene del área entre terrazas, construyendo un canal de desagüe aguas abajo del bordo.	-Retienen suelo. -Favorecen una mayor retención de humedad. -Favorecen el desarrollo de especies forestales y vegetación natural.	-Se recomienda aplicar esta obra en terrenos de más de 5% de pendiente y hasta 35%.	-Cuando se construyen en terrenos de uso agrícola o pecuario, es conveniente plantar maguey, nopal y otras especies forestales o frutales que permitan estabilizar el bordo.
	Terrazas individuales	Son terraplenes de forma circular, trazados en curvas a nivel de un metro de diámetro en promedio. En la parte central de ellas se establece una especie forestal.	-Retienen el suelo. -Captan agua de lluvia. -Incrementan la supervivencia de árboles en la reforestación.	-Se deben construir en suelos con profundidades mayores a 30 cm. -Se deben alinear en curvas a nivel y separarse de acuerdo con la pendiente y densidad de plantas que requiere cada especie.	-Para evitar pudriciones o ahogamiento por exceso de agua se recomienda plantar cada árbol cerca del bordo construido en el área de relleno y no en el centro de la terraza.
	Barreras de piedra en curvas a nivel	Son un conjunto de rocas colocadas de manera lineal en curvas a nivel y de manera perpendicular a la pendiente para	-Aumentan la cantidad de agua infiltrada. -Favorecen la disponibilidad de	-Preferente en áreas con inclinación del terreno y escasa cubierta vegetal.	-Se sugiere usar rocas que se encuentren aflorando sobre la superficie sin necesidad de excavar.

Categoría	Tipo	Descripción	Beneficios	Condiciones	Sugerencias
		retener suelo en zonas con presencia de erosión hídrica laminar.	agua para vegetación forestal. -Mejoran la calidad del agua.		
Zanjas	Zanjas trincheras (tinas ciegas)	Son excavaciones en curvas a nivel de 0.4 m de ancho x 0.4 m de profundidad y 2 m de longitud, en promedio, trazadas a "tres bolillos" y separadas con tabique divisor de 2 m de largo.	-Retienen azolves. -Favorecen una mayor infiltración de agua. -Favorecen el desarrollo de especies forestales y de vegetación natural.	-Dependen de un mantenimiento continuo, ya que los procesos de sedimentación disminuyen la capacidad de captación de agua de lluvia y reducen el tiempo de vida útil para el que fueron construidas. -Se recomienda para zonas semiáridas y templadas con pendientes no mayores a 40%.	-Para lograr el mayor aprovechamiento en la captación de agua de lluvia, se recomienda modificar la pendiente de tal manera que el agua se conduzca hacia las zanjas trincheras.
	Sistema de zanja bordo	Son un conjunto de zanjas y bordos continuos que se construyen siguiendo curvas a nivel, en donde el volumen de excavación se coloca aguas abajo para formar el bordo. Las zanjas y los bordos disponen de diques divisores para controlar la velocidad del flujo de agua.	-Disminuye la velocidad de escurrimiento. -Favorece mayor infiltración de agua. -Favorece el desarrollo de especies forestales.	-Se recomiendan en terrenos que presentan rangos de pendiente de 8% a 45%.	-Ajustar la distancia de las zanjas bordo de acuerdo con la topografía de cada terreno y de las condiciones ambientales del lugar.
	Zanjas derivadoras de escorrentía	Se construyen para controlar y desalojar el agua de escorrentías de caminos, parcelas o cárcavas. Funcionan interceptando el agua y conduciéndola hacia lugares donde no provoquen daños como lagos o arroyos.	-Reducen el crecimiento de la cárcava. -Desvían el escurrimiento a un cuerpo de agua favoreciendo su recarga.	-Se debe dimensionar de manera que sea capaz de transportar un volumen máximo de agua en condiciones seguras.	-Compactar el bordo formado para evitar que el agua arrastre el suelo, y coronarlo con vegetación.
	Bordos en curvas a nivel	Es un sistema de bordos que se conforma con el producto de la excavación de suelo o subsuelo, de forma perpendicular a la pendiente del terreno, siguiendo curvas a nivel.	-Aumentan la humedad aprovechable para el establecimiento de la vegetación.	-Para zonas áridas y semiáridas o con deficiencia de humedad estacional en el suelo. -En suelos profundos o con mínimo 0.6 m de profundidad. -Para terrenos con una pendiente	-Se recomienda que al momento de trabajar el suelo, éste contenga la humedad suficiente para facilitar su manejo.

Categoría	Tipo	Descripción	Beneficios	Condiciones	Sugerencias
				uniforme máxima de 20%.	
	Roturación	Es el proceso de rompimiento y fragmentación en franjas de ancho variable de capas compactadas, endurecidas (tepetate o caliche) o material parental intemperizado, que se encuentra en la parte superficial o subsuperficial del suelo.	-Aumenta la infiltración del agua de lluvia. -Facilita el proceso de plantación y establecimiento de la vegetación natural.	-Se deberá realizar sobre suelos secos, antes del periodo de lluvias, en terrenos con suelos delgados o con capas superficiales endurecidas con pendientes menores al 30%, en áreas desprovistas de vegetación.	-No es necesario trabajar el total de la superficie sino solo franjas sobre las cuales se realizará la plantación.
Prácticas vegetativas	Cortinas rompevientos	Son plantaciones alineadas en forma perpendicular a las corrientes del viento. Se establecen con cuatro o más hileras de árboles y arbustos para formar una barrera lo suficientemente alta y densa para disminuir la velocidad del viento.	-Disminuyen la pérdida de suelo ocasionada por el viento. -Detienen el suelo acarreado por el viento.	Se debe procurar que la cortina se conforme de cuatro a diez hileras, combinando árboles y arbustos.	-Para el caso de las especies arbustivas que se utilizan en las alineaciones exteriores de la cortina, éstas no deben ser apetecibles para el ganado sino preferentemente espinosas
	Enriquecimiento de acahuales (vegetación secundaria)	El enriquecimiento de acahuales es una práctica de manejo agroforestal que consiste en introducir especies forestales maderables o no maderables a la vegetación secundaria a fin de incrementar su valor.	-Permite a los productores rurales aprovechar las áreas ociosas. -Favorece la recuperación de las áreas perturbadas garantizando el desarrollo de una cubierta vegetal permanente que contribuya a reducir la erosión hídrica.	-La especie ideal es aquella que presente un rápido crecimiento, absorba y recicle eficientemente los nutrientes dentro del sistema y cuyo producto final se venda con facilidad en la zona o sea apreciada por el servicio que les brinda.	-Se prefieren las primeras etapas de sucesión del acahual, ya que su intervención resulta más económica y no implica alterar un sistema más desarrollado.
	Sistemas agroforestales	La agroforestería es el nombre con que se asigna a los sistemas y tecnologías de uso de la tierra, donde las especies leñosas son usadas junto con cultivos agrícolas y animales.	-Reduce la erosión hídrica. -Incrementa la infiltración del agua de lluvia. -Diversifica la producción de alimentos.	-Deben tener presente cuando menos 2 o más especies vegetales o una especie vegetal y una especie animal, y por lo menos una de ellas debe ser perenne leñosa.	-Es importante tener claro desde un inicio qué producto se quiere obtener, para favorecer las especies deseadas y con las características más apropiadas.

Categoría	Tipo	Descripción	Beneficios	Condiciones	Sugerencias
			-Incrementa los ingresos de los productores. -Mejorar la calidad del suelo por aporte de materia orgánica.	-Se deben obtener cuando menos 2 productos. -El ciclo debe durar más de un año.	
	Acomodo de material vegetal muerto	Consiste en formar cordones a nivel de material vegetal muerto resultante del aprovechamiento forestal, podas, preclareos, aclareos y material incendiado.	-Reduce la erosión hídrica. -Incrementa la infiltración del agua de lluvia. -Favorece la regeneración natural.	-Las fajinas o los cordones de material deben ser paralelos a la curva a nivel. -El ancho y alto de la faja debe ser menor a 40 cm. -Los cordones deben ser fraccionados cada 50 metros para evitar riesgos de propagación de incendios.	El espaciamiento entre cordones de material acomodado se puede realizar utilizando el criterio de terrazas o eligiendo un espaciamiento a criterio del técnico.

Fuente: CONAFOR, 2007.

A partir del análisis de los beneficios y condiciones de las obras de conservación de suelo para erosión laminar se sugiere seleccionar las opciones de zanjas trincheras, bordos en curvas de nivel y el sistema de zanja bordo.

Independientemente de la obra de conservación del suelo seleccionada para esta área, se requiere establecer bandas de vegetación que retengan sedimentos, nutrientes y otras sustancias procedentes de terrenos agrícolas o pecuarios. El acomodo propuesto es el siguiente: para los bordos en curvas de nivel se recomienda hacerlo arriba del bordo o a un costado, y para el sistema de zanja bordo y las zanjas trincheras, abajo del bordo.

La vegetación propuesta incluye maguey (*Agave salmiana*), mezquite (*Prosopis laevigata*), guaje (*Leucaena leucocephala*) y pitahaya (*Hylocereus undatus*).

Zona de Restauración 2 (Rest.2)

La zona de restauración 2 (Rest.2) se encuentra en los municipios de Ajalpan, Caltepec, Coxcatlán, Coyomeapan, Chapulco, Cañada Morelos, Nicolás Bravo, Zapotitlán, San Antonio Cañada, San

Gabriel Chilac, San José Miahuatlán, Santiago Miahuatlán, Tehuacán, Tepanco de López, Vicente Guerrero, Zinacatepec y Zoquitlán. Tiene una extensión de 1,886.03 km², comprende las áreas forestales en la parte alta y media del acuífero. Comprende zonas con bosque mesófilo de montaña, de encino, pino, mezquite, táscate, selva baja caducifolia y su correspondiente vegetación secundaria arbustiva. Son tierras aptas para el uso forestal doméstico-comercial y el uso pecuario con vegetación natural, con recarga potencial alta y erosión hídrica laminar moderada, con algunas formaciones de surcos y cárcavas. Como propuestas de restauración se sugieren:

I. Sistemas agroforestales.

Se sugiere reforestar con especies maderables y no maderables con orientación doméstica y comercial, que promuevan la captación de agua pluvial y la reducción de erosión. Reforestar el área incidirá directamente en la recarga de los mantos acuíferos, en la calidad del agua, así como en la reducción de la carga de sedimentos cuenca abajo. Se propone reforestar con especies compatibles a la vegetación presente en la zona.

De acuerdo con CONAFOR y la Universidad Autónoma de Chapingo (2013), en el municipio de Tehuacán, se han descrito sistemas agroforestales exitosos de campos de maíz (*Zea mays*) con rodales de mezquite (*Prosopis spp.*), guaje (*Leucaena esculenta*) y guamuchil (*Pithecellobium spp.*).

También se cuentan con registros de sistemas agroforestales tradicionales en el estado de Puebla con maguey manso (*Agave salmiana*), maguey (*Agave spp.*), nopal (*Opuntia spp.*), sabino (*Juniperus deppeana*), pino (*Pinus spp.*) y pitaya (*Stenocercus spp.*), con cultivos de maíz, frijol, calabaza, amaranto, chí, trigo, alfalfa y cebada (Moreno-Calles, Toledo & Casas, 2014).

2. Obras de captación e infiltración de agua.

Las obras de captación e infiltración de agua propuestas son zanjas trincheras, sistemas de zanja bordo, terrazas, presas de piedra acomodada y presas de gavión.

Las zanjas trincheras, los sistemas de zanja bordo y las terrazas se encuentran descritos en la tabla anterior, dentro de las obras recomendadas para erosión hídrica laminar. Por otra parte, las presas de piedra acomodada y las presas de gavión son obras recomendadas para el control de erosión en cárcavas. En todos los casos, además de controlar la erosión hídrica, favorecen la captación e infiltración de agua.

Las presas de piedra acomodada son estructuras construidas con piedras acomodadas, colocadas transversalmente a la dirección del flujo de la corriente. Entre sus beneficios se encuentran la retención del suelo, la estabilización de lechos de cárcavas, la regulación de escurrimientos superficiales y el incremento de la calidad del agua (CONAFOR, 2007).

Para construir presas de piedra acomodada, se debe considerar la disponibilidad de piedra en la zona y pendientes moderadas con flujos de escurrimiento de bajo volumen. En promedio, miden entre 1.2 m y 2.5 m de altura, con ancho no mayor de 7 m. El método de construcción dependerá del tipo de piedra que se disponga; si las piedras son planas sólo se acomodan unas sobre otras para formar paredes rectas y estables; en cambio, si las piedras son redondeadas se recomienda colocar la parte de mayor peso hacia abajo.

Por otra parte, la presa de gaviones es una caja de forma prismática rectangular de malla de alambre de triple torsión, rellena de piedras. Evita que suelos infértiles se depositen sobre terrenos fértiles, evita el azolvamiento de los vasos de almacenamiento y obras hidráulicas, evita el crecimiento en profundidad y anchura de las cárcavas y retiene y favorece la filtración de agua de lluvia.

Sus dimensiones pueden variar dependiendo del tamaño de la cárcava, pero se recomienda para aquellas cárcavas con dimensiones mayores a los 2 m de ancho y 1.5 m de profundidad o más. Estas presas requieren de un cálculo de ingeniería específico de acuerdo con las características propias de las cárcavas presentes en la zona.

3. Obras para la prevención y control de incendios forestales.

Se sugiere realizar un plan de prevención y control de incendios forestales, el cual tenga como directrices y acciones las siguientes:

- 1) Educación: Divulgación del uso racional del fuego entre los agricultores, ganaderos y público en general.
- 2) Prevención: Construcción de franjas cortafuego, reparación de caminos que permitan un acceso más rápido a los sitios más propensos a incendios y vigilancia.
- 3) Combate y liquidación de incendios: Técnicas de ataque directo e indirecto y la eliminación de cualquier fuente que pudiera extender un incendio ya controlado.

El fin de este capítulo fue evaluar diferentes propuestas de restauración a nivel del acuífero Valle de Tehuacán, no obstante, la selección y ruta crítica de acciones estructurales, acciones de conservación y recomendaciones en cuanto a proyectos sustentables se enfoca en el área circundante a los manantiales. De todas las propuestas evaluadas en este capítulo, las acciones seleccionadas en el área circundante a los manantiales (descritas a detalle en el capítulo 13) son: zanjas bordo, zanjas trincheras, bordos en curvas de nivel, zanjas y bordos almacenadores de agua de escorrentía, sistemas agroforestales y el desazolve del manantial La Ciénega.

Conclusión

Las propuestas de alternativas de restauración del acuífero planteadas en este capítulo tienen como objetivos asociados contribuir a la conservación de la biodiversidad y el bienestar humano de las comunidades de la región, fortalecer la conectividad del ecosistema, mejorar las oportunidades de experiencia de los visitantes y mejorar los servicios ecosistémicos.

En este capítulo se establecieron las zonas de protección, de uso restringido, de uso tradicional, de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, de recuperación, conservación y restauración, lo anterior con base en la aptitud intrínseca del territorio y en sus

unidades de paisaje. Como primer punto, se sugiere actualizar el Plan de Manejo del acuífero del Valle de Tehuacán y crear un Reglamento del mismo.

Finalmente, a partir de la zonificación propuesta, se obtuvieron 2 zonas de restauración a nivel del acuífero Valle de Tehuacán, una circundante a los manantiales (Rest. 1) y otra en las áreas forestales en la parte alta y media del acuífero (Rest.2).

La zona de restauración I (Rest. 1) se ubica dentro del municipio San José Miahuatlán, abarca un área de 0.21 km², comprende las áreas forestales adyacentes a los manantiales, cuenta con zonas de erosión hídrica laminar leve y se caracteriza por tener zonas de extracción de agua con transmisividad y vulnerabilidad alta.

Como alternativas de restauración para la zona Rest. I se propone la implementación de un método de almacenamiento y recuperación de acuíferos (ARA) con un esquema de gestión de recarga de acuíferos (GRA) y un programa de saneamiento de los manantiales. Por otra parte, la zona de restauración 2 (Rest.2) se recomiendan sistemas agroforestales, obras de captación e infiltración de agua y obras para la prevención y control de incendios forestales

El fin de este capítulo fue evaluar diferentes propuestas de restauración a nivel del acuífero Valle de Tehuacán, no obstante, la selección y ruta crítica de acciones estructurales, acciones de conservación y recomendaciones en cuanto a proyectos sustentables se enfoca en el área circundante a los manantiales. De todas las propuestas evaluadas en este capítulo, las acciones seleccionadas en el área circundante a los manantiales (descritas a detalle en el capítulo 13) son: zanjas bordo, zanjas trincheras, bordos en curvas de nivel, zanjas y bordos almacenadores de agua de escorrentía, sistemas agroforestales, desazolve del manantial La Ciénega, así como proyectos sustentables compatibles con la zonificación y que permitan reactivar la economía local.



10

**ESTIMACIÓN DEL COSTO-BENEFICIO
DE LAS ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN**



10. Estimación del costo-beneficio de las alternativas de recuperación

Con base en las especificaciones para el desarrollo del presente estudio, se considera para este capítulo la estimación y valoración cualitativa y monetaria de los impactos económicos y ambientales que se generarán con las alternativas de recuperación propuestas, en los tres horizontes del tiempo.

10.1 Situación actual

A partir del diagnóstico de la **situación actual** y de la identificación de la problemática central que se enfrenta, el estudio partió de un contexto general hasta particularizar en el manantial La Ciénega, en San Sebastián Zinacatepec Puebla, afluente que pertenece al acuífero del Valle de Tehuacán.

Tabla 10.1 Acuíferos que colindan en el estado de Puebla.

Clave	Acuífero	Disponibilidad
2102	Valle de Tecamachalco	Déficit en la disponibilidad media anual de agua subterránea
2102	Libres-Oriental	Escasa disponibilidad
2103	Atlixco - Izúcar de Matamoros	Déficit en la disponibilidad media anual de agua subterránea
2104	Valle de Puebla	Con disponibilidad del recurso hídrico
2105	Valle de Tehuacán	
2106	Ixcaquixtla	

Fuente: CONAGUA, 2020.

No obstante que estudios señalan que el acuífero del Valle de Tehuacán cuenta aún con disponibilidad de agua; la realidad es que actualmente presenta un desequilibrio ecológico, el excesivo aprovechamiento de agua subterránea, tanto en el acuífero en comento, como en el acuífero vecino de Tecamachalco, han incidido en un proceso de agotamiento paulatino de la reserva de agua subterránea, lo que derivó en la implantación de vedas en la década de 1950.

En los años noventa, la profundidad del nivel estático era en general somera, con extensas zonas menores a los 20 metros de profundidad; duplicándose actualmente dicha profundidad en gran parte de su extensión, afectando significativamente la descarga de los manantiales, que en algunos casos se

han agotado. La zona sur del acuífero ha presentado los mayores abatimientos del nivel estático, alcanzando un ritmo próximo a los dos metros por año, situación que incide en el comportamiento de los manantiales.

De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación de fecha 17 de septiembre de 2020, el Acuífero del Valle de Tehuacán presenta una disponibilidad positiva de 28.19882 hm³, lo cual aún permitiría la autorización de concesiones por ese volumen anual; sin embargo, se evidencia que existe un desequilibrio, con profundidades al nivel estático que, en lo general, son cada día mayores. De acuerdo con estudios realizados hasta el año 2011, se observaba una tendencia de abatimiento en todo el acuífero, con valores que fluctuaban desde -0.2 m/año, hasta 1.8 m/año, equivalentes a una pérdida anual de 40 hm³/año.

En los últimos años se ha observado una disminución considerable en los caudales aportados por los manantiales y galerías filtrantes en los Municipios de Tehuacán, Zinacatepec, Santiago y San José Miahuatlán y Atlix, todos ellos ubicados en la porción central del valle. De seguir esta tendencia, las galerías y manantiales continuarán disminuyendo sus descargas.

Otro aspecto a considerar son las propiedades del acuífero, ya que la disposición espacial de las fracturas, grietas y fallas geológicas son determinantes para el comportamiento del flujo, siendo además sensibles a eventos como sismos, que pueden modificar la disposición y espaciamiento de grietas y fracturas, causando cambios en el comportamiento del flujo subterráneo. También se considera la variación estacional del comportamiento del acuífero, por las precipitaciones, escurrimientos, temperatura y demanda de agua a lo largo del año, lo cual incide en el comportamiento de los niveles del acuífero, con tendencias de recuperación durante meses de lluvia y de abatimiento, en meses secos.

El Valle de Tehuacán es considerado como la reserva estratégica de agua más importante para el sureste del estado de Puebla, donde el escurrimiento superficial es efímero y el agua subterránea históricamente ha sido una fuente de abastecimiento segura para los distintos usos. En él han

perdurado manantiales y galerías filtrantes, que denotan la existencia de zonas con baja profundidad del nivel estático.

Particularmente, en el manantial La Ciénega se han registrado disminuciones relevantes en su caudal, derivado también del desequilibrio ecológico ya descrito.

A través del tiempo, los terrenos aledaños a las zonas del vaso del manantial La Ciénega, han sido ocupados por la actividad agrícola y ganadera, tanto de riego como de temporal, lo que ha ocasionado prácticamente su aislamiento y poca atención en su mantenimiento.

Con base en estudios anteriores y en el análisis piezométrico en inmediaciones del manantial La Ciénega; se identificó el comportamiento de la profundidad de los niveles estáticos en los diferentes pozos en los municipios de Ajalpan, Zinacatepec y San José Miahuatlán. En San José Miahuatlán se hizo la medición de la profundidad al nivel estático de 3 pozos, donde se encontró variación anual de la profundidad al nivel estático. Solo en un pozo la profundidad se incrementó, hay recuperación; mientras que los otros dos sus profundidades van a la baja.

En Zinacatepec se hizo la medición de la profundidad al nivel estático de 4 pozos, de los cuales, en tres pozos el comportamiento de las líneas de tendencia de las profundidades va al alza, lo que significa que sus niveles se han recuperado. Y solo uno de los pozos presenta una tendencia de profundidad a la baja.

Por último, en el municipio de Ajalpan se hizo la medición de la profundidad al nivel estático de 7 pozos; de los cuales 3 presentan niveles de la profundidad al alza, por lo que sus niveles de agua se han ido recuperando, a diferencia de 4 pozos que el comportamiento de las líneas de tendencia marca una baja en los niveles del agua.

El área del cuerpo de agua del manantial La Ciénega es de aproximadamente 2.5 ha, las cuales cubren la manantial y la formación de pendientes en sus alrededores; tiene un perímetro de 0.34 km; el ancho promedio de la manantial es de 76 m; y tiene una elevación entre 1,075 y 1,100 m.

En la zona se identifica una perturbación forestal considerable, si bien en 2011 no era una zona completamente cubierta de vegetación, para 2021 ya solo quedan manchones de vegetación de estrato bajo y algunos árboles maduros. La pérdida de cubierta forestal ha favorecido en gran medida la presencia de azolve en el cuerpo de agua de la Ciénega.

De acuerdo con los estudios, se determinó un acumulado de 966.74 m³ de sedimento en el cuerpo de agua La Ciénega; considerando el valor de 1.45 ton/m³ (Clasificación de texturas y parámetros mecánicos de suelos, SEMARNAT 2003), correspondiente a la tabla de Propiedades físicas de los distintos tipos de suelos en lo referente a Limo arcilloso con alto contenido orgánico, se tiene un total una acumulación de aproximada de 1,401.77 toneladas de sedimento. Asimismo, se realizaron sondeos en el manantial Tochatl; sin embargo, este presentó profundidades menores a los 3 cm, por lo que se concluye que no presenta problemas de azolve.

Como se ha mencionado, el acuífero Valle de Tehuacán se encuentra parcialmente vedado; donde rigen cuatro decretos de veda:

- La porción centro y noroccidental que se encuentran sujetas a las disposiciones del “Decreto por el que se amplía la veda para el alumbramiento de las aguas del subsuelo establecida en la zona de Tehuacán, Pue.” DOF del 2 de marzo de 1959.
- Las porciones oriente, poniente y sur se encuentran sujetas a las disposiciones del “Acuerdo por el que se establece el Distrito de Riego de la Cuenca del Río Salado, en los Estados de Puebla y Oaxaca, y se declara de utilidad pública la construcción de las obras necesarias para su operación.” DOF del 19 de marzo de 1965.
- Una pequeña porción en el extremo noroeste se encuentra sujeta a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona meridional del Estado de Puebla.” DOF del 15 de noviembre de 1967.

- La mayor parte del acuífero se encuentra sujeta a las disposiciones del “Decreto que declara de utilidad pública el establecimiento del Distrito de Acuicultura Número Dos Cuenca del Papaloapan para preservar, fomentar y explotar las especies acuáticas, animales y vegetales, así como para facilitar la producción de sales y minerales.” DOF del 6 de agosto de 1973.

Sólo en una pequeña área de la porción occidental del acuífero no rige ningún decreto de veda; y esta se encuentra sujeta a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 175 acuíferos que se indican”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013.

En dicha porción del acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

Afectaciones

Sin duda, la reducción en la disponibilidad media anual del acuífero del Valle de Tehuacán pone en riesgo el abastecimiento de la población para sus diversos usos (agrícola, público-urbano, industrial, doméstico). En este acuífero se encuentra ubicada la tercera unidad del Distrito de Riego 030 Valsequillo, Puebla, que se abastece del agua superficial de la Presa Manuel Ávila Camacho.

En la región se cultiva maíz, caña de azúcar, alfalfa y frijol; siendo el maíz el principal cultivo, tanto en agricultura de riego como de temporal. La actividad pecuaria en el acuífero es más importante que

la agrícola; la mayor producción es avícola, y corresponde a huevo y pollo. Le siguen en importancia el ganado porcino, y la producción de leche y carne de bovino.

La producción manufacturera en el Valle de Tehuacán se concentra básicamente en textiles y calzado; la actividad industrial está enfocada al sector alimentario, que corresponde en su mayoría a la elaboración de bebidas vinculadas al embotellamiento de agua, así como a la industria química, productos metálicos, maquinaria y equipo, así como minerales no metálicos.

Finalmente, el desarrollo de los sectores de la economía depende del suministro del recurso hídrico para que puedan operar.

Por otro lado, en el caso específico del manantial La Ciénega, se considera también un espacio de turismo de naturaleza; lugar que ha ido perdiendo la afluencia de la población por las condiciones que actualmente presenta en cuanto al nivel de contaminación por el volumen de azolve, así como también a la reducción en sus niveles de agua. El sitio ya no representa un atractivo para los visitantes. La Ciénega lo consideran al conjunto de los 3 manantiales que se encuentran en la zona; sin embargo, el manantial de la parte central lleva el nombre de la Ciénega propiamente. Actualmente es una zona con aspecto de pantano, el cual se encuentra entre los límites de las comunidades de San Sebastián Zinacatepec y San José Miahuatlán, y funge como zona de identidad y turismo para ambas poblaciones.

Población

El acuífero del Valle de Tehuacán comprende 21 municipios del estado de Puebla, algunos en su totalidad y otros parcialmente; por lo cual, se considera en esa proporción la población en la cual incidirán las acciones propuestas en el presente estudio.

Tabla 10.2 Población de los municipios ubicados en el Acuífero del Valle de Tehuacán.

No.	Municipio	% Dentro del Acuífero	Hab. 2020	Hab. 2070
1	Ajalpan	65%	48,599	153,736
2	Altepexi	100%	22,629	71,584
3	Atexcal	12%	463	1,465
4	Cañada Morelos	9%	3,220	10,186
5	Caltepec	78%	1,859	5,881
6	Chapulco	92%	7,538	23,845
7	Coxcatlán	100%	20,653	65,333
8	Coyomeapan	19%	2,813	8,899
9	Juan N. Méndez	4%	212	671
10	Nicolás Bravo	99%	6,578	20,809
11	San Antonio Cañada	100%	5,938	18,784
12	San Gabriel Chilac	100%	15,954	50,468
13	San José Miahuatlán	100%	14,018	44,344
14	Santiago Miahuatlán	100%	30,309	95,878
15	Tehuacán	100%	327,312	1,035,406
16	Tepanco de López	81%	17,997	56,931
17	Tlacotepec de Benito Juárez	1%	548	1,734
18	Vicente Guerrero	99%	26,293	83,174
19	Zapotitlán	73%	6,274	19,847
20	Zinacatepec	100%	18,359	58,076
21	Zoquitlán	12%	2,440	7,719
Población total			580,006	1,834,768

Fuente: Comisión Nacional de Agua (CONAGUA).

Clasificación del uso del agua

Tabla 10.3 Consumo de agua por sector.

Tipo de Pozos	Porcentaje	Extracción anual
Agrícola	78%	204.5 hm ³
Público-urbano	18.2%	
Industrial	3.2%	
Doméstico	0.6%	

Fuente: CONAGUA, 2020.

El estudio contempló la estimación de los usos consuntivos actuales, así como una proyección al 2070.

Se consideraron 200 lt-hab-día de consumo en áreas urbanas y 150 lt-hab-día en áreas rurales. En la tabla 10.4 se muestran los diferentes usos consuntivos actuales y los escenarios correspondientes.

Tabla 10.4 Usos consuntivos actuales y escenarios.

Descripción	2020 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2030 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2040 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)
Uso agrícola	25,287.00	201,076,498.41	26,551.35	211,130,323.33	27,878.92	221,686,839.49
Uso público urbano		40,752,671.58		51,308,087.39		64,597,478.65
Uso Industrial y otros		8,233,600.00		8,398,272.00		8,566,237.44
Total		250,062,769.98		270,836,682.72		294,850,555.58

Descripción	2050 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)	2070 (ha)	Uso consuntivo (m ³ /año)
Uso agrícola	29,272.86	232,771,181.47	30,736.51	244,409,740.54
Uso público urbano		81,328,976.78		128,915,397.15
Uso Industrial y otros		8,737,562.19		8,912,313.43
Total		322,837,720.43		382,237,451.13

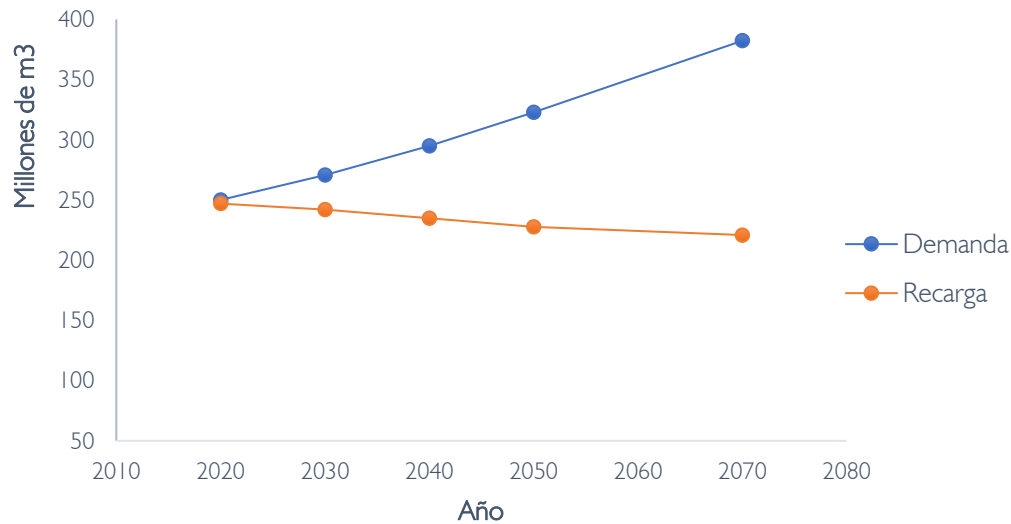
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI y SIAP, 2021.

Se determina entonces que actualmente el acuífero del Valle de Tehuacán tiene una demanda anual de 250,062,769.98 m³; se estima que para el año 2050 se incremente dicha demanda anual a 322,837,720.43 m³, lo que representa un incremento de 29% en 30 años.

Con base en los resultados obtenidos y en la información de la recarga, se muestra el comportamiento de ambas variables en escenarios futuros; los cuales, se apoyan en los modelos de cambio climático, donde las condiciones de precipitación y temperatura presentan anomalías con respecto a las normales climáticas.

Por lo que se considera que la demanda sobre el uso del agua se verá afectado debido a las condiciones de incremento de temperatura y olas de calor en la zona.

Gráfica 10.1 Proyección del balance acuífero de Tehuacán, recarga vs demanda.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Dadas las condiciones que se han descrito y la brecha que existe entre la demanda y la recarga del acuífero del Valle de Tehuacán; se deberán realizar acciones de conservación orientadas a un manejo sustentable del recurso hídrico.

De continuar con la tendencia de abatimiento del nivel del agua subterránea y un descenso en la producción de las galerías filtrantes, por la incontrolable extracción de agua, existe el riesgo de sobreexplotación del acuífero y agravamiento de los efectos negativos tales como el abatimiento progresivo de los niveles del agua subterránea, la inutilización de pozos, el incremento de costos de bombeo, la reducción en la producción de las galerías filtrantes, así como la disminución e incluso desaparición de los manantiales.

Se identifican las siguientes causas de la disminución del abatimiento del nivel de agua:

- Disminución de su recarga por la deforestación y cambio de uso de suelo en sus zonas de captación, que disminuyen su infiltración e incrementan el escurrimiento.
- La intercepción de caudales en su zona de recarga, debida a aprovechamientos someros, como norias poco profundas, perforadas en tiempos recientes.

- Disminución de presión del acuífero subyacente, que intensifica el flujo hacia los pozos, disminuyendo la aportación hacia los manantiales. Ésta, debida a la sobreexplotación del acuífero, que tal como se muestra en gráficos predecesores, conlleva un abatimiento de los niveles estáticos inferiores, originando mayores gradientes y flujos desde las zonas de recarga, hacia los estratos profundos.

Se precisa que, no obstante que el acuífero del Valle de Tehuacán se encuentra publicado en el Diario Oficial de la Federación, en condición de disponibilidad, la realidad es que ha presentado un sistemático proceso de abatimiento en la generalidad de su superficie, condición que eventualmente presenta recuperaciones locales en las zonas con mayor susceptibilidad a la recarga durante la época de lluvias.

10.2 Situación optimizada

Ante la problemática identificada, se podrían proponer acciones administrativas o de menor costo que atenuaran los efectos negativos que se han generado por el desequilibrio ecológico en el acuífero del Valle de Tehuacán; sin embargo, se estaría atendiendo parcialmente el problema y sin obtener grandes resultados.

10.3 Situación con Proyecto

A partir del diagnóstico de la situación actual ya descrito, el estudio propone una serie de acciones que contribuirán a mejorar el manejo sustentable del acuífero del Valle de Tehuacán, pero específicamente a la recuperación del manantial La Ciénega, en San Sebastián Zinacantepec.

Las acciones propuestas se enfocan a la protección ambiental, toda vez que es necesario promover el cuidado del acuífero debido que éste se encuentra ubicado en una región árida con un clima mayoritariamente seco, con bajos niveles de lluvia por año, y con un alto grado de evaporación y bajos niveles de infiltración.

En este sentido, las acciones propuestas se orientan por un lado al manantial y, por otro lado, al acuífero:

- Las **acciones a nivel manantial**, consideran obras de amortiguamiento y de protección; estas acciones se incluyen también en la propuesta del Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC). Sin embargo, se seleccionaron como inmediatas, ya que se pueden ir implementado de manera paralela al proceso de certificación.
- Las **acciones a nivel acuífero**, que se dividen en 7 zonas, y cuyo proceso de selección se presentó en el capítulo 9, mismas que se detallan en la propuesta de la ADVC (Anexo 4).

I. Acciones para la recuperación del manantial La Ciénega

Para la ejecución de las acciones, se aplicará el criterio de cuenca, enfocándose primero a contrarrestar la pérdida del suelo en las zonas de ladera; iniciando de las partes altas hacia las partes bajas, mediante obras y prácticas en curvas a nivel y posteriormente a controlar la erosión hídrica en las cárcavas o barrancas formadas por los escurrimientos superficiales, que deberán elegirse con el asesor técnico.

Para estas obras se consideraron dos zonas:

- I) **Zona de protección:** Con respecto a la superficie que rodea a los manantiales y cubierta con vegetación, con uso forestal, se plantea ejecutar actividades de restauración para su recuperación, protección y aprovechamiento sustentable, a fin de que impacte de manera positiva en la vida de quienes hacen uso de los manantiales, esta zona deberá ser prioritaria en su atención, identificar los aspectos sociales, culturales, políticos y económicos de quienes realizan actividades productivas, esta superficie será considerada como Zona de protección y de amortiguamiento.

- 2) **Zona de amortiguamiento:** Otra zona de influencia es aquella que rodea la superficie cubierta con vegetación y que se ubica inmediata a los manantiales; terrenos con uso agrícola, así como áreas cubiertas con vegetación que también influyen en las condiciones del manantial y el uso de los mismos.

2. Acciones a nivel acuífero

Se definen acciones a implementar a nivel acuífero, donde destaca la propuesta de creación de un Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC) con la finalidad de englobar todas las acciones tanto a nivel manantial, como a nivel acuífero; proporcionando a los tomadores de decisiones el abanico de posibilidades que se pueden incorporar e implementar para lograr la recuperación paulatina de los niveles de la zona que nos ocupa en el presente estudio.

Del análisis realizado en el capítulo 9 se desprenden las siguientes acciones a implementar:

Tabla 10.5 Acciones propuestas.

No	Concepto	No	Concepto
1	Zanja bordo		
2	Zanja trinchera	9	Desazolve del manantial La Ciénega
3	Bordos a curvas de nivel	10	Certificación ADVC
4	Bordo almacenador de escorrentías	11	Programa de educación ambiental
5	Protección (Cercado)	12	Campaña de limpieza de residuos sólidos urbanos
6	Zanja de escorrentía	13	Fomento al aprovechamiento de cría de peces
7	Mantenimiento	14	Aprovechamiento de miel
8	Sistemas agroforestales: Bordo, Re-forestación, Cultivo	15	Turismo sustentable

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Toda cuenca sin disponibilidad se encuentra en la necesidad de recuperar su equilibrio hídrico, ya que éste, siempre es insostenible; no existe economía que resista un colapso hídrico y el agotamiento de este recurso. En cualquier caso, se estaría afectando la calidad de vida, tanto social, como ambiental.

El acuífero del Valle de Tehuacán se encuentra sobreexplotado, y a pesar de lo publicado respecto a su disponibilidad administrativa, esta es mínima, de manera que las políticas para el manejo del agua, deben orientarse a la necesidad de reducir el aprovechamiento actual o bien hacerlo de manera sustentable para lograr el equilibrio del acuífero; ya que el volumen administrativamente disponible es apenas suficiente para proteger una condición de equilibrio.

La valoración de proyectos y alternativas de recuperación de acuíferos se encuentra más allá de criterios exclusivamente monetarios o de ingeniería; el agua es un elemento fundamental para la vida y para el desarrollo de todas las actividades humanas. Las políticas públicas que tocan el tema del agua, ineludiblemente tienen un compromiso con derechos humanos y aspectos éticos y ambientales establecidos por la Ley.

Es por ello, necesario, cuando se realiza una estimación costo-beneficio de una alternativa de recuperación, comparar dicho balance costo – beneficio, contra el balance de un escenario inercial, carente de dichas alternativas.

La sobreexplotación, conlleva altos costos, que considera el costo causado por la disminución de la reserva de agua subterránea. De acuerdo con diversos estudios realizados en el país, el costo repercute en aspectos estructurales e intangibles; algunos ejemplos de ello, es el costo de la sobreexplotación en el acuífero de la Ciudad de México, que es próximo a \$98/m³ sobreexplotado y el acuífero Interestatal de Aguascalientes, próximo a los \$14/m³.

En un acuífero como el del Valle de Tehuacán, la sensible interacción entre el agua subterránea, las galerías filtrantes y manantiales, puede significar un costo elevado, que hasta hoy, no se ha calculado. Al suponerlo, igualmente en un rango inferior, de \$14/m³, el costo anual al sobreexplotar 25 hm³, resulta de 350 MDP. En un horizonte de 20 años, significaría un costo acumulado de 7,000 MDP.

En contraparte, las inversiones requeridas para la ejecución de las acciones conllevan un menor costo. Acuíferos similares como el Interestatal de Aguascalientes – Ojo Caliente – Encarnación, presentan una inversión próxima a los 1,800 MDP.

Al suponer que la sobreexplotación no puede resolverse en forma inmediata, sino gradual, para un horizonte de planeación de 20 años, se tendría un costo promedio de sobreexplotación de 3,500 MDP, prácticamente del doble de la inversión requerida para el manejo integrado del acuífero.

Es necesario el costo de las acciones previstas en el plan de manejo del Acuífero del Valle de Tehuacán, así como el cálculo preciso del costo de la sobreexplotación, para tener una estimación más precisa de esta relación costo – beneficio; sin embargo, en acuíferos como el presente, donde los efectos de la sobreexplotación se hacen evidentes y afectan visiblemente el caudal de los pozos, así como la profundidad de bombeo, junto con otros efectos, siempre es rentable mantener el equilibrio.

Determinar cuantitativamente la relación costo beneficio implica el desarrollo de estudios de alto grado de complejidad y costo; que proporcione la información para cuantificar y valorar los beneficios que se generarán con las acciones propuestas para enfrentar la problemática que se ha identificado, por ello, el análisis de dichos beneficios se realiza de forma cualitativa.

No obstante, es necesario precisar que las acciones propuestas están orientadas a contribuir a la recuperación de los niveles de caudal del acuífero del Valle de Tehuacán y muy puntualmente en la recuperación del manantial de La Ciénega; lo cual tendrá implicaciones de manera positiva en varios ámbitos, siendo el principal el ambiental y en consecuencia en el nivel de vida de la población.

En cuanto a la determinación de costos, estos sí fueron identificados, valorados y cuantificados metodológicamente; generándose un catálogo de conceptos con unidad de medida, cantidades, precios unitarios e importes. Asimismo, dicha inversión se calendarizo en el periodo de ejecución propuesto.

El catálogo está integrado por 15 conceptos, los cuales incorporan las acciones que se derivaron del presente estudio:

Tabla 10.6 Costos estimados de acciones a implementar.

No.	Concepto	Unidad	Cantidad	P.U	Importe
1	Zanja bordo	ha	34.45	\$12,600.00	\$434,070.00
2	Zanja trinchera	ha	74.03	\$12,600.00	\$932,778.00
3	Bordos a curvas de nivel	ha	81.99	\$12,600.00	\$1,033,074.00
4	Bordo almacenador de es- correntías	Bordo	2	\$56,250.00	\$112,500.00
5	Protección (Cercado)	km	3.5	\$78,300.00	\$274,050.00
6	Zanja de escorrentía	km	1.3	\$101,250.00	\$131,625.00
7	Reforestación	ha	190.48	\$8,662.50	\$1,650,033.00
8	Asesoría técnica	ha	373.37	\$1,575.00	\$588,057.75
9	Mantenimiento	ha	373.37	\$6,075.00	\$2,268,222.75
10	Sistemas agroforestales				
	Bordo	ha	182	\$20,124.00	\$3,662,568.00
	Reforestación				
Cultivo					
11	Desazolve del manantial La Ciénega	m ³	966.74	\$4,861.70	\$4,700,000.00
12	Certificación ADVC	Polígono	1	\$600,000.00	\$600,000.00
13	Programa de educación ambiental	Programa	1	\$500,000.00	\$500,000.00
14	Campaña de limpieza de residuos sólidos urbanos	Programa	1	\$450,000.00	\$450,000.00
15	Fortalecimiento al aprove- chamiento de cría de peces	Programa	1	\$650,000.00	\$650,000.00
16	Apoyo al aprovechamiento de miel	Programa	1	\$450,000.00	\$450,000.00
17	Turismo sustentable	Proyecto	1	\$8,806,000.00	\$8,806,000.00
Monto Total					\$27,242,978.50

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La restauración forestal considera el conjunto de actividades tendientes a rehabilitar el ecosistema forestal degradado para recuperar parcial o totalmente las funciones originales del mismo. Estas acciones incluyen obras de conservación y restauración de suelos, protección de áreas reforestadas, reforestación, mantenimiento y el establecimiento de sistemas agroforestales como una opción en la reconversión productiva.

Las obras y prácticas de conservación y restauración de suelos contribuyen a disminuir la erosión del suelo e incrementan la captación de agua tanto en laderas como en cárcavas, también incrementan la fertilidad del suelo, lo que contribuye a la sobrevivencia de las plantas.

Se definieron los siguientes tipos de obra a realizar en las zonas del sitio a restaurar:

1. Sistema zanja bordo (realizada con herramienta manual o maquinaria)

Excavaciones sobre la curva de nivel, con longitud variable de acuerdo a las dimensiones del predio a intervenir, se considerará una separación entre curvas a nivel cada 20 m, zanjas de 0.4 m de ancho X 0.4 m de profundidad, bordos de 0.6 m de base y 0.35 m de altura, cada 5 m incluye tabique divisor de 0.5 m de longitud, el bordo debe conformarse y compactarse. Con lo cual se determina que se realizarán 500 metros lineales de obra por hectárea, es recomendable que se realicen con pico y pala, o bien con algún instrumento manual utilizado en la región como herramienta de trabajo para escarbar; la superficie considerada para establecer zanjas bordo en curvas de nivel, como obra de conservación de suelo y agua es de 34.5 ha, aproximadamente.

La reforestación en esta zona de protección deberá ser considerando la obra de conservación de suelos, proponiendo una densidad de plantación de 600 plantas por ha, con especies locales y que son de interés ecológico y comercial, cumpliendo con la principal función de evitar la erosión del suelo y reducir los escurrimientos de agua de lluvia, que originan los procesos erosivos, como el maguey combinado con especies arbóreas como el mezquite y guaje.

2. Zanja trinchera (tinas ciegas) (realizada con herramienta manual)

Las zanjas trincheras, también denominadas tinas ciegas, son zanjas que van sobre líneas a curvas de nivel. Requieren de una separación entre curvas a nivel cada 12.5 m, zanjas de 0.4 m de ancho X 0.4 m de profundidad y 2 m de longitud, bordos de 0.6 m de base y 0.35 m de altura. El bordo debe conformarse y compactarse, estas obras deben realizarse a pico y pala, u otro instrumento manual utilizado en la región, la cantidad de obra son 500 metros lineales por hectárea. La separación entre líneas igual dependerá de la disponibilidad y aceptación de los dueños del recurso.

La reforestación en esta área con zanjas trincheras deberá realizarse al siguiente año de concluidas las obras de conservación, utilizando especies locales como el mezquite, (*Prosopis laevigata*) el guaje (*Leucaena leucocephala*), en asociación con maguey pulquero (*Agave salmiana*). La distribución de la

planta, en primera instancia, a ambos lados de la zanja, así como en las zonas que quedan entre las líneas de zanjas trincheras.

3. Bordos en curvas a nivel (con maquinaria o tracción animal)

Estas obras son líneas continuas con ancho de franja según tipo de maquinaria (2.0 a 1.5 m) y de 0.65 a 0.50 m de altura, profundidad de corte mínima de 0.30 m, separados en curvas a nivel cada 10 m, incluye el paso de ripper y bordero o maquinaria similar necesaria para conformar el bordo. También incluye un paso del ripper aguas arriba del bordo para facilitar la infiltración. Para la construcción de esta obra no se deberá remover la cobertura vegetal presente en el predio.

Es conveniente que estas obras se ejecuten con maquinaria, debido a que los bordos tendrán una mejor nivelación, su altura y ancho se estandarizarán, el tiempo para su ejecución será menor y quedarán bien distribuidos.

La cantidad de obra recomendable para que estas obras cumplan su función es realizar 1,000 metros lineales por ha. Sin embargo, estas cantidades de obra estarán en función de la disponibilidad y aceptación de los dueños y poseedores del recurso, mínimo se tendrán que realizar 200 metros lineales de obra, sobre curvas de nivel.

La superficie considerada en esta actividad deberá ser reforestada con especies locales y que cumplan la función de evitar la erosión y desprendimiento de azolve, y así evitar que sea arrastrado a los manantiales con su consecuente azolve y reducción del volumen de almacenamiento de agua.

4. Bordo almacenador de escorrentías

Excavaciones realizadas con el fin de almacenar el agua pluvial captada por las zanjas derivadoras de escorrentía. Tienen el propósito de contener las aguas de escorrentía y ayudar a que los sedimentos y otros contaminantes se asienten en el suelo, previniendo o disminuyendo su llegada a los

manantiales. Se proponen 2 bordos de almacenamiento de escorrentías, uno a cada lado de la zanja derivadora de escorrentía, con una superficie total de 200 m².

5. Protección de área a restaurar (Cercado).

Este tipo de protección se realizará a fin de atender la presencia de ganado y/o fauna nociva dentro de la superficie bajo protección, delimitando el perímetro de esta área.

El cercado deberá construirse antes del establecimiento de la plantación y de preferencia antes de realizar las obras y prácticas de conservación de suelos para evitar el pastoreo, debido al daño que provocan a las plantas; así como, la destrucción de las obras o prácticas, además de provocar la compactación el suelo impidiendo la infiltración del agua.

El área a cercar es aquella donde están ubicados los manantiales, considera una superficie de 47.5 ha.

6. Zanja de escorrentía

Las zanjas de infiltración son canales construidos en laderas que tienen el objetivo de captar el escurrimiento de agua, evitar procesos erosivos y conservar el suelo y el agua. Estas son poco profundas, permiten la infiltración de agua en el suelo, pero también pueden recargar los acuíferos poco profundos y no confinados. Típicamente las dimensiones son 40 cm de ancho de la base y 40 cm de profundidad. Funcionan interceptando el agua de escorrentías y conduciéndola hacia lugares donde no provoquen daños. Para prevenir la escorrentía de agua pluvial mezclada con sedimentos y aditivos agrícolas y pecuarios hacia los manantiales, se propone una zanja de infiltración con bordo de 1.3 km, cuya escorrentía sería conducida hacia 2 bordos almacenadores.

7. Reforestación

Plantación de árboles o plantas de interés económico, en la misma superficie donde se establecen las obras de conservación de suelos.

De acuerdo con el tipo de obra de suelo que se vaya a establecer, se deberá indicar el acomodo que la planta deberá tener, ya sea al margen o sobre la obra, con la finalidad de estimar la cantidad de planta que se utilizará en esos sitios. Para el caso de bordos se recomienda hacerlo arriba del bordo o a un costado; para zanjas bordo, abajo del bordo, al igual que en las zanjas trincheras; en los sistemas agroforestales la planta se colocaría arriba del bordo, tratando de ganar espacio y disminuir riesgo de erosión.

Las especies a utilizar en las actividades de reforestación son: maguey, mezquite, guaje, pitahaya.

8. Asesoría técnica

Contar con el personal indicado en las técnicas estructurales a implementar en la zona. Dicho personal se encargará de dar capacitación a los propietarios de los terrenos, a fin de que se apoderen del proyecto y además conozcan los beneficios ambientales y económicos de su implementación.

9. Mantenimiento

Trabajos de campo de manera anual para desazolve de las obras realizadas y sustitución de plantas que no sobrevivieron. Lo anterior, con la finalidad de mantener toda la infraestructura funcional durante un largo periodo de tiempo.

10. Sistemas agroforestales

Los Sistemas Agroforestales (SAF) consideran una serie de técnicas que incluyen la combinación, simultánea o secuencial, de especies forestales y cultivos agrícolas; se define a la agroforestería como una forma de cultivo múltiple en la que se cumplen tres condiciones fundamentales:

- Diversidad de cultivos.
- Al menos dos especies, una de ellas arbustiva.
- Las especies interactúan biológicamente, realizan el aporte de nutrientes y la retención del suelo.

Para el caso de proyectos con el objetivo de restauración de áreas degradadas, el sistema debe considerar la interacción de las siguientes actividades:

- Ejecución de obras o prácticas de conservación y restauración de suelo.
- Establecimiento del cultivo agrícola o de cobertera.
- Establecimiento de la reforestación.

Los sistemas agroforestales, tienen como finalidad evitar la erosión del suelo, proteger los cultivos agrícolas, mejorar la calidad del suelo, entre otras funciones.

11. Desazolve del Manantial la Ciénega

Se propone la remoción de sedimentos de fondo de los manantiales, con técnicas de bajo impacto a la fauna presente, así como la eliminación de las causas que dirigen el arrastre de suelo hacia los manantiales o la mitigación de sus efectos.

La descarga del material desazolvado es más seguro realizarlas en áreas confinadas, debido a que se pueden generar impactos negativos puntuales en las características físicas, químicas y biológicas del

lugar donde se depositen, por lo que se recomienda realizar la disposición final en bancos de tiro autorizados por el SMADSOT.

Se recomienda preparar un plan de mediciones calidad del agua en las áreas intervenidas, a fin de identificar posibles impactos, principalmente en materia sólidos en suspensión y pH.

12. Certificación ADVC

Se considera una propuesta de conformación de un área destinada voluntariamente a la conservación (ADVC); esto a partir de la urgencia de rescatar y mantener sanos diversos sitios con el fin de regular la temperatura, obtener servicios y beneficios ecosistémicos de mayor calidad, mejorar la calidad del agua y aire, y conservar diversas especies de flora y fauna, la Ley General del Equilibrio Ecológico en su Art. 77 Bis, refiere un instrumento de gran plasticidad social y ambiental, las “Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación”; son sitios que ayudan a preservar la biodiversidad y el equilibrio ecológico en nuestro país, favoreciendo la participación de la sociedad en procesos de gobernanza ambiental y sustentable.

El sitio denominado “La Ciénega”, se certifica con “Área de uso Público, con vocación turística y de producción de peces para consumo humano”, resultado del trabajo de gestión y colaboración del sector social con el gobierno del Estado de Puebla, la Federación a través de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, los Ayuntamientos de los municipios de Zinacatepec y San José Miahuatlán.

De acuerdo con los elementos identificados en el estado actual de la zona y a las consideraciones para la zonificación de las unidades de paisaje, se sugieren zonas en las que se pueden implementar acciones de manejo y protección similares y donde puede ser aplicada una sola política de uso y manejo. Esto facilitará la actividad de administración de La Ciénega en conjunto.

Tabla 10.7 Plan de manejo, zonas y unidades de paisaje.

Zonas	Unidades de Paisaje
Protección (P)	A. La Ciénega, Tochatl, y San Pedro.
Uso Restringido (UR 1)	B. San Pedro y Tochatl.
Uso Restringido (UR 2)	C. Zona sur del La Ciénega.
Uso Restringido (UR 3)	D. Áreas de cultivo aledañas al complejo manantial (restringir su crecimiento)
Uso Tradicional (UT)	E. Zona norte de La Ciénega
Aprovechamiento Sustentable de los Recursos Naturales (ASRN)	F. Zona norte de La Ciénega (corrales y maternidades para la producción de peces, zona de alimentos y servicios sanitarios)
Zona de Recuperación (Rec.)	G. Toda el área circundante al complejo manantial en un radio mínimo de 100 m.
Zona de Conservación (C)	H. Toda la Zona circundante de forma inmediata y hasta los 50 m. A partir del embalse más alto.
Zona de Restauración (Rest. 1)	I. Las áreas forestales adyacentes a los ojos de agua
Zona de Restauración (Rest. 2)	J. Las áreas forestales en la parte media y alta de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

13. Programa de educación ambiental

Es necesario desarrollar estrategias de difusión de los programas de cultura del agua existentes, de acuerdo con la región y/o municipio; se propone la elaboración de un programa de difusión que logre permear en un amplio sector de la población, esto puede ser fortalecido mediante la capacitación de promotores de cultura del agua por municipio y/o localidad. Solicitar el apoyo, a las dependencias correspondientes, para la elaboración de material didáctico que refuerce las acciones propuestas en el programa de difusión.

14. Campaña de limpieza de residuos sólidos urbanos

- **Instrumentos normativos** donde se propone crear un comité comunitario encargado de dar seguimiento a las actividades; asimismo, generar un reglamento interno de disposición y separación de residuos en el área circundante a los manantiales.

- **Infraestructura y equipamiento:** adquisición de contenedores para residuos sólidos urbanos y señalización para su correcta separación, en zonas de mayor concurrencia en el área circundante a los manantiales.
- **Comunicación y capacitación:** concientización a la población de la importancia de la correcta separación y disposición de los residuos; difusión sobre el manejo de los residuos; y promoción de la revaloración de los residuos y su venta como forma de apoyo para la Ciénega.
- **Campañas periódicas de recolección de residuos:** Establecimiento de jornadas de recolección de residuos.

15. Fortalecimiento al aprovechamiento de cría de peces

Una de las actividades que se realiza dentro del complejo manantial es la cría y comercialización de peces. Actividad que genera ganancias a las personas encargadas de la venta de mojarras. Resulta necesario elaborar un programa conjunto entre ejidatarios y autoridades que fortalezca las iniciativas de la comunidad.

16. Apoyo al aprovechamiento de miel

El sector apícola es en la mayoría de los casos es una actividad informal, que puede representar un ingreso extra derivado de su actividad principal, que es la agricultura; por lo cual, no se han implementado acciones orientadas a mejorar los procesos productivos de la miel, y se siguen realizando de manera rústica y poco eficiente, obteniendo como resultado un producto de baja calidad o de poco conocimiento para los consumidores.

Por lo cual, es necesario diseñar el proceso de producción de miel; diseño de la planta de producción, mapear los procesos, realizar la distribución de planta, y elaborar el manual de organización de funciones. De esta manera, lo que se busca es incentivar la formalización de la actividad apícola en la

región, a través del diseño de procesos que permitan obtener mayores beneficios económicos y un producto final de alta calidad.

17. Proyecto de turismo sustentable

Se propone el desarrollo de un proyecto de turismo sustentable que permita una mayor afluencia de personas hacia la zona y por lo tanto mayores ingresos económicos. Lo anterior, en apego a lo estipulado en el programa de la ADVC, en cuanto a las zonas definidas como de aprovechamiento. La propuesta contempla los siguientes componentes:

- Preliminares del terreno
- Acceso
- Estacionamiento
- Senderos
- Muelles
- Mirador
- Cabañas ecológicas
- Sistema fotovoltaico
- Área de comida

Tabla 10.8 Programa de Ejecución.

Acciones		Tipo de Obra			1 año												2 año											
Tipo	No	Actividad	Cantidad	Unidad	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ESTRUCTURALES	1	Zanja bordo	34.45	ha	█	█	█																					
	2	Zanja trinchera	74.03	ha	█	█	█	█																				
	3	Bordos a curvas de nivel	81.99	ha					█	█																		
	4	Bordo almacenador de escorrentías	2	Bordo		█	█	█											█	█								
	5	Protección (Cercado)	3.5	km															█	█	█							
	6	Zanja de escorrentía	1.3	km					█	█																		
	7	Asesoría técnica Mantenimiento	373.37	ha		█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
CONSERVACIÓN		Sistemas agroforestales						█	█	█	█	█	█	█	█													
	8	Bordos a curva de nivel	182.00	ha				█	█																			
		Reforestación									█	█	█	█								█	█	█	█			
		Cultivo							█	█	█	█	█	█	█						█	█	█	█	█	█	█	
9	Desazolve del manantial La Ciénega	966.74	m ³			█	█	█																				

Acciones		Tipo de Obra			1 año												2 año											
Tipo	No	Actividad	Cantidad	Unidad	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
PROYECTOS SUSTENTABLES	10	Certificación ADVC	1	Polígono																								
	11	Programa de educación ambiental	1	Programa																								
	12	Programa de limpieza de RSU	1	Programa																								
	13	Fomento al aprovechamiento de cría de peces	1	Programa																								
	14	Proyecto producción de miel	1	Programa																								
	15	Turismo sustentable	1	Proyecto																								

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Beneficios de la implementación de las acciones:

Sociales: Con la implementación de las acciones se considera se tendrá una serie de beneficios ambientales, como sociales y económicos, con una población beneficiada directa de al menos la población de los municipios de la zona de estudio, Ajalpan, San José Miahuatlán y Zinacatepec: 80,976, sin embargo, las obras tendrán un efecto directo sobre la población del acuífero en general.

Ambientales: Dentro de los beneficios ambientales se tiene la restauración de suelos, incremento de la infiltración de agua y recarga del acuífero, mayor disponibilidad del líquido vital para los sectores productivos, recuperación y conservación de ecosistemas y biodiversidad, aseguramiento de la continuidad de los servicios ecosistémicos proporcionados por el recurso hídrico, así como restauración paisajística de la zona a intervenir.

Económicos: Reactivación de la economía local mediante implementación de turismo de naturaleza, valorización de productos propios de las comunidades e incremento de rendimiento agrícola en función a la captación y recuperación de agua. El contar con actividades recreativas y de concientización sobre los servicios ecosistémicos proporcionados por los elementos naturales, se espera la asistencia de población en general, así como de escuelas que participen en los programas de limpieza de residuos y de educación ambiental.



11

**EVALUACIÓN DE LAS OBRAS
DE RESTAURACIÓN EXISTENTES**



II. Evaluación de las obras de restauración existentes

En lo que se refiere a las obras de restauración y su prioridad, existen diversos criterios para elegirlos. Un criterio inicial, es la factibilidad; un segundo criterio, el tiempo para obtener los beneficios; un tercer criterio, es el costo.

Un análisis de priorización de acciones, de acuerdo con su factibilidad, viabilidad y costo, normalmente establece las siguientes prioridades, aplicables igualmente en el acuífero del Valle de Tehuacán.

1. Ordenamiento

- a. Ordenamiento en el aprovechamiento del agua
- b. Ordenamiento en las descargas y fuentes potenciales de contaminación
- c. Ordenamiento territorial (incluye manejo adecuado del suelo) y reglamentación del acuífero.

2. Protección y recuperación de la recarga pluvial

- a. Detener procesos de deforestación por cambio de uso de suelo
- b. Proyectos de manejo de cuencas y recarga de acuíferos, para proteger y recuperar la capacidad de recarga

A través de las acciones anteriores, sería suficiente para recuperar el equilibrio en el acuífero del Valle de Tehuacán, por no presentar niveles de sobreexplotación tan altos como otros acuíferos sobreexplotados del país.

En paralelo y como una medida para mantener las superficies agrícolas productivas, así como los usos que utilizan volúmenes excesivos de agua, es conveniente la promoción de acciones sobre la demanda, como son:

3. Uso eficiente del agua

- a. Tecnificación agrícola
- b. Recuperación de fugas en redes de agua potable

4. Aprovechamiento de agua tratada y recarga con agua tratada

- a. Aprovechamiento de agua tratada, para sustituir el uso excesivo de agua subterránea
- b. Recarga artificial de agua tratada.

De acuerdo con estudios que obran en poder del Comité de Aguas Subterráneas del Acuífero del Valle de Tehuacán (Cotas), en los últimos tres años el abatimiento de los mantos acuíferos en esta región se sigue presentando sólo que es en menor proporción en comparación con años pasados. De acuerdo con información que han recabado, encontraron que la reducción que están registrando los pozos va de 30 a 40 centímetros y esto es resultado a todas las actividades de conservación que hacen usuarios y distintas dependencias gubernamentales.

De acuerdo con un análisis de la información estadística que se tiene en Cotas, de un periodo de 15 años a hace cuatro años, encontraron que existía una tendencia a la baja en los mantos acuíferos que iba de los 80 centímetros hasta el metro. Los datos recabados en el último trienio no son los suficientemente alentadores pero sí marcan un avance en la conservación del entorno, hacen falta más obras, más participación de la población y dependencias de gobierno porque todos son consumidores de agua, "pero sí, por el trabajo que se ha hecho ha coadyuvado a que se vayan regenerando las fuentes de abasto".

Por la estadística que frecuentemente están recabando en la región, los municipios de Ajalpan y Tehuacán son las poblaciones que han registrado un mayor crecimiento poblacional, en consecuencia, hay una mayor demanda de agua, por eso existe cierta alerta porque a la larga el abasto de agua puede ser más difícil. Los niveles de agua en época de estiaje tienden a bajar porque no hay recarga, además el uso de agua es mayor en la población, todo esto ocasiona que el acuífero baje. Ante eso los campesinos y ejidatarios trabajan de manera coordinada con dependencias como

la Comisión Nacional Forestal y la SEMARNAT para dar seguimiento a las actividades de reforestación que realizan.

Entre las acciones para disminuir la descarga, destaca el ordenamiento del acuífero, para evitar posibles aprovechamientos que realicen una extracción sin contar con el amparo de un título de concesión, o mediante un título de concesión que respalde un aprovechamiento menor al extraído realmente, situación que requiere de la instalación de medidores volumétricos en los pozos. Vale la pena destacar, que debido a que la profundidad del acuífero en la zona de los manantiales, es accesible para la perforación de norias, aún resulta una zona susceptible a la proliferación de norias, para las cuales debe asegurarse que únicamente se perforen si cuentan con título de concesión en orden.

Conclusión

Existen diversos criterios para seleccionar obras de restauración y su prioridad. De acuerdo con su factibilidad, viabilidad y costo, las acciones aplicables para recuperar el equilibrio en el acuífero Valle de Tehuacán son:

1. Ordenamiento.
2. Protección y recuperación de la recarga pluvial.

En paralelo y como una medida para mantener las superficies agrícolas productivas, así como los usos que utilizan volúmenes excesivos de agua, es conveniente la promoción de acciones sobre la demanda, como son:

3. Uso eficiente del agua.
4. Aprovechamiento de agua tratada y recarga con agua tratada.

De acuerdo con un análisis de la información estadística que se tiene en el Comité de Aguas Subterráneas del Acuífero del Valle de Tehuacán (Cotas), de un periodo de 15 años a hace cuatro

años, encontraron que existía una tendencia a la baja en los mantos acuíferos que iba de los 80 centímetros hasta el metro.

Los municipios de Ajalpan y Tehuacán son las poblaciones que han registrado un mayor crecimiento poblacional, en consecuencia, hay una mayor demanda de agua. Los niveles de agua en época de estiaje tienden a bajar porque no hay recarga, además, el uso de agua es mayor en la población, todo esto ocasiona que el acuífero baje. Ante eso están trabajando coordinadamente campesinos y ejidatarios con dependencias como la Comisión Nacional Forestal y la SEMARNAT para dar seguimiento a las actividades de reforestación que realizan en diversos estados.

En el Valle de Tehuacán, se han estudiado y propuesto acciones para proteger, recuperar e incrementar la recarga, principalmente en la Sierra Negra. Adicionalmente, se encuentra, la posibilidad de realizar recarga artificial con agua tratada.

Entre las acciones para disminuir la descarga, destaca el ordenamiento del acuífero, situación que requiere de la instalación de medidores volumétricos en los pozos. Vale la pena destacar que la profundidad del acuífero en la zona de los manantiales es accesible para la perforación de norias.



12

CENSO DE LA MICRO-CUENCA

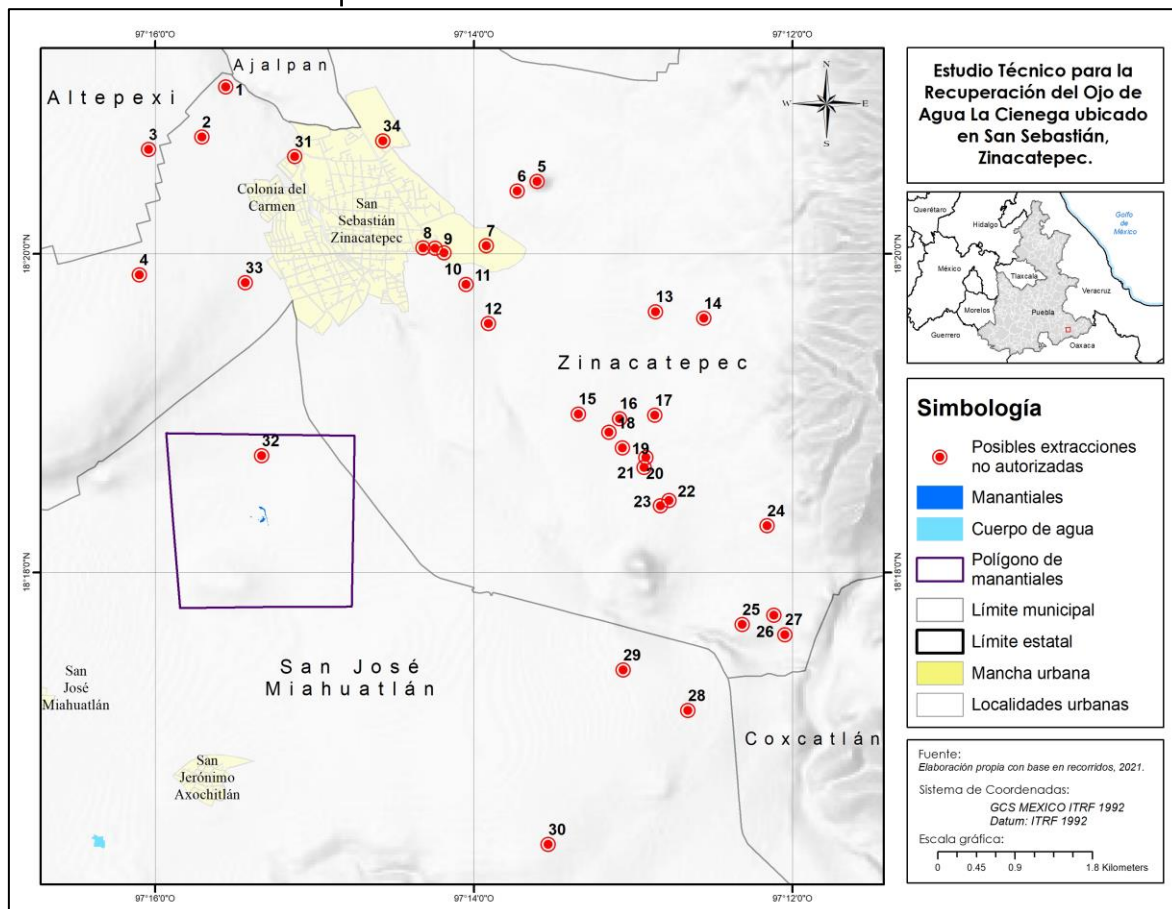


12. Censo de la micro-cuenca

12.1 Posibles aprovechamientos no autorizados

En los recorridos recientemente realizados, se identificó un conjunto de sitios, donde hay aprovechamientos, que se sugiere sean considerados para la actualización del censo, con el fin de verificar su estatus. Esto, sin menoscabo de integrar el censo actualizado de aprovechamientos con la totalidad de estos. De acuerdo con el REPGA, en los municipios de Ajalpan, San José Miahuatlán y Zinacatepec existe un total de 164 aprovechamientos y sólo 12 descargas autorizadas, siendo estas en su mayoría de las grandes empresas avícolas de la región, así como de los mismos municipios y finalmente algunas de las unidades médicas del IMSS.

Mapa 12.1 Posibles extracciones no autorizadas.



Fuente: Elaboración propia con base en recorridos, 2021.

Dentro de los posibles aprovechamientos no registrados se encuentran los siguientes:

PPNR-01 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se localiza en la entrada de Zinacatepec en la Calle Alvarez con las coordenadas 683932 E, 2029880 N, a atrás de la granja de Mr.Egg y puede ser usado para abastecer a la Granja o para riego.

PPNR-02 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se localiza en la carretera Puebla-Zinacatepec con las coordenadas 683674 E, 2029298 N, al parecer el bombeo del agua es ocupada para llenar una estanque para posteriormente se ocupado en el riego del invernadero.

PPNR-03 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en los invernaderos de La predera Mixteca localiza en la carretera Puebla-Zinacatepec y colindando con San Gabriel Chilac con las coordenadas 683087 E, 2029149 N, al parecer el bombeo del agua es ocupada para llenar una estanque para posteriormente se ocupado en el riego del invernadero.

PPNR-04 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en los invernaderos de La predera Mixteca localiza en la carretera Puebla-Zinacatepec y colindando con San Gabriel Chilac con las coordenadas 682996 E, 2027695 N, al parecer el bombeo del agua es ocupada para llenar una estanque para posteriormente se ocupado en el riego del invernadero.

PPNR-05 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en la iglesia San Sebastian en la calle Manuel Bartlett Díaz con las coordenadas 687387 E, 2028817 N, al parecer el bombeo del agua es ocupada para la iglesia.

PPNR-06 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en la calle Manuel Bartlett Díaz con las coordenadas 687168 E, 2028705 N, al parecer el bombeo del agua es ocupada para la un invernadero.

PPNR-07 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra entre calle Manuel Bartlett Díaz y las callea A Mazatepec con las coordenadas 686831 E, 2028067 N, al parecer el bombeo del agua es ocupada para llenar un estanque, para que se pueda utilizar en el riego del Invernadero.

PPNR-08 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en una casa particular en la calle Porfirio Díaz y las calle Emiliano Carranza con las coordenadas 686131 E, 2028037 N, al parecer el agua es ocupada para uso domestico

PPNR-09 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en una casa o establo de animales en la calle Porfirio Díaz y las calle Emiliano Carranza con las coordenadas 686267 E, 2028033 N, al parecer el agua es ocupada para variados usos.

PPNR-10 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria atrás de una bodega, rumbo a la carretera Teotitlán-Tehuacán con las coordenadas 686365 E, 2027980 N, al parecer el bombeo del agua fue ocupada para las actividades de la Bodega.

PPNR-11 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en una Tabiguera rumbo a la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 686613 E, 2027619 N, el agua puede ser ocupada para la elaboracion de Tabiques.

PPNR-12 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra atrás de una Gasolinera rumbo a la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 686865 E, 2027167 N, el agua puede ser ocupada para las actividades de servicios de la Gasolinera.

PPNR-13 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra entre la carretera Teotitlan-Tehuacan y los limites de la reserva de la Biosfera Tehuacan-Cuicatlan con las coordenadas 688711 E, 2027322 N, el agua es utilizada para llenar un estanque de agua que sera ocupado para diversos usos.

PPNR-14 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra entre la carretera Teotitlan-Tehuacan y los límites de la reserva de la Biosfera Tehuacan-Cuicatlan con las coordenadas 689247 E, 2027251 N, el agua es utilizada para llenar un estanque de agua que sera ocupado para diversos usos.

PPNR-15 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en una Tabiguera rumbo a la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 687869 E, 2026128 N, el agua puede ser ocupada para la elaboración de Tabiques.

PPNR-16 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra entre la carretera Teotitlan-Tehuacan y los límites de la reserva de la Biosfera Tehuacan-Cuicatlan con las coordenadas 688326 E, 2026079 N, el agua es utilizada para regar cultivo.

PPNR-17 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra entre la carretera Teotitlan-Tehuacan y los límites de la reserva de la Biosfera Tehuacan-Cuicatlan con las coordenadas 688714 E, 2026121 N, el agua es utilizada para llenar un estanque, para posteriormente ser utilizada en riego.

PPNR-18 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en una Tabiguera rumbo a la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 688209 E, 2025918 N, el agua puede ser ocupada para la elaboración de Tabiques.

PPNR-19 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra entre la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 688359 E, 2025739 N, el agua es utilizada para riego de cultivo.

PPNR-20 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra entre la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 688621 E, 2025632 N, el agua es utilizada para llenar un estanque, para posteriormente ser utilizada en riego de cultivo de un invernadero.

PPNR-21 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra entre la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 688604 E, 2025517 N, es utilizada para llenar un estanque, para luego ocuparla en el riego de cultivo.

PPNR-22 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 688883 E, 2025135 N, en una especie de granja o establos, el agua es utilizada para diversos servicios.

PPNR-23 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en la carretera Teotitlan-Tehuacan en un domicilio particular con las coordenadas 688788 E, 2025075 N, el agua es utilizada para usos domésticos.

PPNR-24 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra entre la carretera Teotitlan-Tehuacan y los límites de la reserva de la Biosfera Tehuacan-Cuicatlan con las coordenadas 689971 E, 2024855 N, el agua es utilizada para uso doméstico y para la agricultura.

PPNR-25 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en una Granja en la carretera Teotitlan-Tehuacan a tras de la Plaza San Pedro con las coordenadas 689708 E, 2023705 N, el agua es utilizada para llenar para diversos servicios.

PPNR-26 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en un especie de rancho, ubicado en la carretera Teotitlan-Tehuacan rumbo a Calipan, al frente de la Plaza San Pedro con las coordenadas 690057 E, 2023817 N, el agua es utilizada para llenar para diversos servicios.

PPNR-27 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra atrás de un restaurante ubicado en la carretera Teotitlan-Tehuacan rumbo a Calipan, y la Desviación de San Jose Axuxco con las coordenadas 690181 E, 2023594 N, el agua es utilizada para llenar para diversos servicios.

PPNR-28 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en una granja Porcina ubicado entre la carretera Teotitlan-Tehuacan camino a San Jose Axuxco con las coordenadas 689116 E, 2022705 N, el agua es utilizada para llenar para diversos servicios de la granja.

PPNR-29 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en una granja Porcina ubicado entre la carretera Teotitlan-Tehuacan camino a San Jose Axuxco con las coordenadas 688395 E, 2023166 N, el agua es utilizada para llenar para diversos servicios de la granja.

PPNR-30 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en una granja ubicada en el camino a San Jose Axuxco con las coordenadas 687584 E, 2021138 N, el agua es utilizada para llenar para diversos servicios de la granja.

PPNR-31 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en un predio particular en la calle Aquiles Serdán con las coordenadas 684703 E, 2029080 N, al parecer el agua es ocupada para invernaderos.

PPNR-32 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en el camino de la Ciénega con las coordenadas 684371 E, 2025610 N, el agua es utilizada para llenar un estanque para luego ser utilizado en el riego de cultivo.

PPNR-33 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo-noria se encuentra en una Tabiguera rumbo a la carretera Teotitlan-Tehuacan con las coordenadas 684171 E, 2027613 N, el agua almacenada en un estanque y posteriormente ser utilizada para la elaboración de Tebiques.

PPNR-34 (Posible Pozo No Registrado)

El posible pozo se encuentra en una propiedad privada ubicada entre calle del Arco y calle Porfirio Diaz con las coordenadas 685675 E, 2029272 N, al parecer el bombeo del agua es utilizado en el riego de Invernaderos.

12.2 Industrias existentes en la zona de estudio

Igualmente se realizó un inventario de las industrias de la zona, así como establecimientos comerciales, que eventualmente pueden incidir, ya sea en la calidad del agua a través de sus descargas, o en la situación del acuífero, por medio del aprovechamiento de agua subterránea.

12.3 Posibles descargas no registradas

Como se comentó con antelación, se identificó el número de establecimientos comerciales e industrias establecidas en la micro cuenca. Las industrias o establecimientos que se presentan a continuación se encuentran registradas en la base de datos de DENUÉ y ninguna de ellas se encuentra registradas en el REPDA por lo que se infiere que no tienen registradas sus descargas. De igual manera, en recorridos se identificaron descargas en campo.

Se consideraron los establecimientos con un número de empleados mayor a las 10 personas, con actividades presumiblemente contaminantes y que no se encuentren en el centro de la población, ya que se infiere que los que están establecidos en las cabeceras municipales deben estar conectados al drenaje municipal.

Tabla 12.1 Descargas identificadas en Registro Público de Derechos de Agua y otras identificadas en campo.

Titular	BACHOCO, S.A. DE C.V. (GRANJA TLACUALPA Y/O INCUBADORA)
Título	10PUE112865/28GMDLI5
Uso	PECUARIO
Autoridad que emite el acto	Dirección local Puebla
Fecha de registro	22/05/2003
Volumen de extracción de aguas nacionales (m ³ /año)	0
Número de anexos de aguas superficiales	0
Volumen de aguas superficiales (m ³ /año):	0
Número de anexos de aguas subterráneas	0
Volumen de aguas subterráneas (m ³ /año):	0
Número de anexos de descarga:	1
Volumen de descarga (m ³ /día):	3.75
Número de anexos de zonas federales:	0
Superficie (m ²):	0,00

No.	I
Latitud	18°21'16.0000"
Longitud	97°14'50.0000"
Estado	PUEBLA
Municipio	ZINACATEPEC
Región Hidrológica	PAPALOAPAN
Cuenca	0
Cuerpo Receptor	SUELO

Descarga Afluente	NO APLICA
Procedencia	SERVICIOS SANITARIOS
Forma Descargar	INFILTRACION (POZO ABSORCION)
Tipo	PECUARIO
Volumen Descarga (m ³ /día)	3.75
Volumen Descarga (m ³ /año)	1,368.80

No.	1	2
Latitud	18.325983°	18.327845°
Longitud	-97.244128°	-97.241367°
Estado	PUEBLA	PUEBLA
Municipio	ZINACATEPEC	ZINACATEPEC
Región Hidrológica	PAPALOAPAN	PAPALOAPAN
Cuenca		
Cuerpo Receptor	GALERIA FILTRANTE	RIO TEHUACAN
Descarga Afluente		RIO TEHUACAN
Procedencia	MUNICIPAL	MUNICIPAL
Forma Descargar	CONTINUA	CONTINUA
Tipo		
Volumen Descarga (m ³ /día)		
Volumen Descarga (m ³ /año)		
Observaciones	Se observa una descarga en una galería filtrante para uso agrícola.	Se descarga agua residual en el río Tehuacán, sin ningún tipo de tratamiento

Fuente: Elaboración propia con datos de REPDA y visitas de campo, 2021.

Figura 12.1 Fotografías de descargas ubicadas en recorridos de campo.



Figura 12.1 Fotografías de descargas ubicadas en recorridos de campo.



Fuente: Elaboración propia con datos de REPDA y visitas de campo, 2021.

Tabla 12.2 Lista de posibles descargas no registradas.

Nombre de clase de la actividad	personal ocupado	Nombre de la vialidad	Núm ext o km	Letra exterior	Tipo de asentamiento humano	Nombre de asentamiento humano	Número de teléfono	Latitud	Longitud
Lavanderías y tintorerías	11 a 30 personas	CALLE DEL ARCO		SN	COLONIA	LA HERMITA		18.3431384	-97.2443514
Lavanderías y tintorerías	11 a 30 personas	RAFAEL RAMIREZ		SN	COLONIA	SAN RAFAEL		18.3355374	-97.2523392
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	6 a 10 personas	JESUS CARRANZA		SN	COLONIA	ZENTLAPALT	2361128729	18.3306741	-97.2493511
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	NINGUNO	511		COLONIA	ZENTLAPAL		18.3319425	-97.2488591
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	16 DE SEPTIEMBRE	210		COLONIA	ZENTLAPALT	2363742141	18.3335359	-97.2511122
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	0 a 5 personas	CRISTO REY		SN	COLONIA	LA HERMITA		18.3439825	-97.2489365
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	6 a 10 personas	13 DE SEPTIEMBRE	104		COLONIA	ZENTLAPAL		18.334905	-97.2500131
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	NICOLAS BRAVO	203		COLONIA	TLATZALA		18.3341448	-97.241352
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	AQUILES SERDAN	0	SN	COLONIA	BARRIO ZENTLAPATL		18.3355948	-97.2500925
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	NINGUNO		SN	COLONIA	TLATZALA	2361021112	18.3328432	-97.2416913
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	6 a 10 personas	CORAZON DE JESUS	2		COLONIA	ZENTLAPALT		18.3321282	-97.2511502
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	RAFAEL RAMIREZ	0	SN	COLONIA	DEL CARMEN SEGUNDA SECCION	2361001484	18.3351383	-97.2522086
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	NINGUNO		SN	COLONIA	NUEVA ESPAÑA		18.3381348	-97.2397279
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	CALLE DE LAS AMERICAS	108		COLONIA	ZENTLAPALT		18.3328602	-97.2537503
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	6 a 10 personas	NINGUNO		SN	COLONIA	ZINACATEPEC		18.3418259	-97.2421104
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	6 a 10 personas	CALLE DEL SUSPIRO		SN	COLONIA	ZENTLAPAL	2.36236E+12	18.3319967	-97.2494977
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	MIGUEL HIDALGO	301		COLONIA	ZINACATEPEC		18.3378127	-97.2451065
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	MALINTZI	217		COLONIA	ZINACATEPEC		18.3386917	-97.2485032
Confección en serie de otra ropa exterior de materiales textiles	11 a 30 personas	16 DE SEPTIEMBRE	511		COLONIA	ZENTLAPALT	2361022730	18.3307685	-97.2500125

Fuente: Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2021.



13

**PLAN DE MANEJO
INTEGRAL DEL ACUÍFERO**



13. Plan de manejo integral del acuífero

La importancia de las aguas subterráneas en el desarrollo social y económico suele ser ignorada debido a que es un recurso oculto. Los humanos con frecuencia subestimamos el valor de las aguas subterráneas en la economía y para el desarrollo económico, ya que se asume que los manantiales y pozos, de los cuales dependen, continuarán abasteciéndolos con agua dulce de alta calidad para siempre. De seguir con estos supuestos, se perderán los beneficios del agua subterránea para el desarrollo.

Cuando la gestión de las aguas subterráneas es sostenible, sus contribuciones se reflejan en múltiples dimensiones del desarrollo sostenible. Este modelo de gestión puede asegurar el abastecimiento de agua resiliente al clima para ayudar a cumplir las metas de seguridad alimentaria, desarrollo energético y acceso al agua potable.

La gestión sostenible de acuíferos es clave para la conservación de ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en áreas de descarga. La contaminación y la extracción inmoderada, amenazan el abastecimiento de agua potable para cientos de millones de personas. La degradación de los recursos de aguas subterráneas también reduce el rol compensador contra la sequía y escasez hídrica, teniendo impactos por consiguiente en la sostenibilidad de ecosistemas, en la conservación de la biodiversidad, así como también para la adaptación y resiliencia al cambio climático.

La intención del Plan de manejo es la de construir una agenda para la gestión de las aguas subterráneas. Intentado ser una guía sobre los pasos necesarios para la transición de las prácticas habituales y la sobreexplotación de acuíferos hacia una gestión sostenible de las aguas subterráneas. Es fundamental la participación de todos, el diseño de la gobernanza, los programas de incentivos y las prácticas de manejo. De lo contrario, la gestión de las aguas subterráneas continuará siendo una actividad tecnocrática de arriba hacia abajo con resultados insatisfactorios.

La gestión sostenible de las aguas subterráneas contribuye a la conservación de la biodiversidad con la finalidad de asegurar los servicios ecosistémicos proporcionados por la misma y de los cuales dependen tanto sistemas biológicos, como la población y el desarrollo económico de una región.

Las obras estructurales, prácticas de conservación y restauración de suelos, son acciones que contribuyen a disminuir la erosión del suelo e incrementan la captación de agua tanto en laderas como en cárcavas, también incrementan la fertilidad del suelo, lo que contribuye a la sobrevivencia de las plantas en trabajos de reforestación.

Para definir el tipo de obra a realizar, se debe caracterizar el relieve y su ubicación dentro del predio, con el fin de identificar si dentro del mismo hay planicies, cárcavas, escurrimientos, afloramiento de rocas, zonas con actividades económicas, entre otras para definir la práctica que se requiere.

La disponibilidad de materiales dentro del predio, que pudieran utilizarse para realizar las obras, como material vegetal muerto, piedras, etc., siempre y cuando su movimiento o remoción de estas no contribuya a la erosión del suelo; así como las características del mismo suelo (textura y profundidad) determinarán la viabilidad de la apertura de zanjas, bordos, roturaciones, además del tipo de herramientas y/o maquinaria a utilizar

Es importante mencionar que no es estrictamente necesario que se realice un solo tipo de obra o práctica en todo el predio, puede haber combinaciones de dos o más, todo depende de la disponibilidad de materiales y el requerimiento de restauración para el terreno.

Como se comentó anteriormente, los principales criterios considerados para la selección de obras y de las zonas propuestas para su implementación fueron de mayor a menor importancia: El uso de suelo, la ubicación y grado de erosión de las parcelas cercanas a la zona del manantial y la dirección de los escurrimientos superficiales.

13.1 Acciones estructurales

Con base a las condiciones y características del área de interés, el manantial “La Ciénega”, se propone ejecutar las siguientes obras de suelo y agua:

1) Zanja bordo.

Excavaciones sobre la curva de nivel, se realizan de manera manual, utilizando pico y pala, son de longitud variable de acuerdo a las dimensiones del predio a intervenir, para el caso que nos ocupa, se deberá considerar una separación entre curvas a nivel cada 20 m, zanjas de 0.4 m de ancho X 0.4 m de profundidad, bordos de 0.6 m de base y 0.35 m de altura, cada 5 m incluye tabique divisor de 0.5 m de longitud, el bordo debe conformarse y compactarse.

Lo anterior nos determina que se realizarán 500 metros lineales de obra por hectárea, recomendando que se realicen con pico y pala, o bien con algún instrumento manual utilizado en la región como herramienta de trabajo para escarbar.

Las zanjas bordo deberán trazarse sobre las curvas de nivel, por lo que previo a la ejecución de los trabajos deberá realizarse el trazo correspondiente, señalando la ubicación por dónde va la línea a seguir, con cal, estacas o señalética con montículos de piedras. Lo conveniente es que al mismo tiempo que se trace se vaya realizando la obra, o bien dejando tareas a cada uno de los participantes a fin de que cada uno se responsabilice de su tramo, dejando a un supervisor de campo, quien deberá verificar la correcta ejecución y cantidad de obra a realizar.

Se recomienda que la primera línea se trace al centro del predio, a fin de generar una línea guía, desde donde se continúe hacia arriba y hacia abajo de la misma.

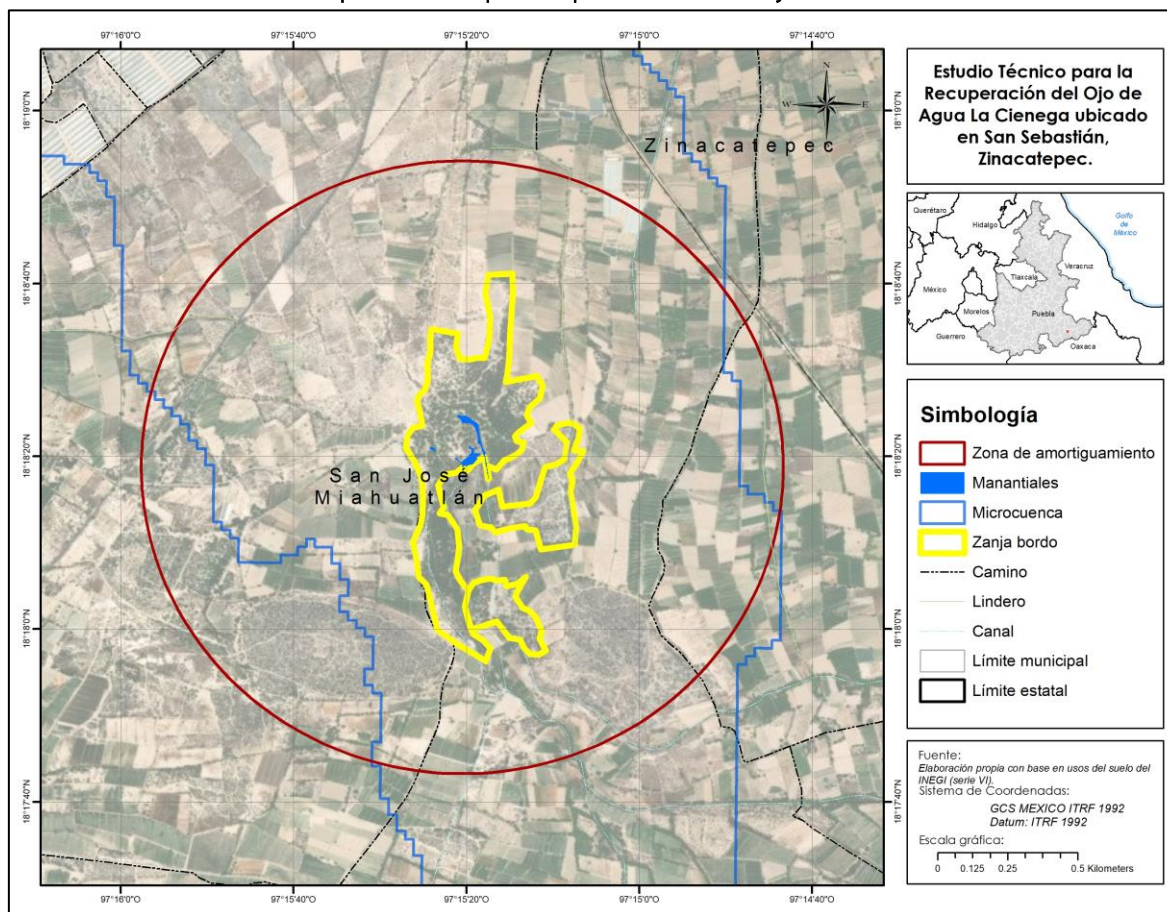
Figura 13.1 Zanja Bordo.



Fuente: El Regional Informativo, 2018.

La superficie considerada para establecer zanjas bordo en curvas de nivel, como obra de conservación de suelo y agua es de **34.5 ha**, aproximadamente. Se deberá hacer uso de mano de obra e instrumentos manuales como pico, azadón y pala para alcanzar las dimensiones recomendadas en las obras. (Ver mapa 13.1).

Mapa 13.1 Propuesta para realizar Zanja Bordo.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

2) Zanja trinchera (tinas ciegas)

Las zanjas trincheras, también denominadas tinas ciegas, son zanjas que van sobre líneas a curvas de nivel. Requieren de una separación entre curvas a nivel cada 12.5 m, zanjas de 0.4 m de ancho X 0.4 m de profundidad y 2 m de longitud, bordos de 0.6 m de base y 0.35 m de altura. El bordo debe conformarse y compactarse, estas obras deben realizarse a pico y pala, u otro instrumento manual utilizado en la región, la cantidad de obra son 500 metros lineales por hectárea. La separación entre líneas igual dependerá de la disponibilidad y aceptación de los dueños del recurso.

Las líneas a curvas a nivel deberán trazarse previamente, con auxilio del aparato A, construido por los mismos productores y con ayuda de su asesor técnico.

Una vez realizadas las actividades de restauración es importante realizar recorridos de supervisión por el predio de forma periódica con el fin de tomar acción por eventualidades que se pudieran presentar, tales como introducción de ganado, incendios, plagas, enfermedades, entre otros. Lo anterior con el fin de tomar acciones inmediatas.

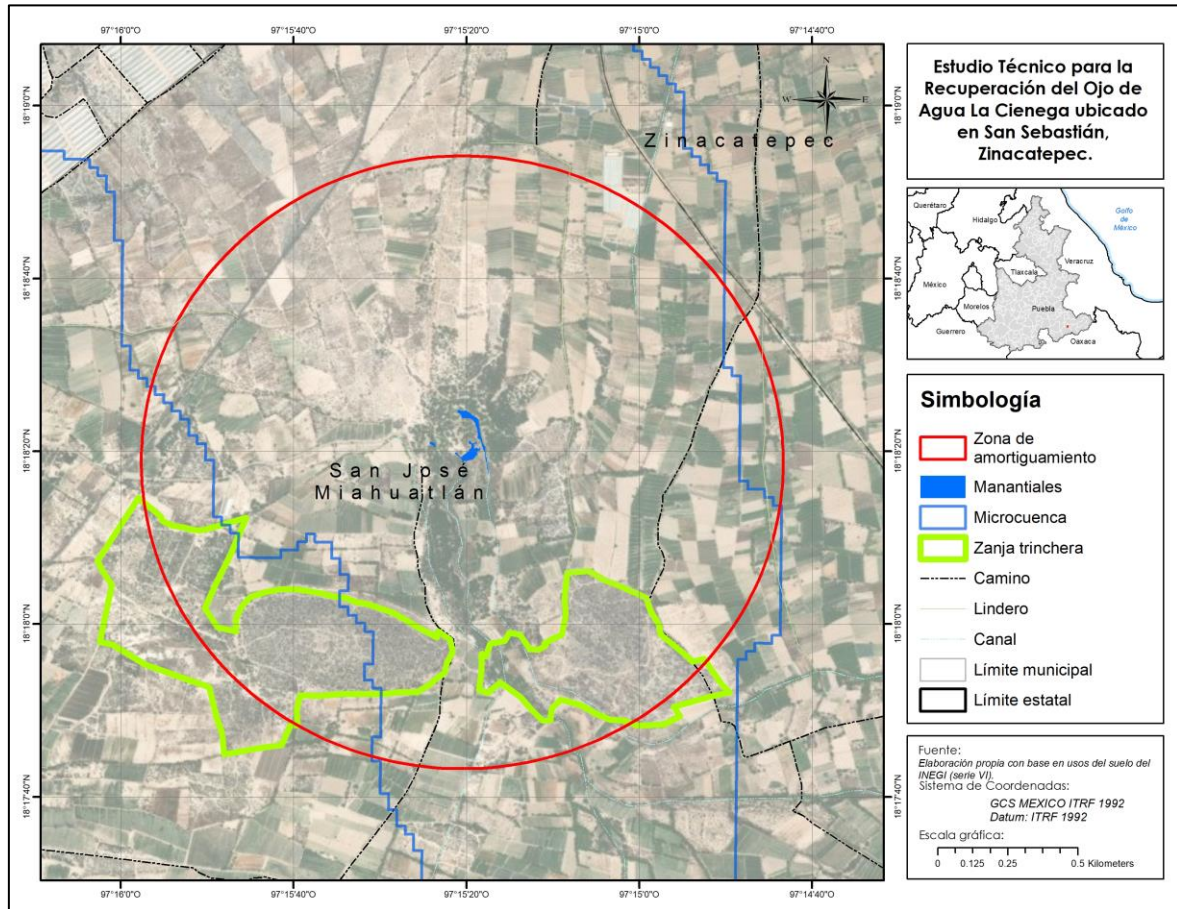
La reforestación en esta área con zanjas trincheras deberá realizarse al siguiente año de concluidas las obras de conservación, utilizando especies locales como el mezquite, (*Prosopis laevigata*) el guaje (*Leucaena leucocephala*), en asociación con maguey pulquero (*Agave salmiana*). La distribución de la planta, en primera instancia, es en ambos lados de la zanja, así como en las zonas que quedan entre las líneas de zanjas trincheras, siguiendo el calendario propuesto más adelante.

Figura 13.2 Zanja Trinchera.



Fuente: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/fsuelos/galeria-suelos.html>

Mapa 13.2 Propuesta para realizar Zanja Trinchera.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

3) Bordos en curvas de nivel.

Este tipo de obra es conveniente que se ejecute con maquinaria, es decir con tractor agrícola, utilizando la bordeadora, debido a que los bordos tendrán una mejor nivelación, su altura y ancho se estandarizarán, el tiempo para su ejecución será menor y quedarán bien distribuidos. La maquinaria deberá seguir líneas a curvas de nivel previamente trazadas.

Figura 13.3 Bordos en curvas de nivel.



Fuente: CONAFOR, 2007.

La superficie donde se pudiera ejecutar la obra de bordo en curvas de nivel, sería aquellas parcelas con agricultura de temporal, que presenten evidencias de degradación, o en algún proceso de alteración de sus condiciones naturales, identificando evidencia de erosión. Estas obras son líneas continuas con ancho de franja según tipo de maquinaria (2.0 a 1.5 m) y de 0.65 a 0.50 m de altura, profundidad de corte mínima de 0.30 m, separados en curvas a nivel cada 10 m, incluye el paso de ripper y bordero o maquinaria similar necesaria para conformar el bordo. También incluye un paso del ripper aguas arriba del bordo para facilitar la infiltración. Para la construcción de esta obra no se deberá remover la cobertura vegetal presente en el predio.

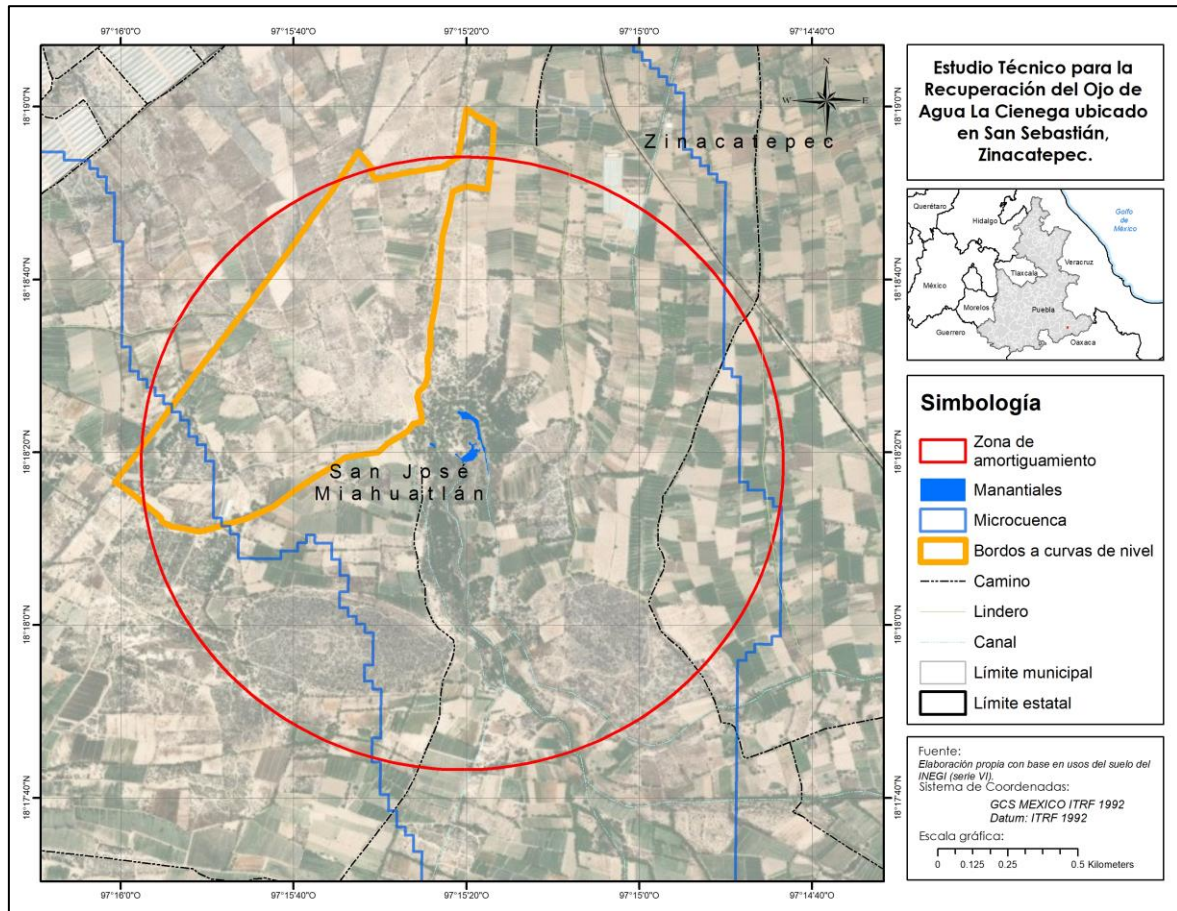
Este tipo de obra generalmente se realiza en terrenos con poca pendiente, donde es factible ocupar la maquinaria para su ejecución, es necesario que el operador del equipo esté debidamente capacitado, tener muy claro las especificaciones de los bordos, cumplir con el objetivo de su construcción. Previamente, deberá realizarse el trazo por donde se construirán los bordos, para el

trazo de las líneas a curvas de nivel en este y demás terrenos donde se construyan obras de conservación, se empleará el aparato A, construido por las mismas personas que lleven a cabo esta actividad de restauración, por supuesto bajo la dirección técnica de un especialista en la materia.

La cantidad de obra recomendable para que estas obras cumplan su función es realizar 1 000 metros lineales por ha. Sin embargo, estas cantidades de obra estarán en función de la disponibilidad y aceptación de los dueños y poseedores del recurso, mínimo se tendrán que realizar 500 metros lineales de obra, sobre curvas de nivel. La superficie considerada en esta actividad es de **81.99 ha**, misma superficie que después de concluir las obras de conservación de suelos, deberá ser reforestada con especies locales y que cumplan la función de evitar la erosión y desprendimiento de azolve, y así evitar que sea arrastrado a los manantiales con su consecuente azolve y reducción del volumen de almacenamiento de agua.

La temporada ideal para que estos trabajos se lleven a cabo se propone en calendario propuesto más adelante, iniciando con las obras de conservación y concluyendo con la reforestación con especies nativas como el maguey y el mezquite, apegados al calendario óptimo de plantación, desde el inicio hasta el final de la temporada de lluvias. (Ver mapa I3.3).

Mapa 13.3 Superficie propuesta para realizar bordos en curvas de nivel.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

4) Bordo almacenador de agua de escorrentía

Son excavaciones realizadas con el fin de almacenar el agua pluvial captada por las zanjas derivadoras de escorrentía. Tienen el propósito de contener las aguas de escorrentía y ayudar a que los sedimentos y otros contaminantes se asienten en el suelo, previniendo o disminuyendo su llegada a los manantiales. Se proponen 2 bordos de almacenamiento de escorrentías, uno a cada lado de la zanja derivadora de escorrentía, con una superficie total de 200 m².

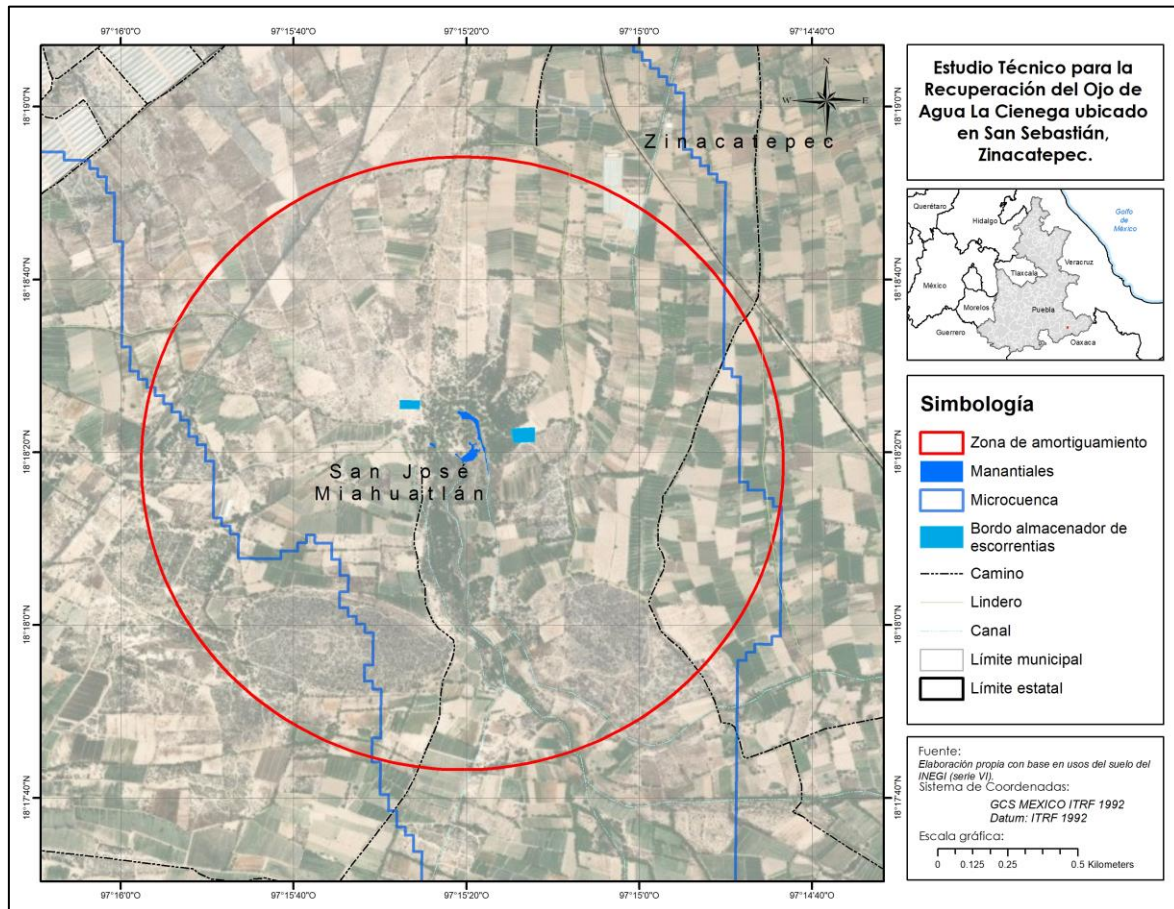
Para la realización del bordo se recomienda el uso de tractor de oruga DC 7 u 8.

Figura 13.4 Bordos almacenador de agua de escorrentía.



Fuente: CCF, 2020.

Mapa 13.4 Superficie propuesta para realizar bordos almacenadores de agua de escorrentía.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

5) Cercado

Se trata de una valla permanente construida con múltiples hilos de alambre de púas, con una extensión de 3.5 km. Este cercado evitaría la entrada de ganado a la zona de alto impacto y, por lo tanto, evitaría los daños provocados por el pisoteo y pastoreo excesivo en la zona.

Este tipo de protección se realizará a fin de atender una problemática previamente identificada (presencia de ganado y/o fauna nociva) dentro de la superficie bajo protección, delimitando el perímetro de esta área.

La protección del área a restaurar considera actividades de cercado. El cercado deberá construirse antes del establecimiento de la plantación y de preferencia antes de realizar las obras y prácticas de conservación de suelos para evitar el pastoreo, debido al daño que provocan a las plantas; así como, la destrucción de las obras o prácticas, además de provocar la compactación del suelo impidiendo la infiltración del agua.

El primer paso es señalar la georreferenciación del recorrido generado con el GPS y la longitud del perímetro a cercar. El cercado de áreas plantadas consiste en el trazo de la línea por donde se establecerá el cerco, limpieza o chaponeo de la vegetación del perímetro de la zona.

La construcción del cercado incluye la compra del material, considerando al menos 4 hilos de alambre de púas, grapas y postes.

Los postes para el cercado podrán ser de madera, metal o concreto, colocados a una distancia promedio de 4 metros y no se deberá extraer material de vegetación presente en la zona (morillos). Se coloca el poste buscando que quede de forma vertical (a nivel), inmediatamente se ahoga la cepa con la misma tierra, piedra, gravilla u hormigón (cemento más grava), y se compacta el material ahogado con la ayuda de un pisón metálico para que el poste quede fijo.

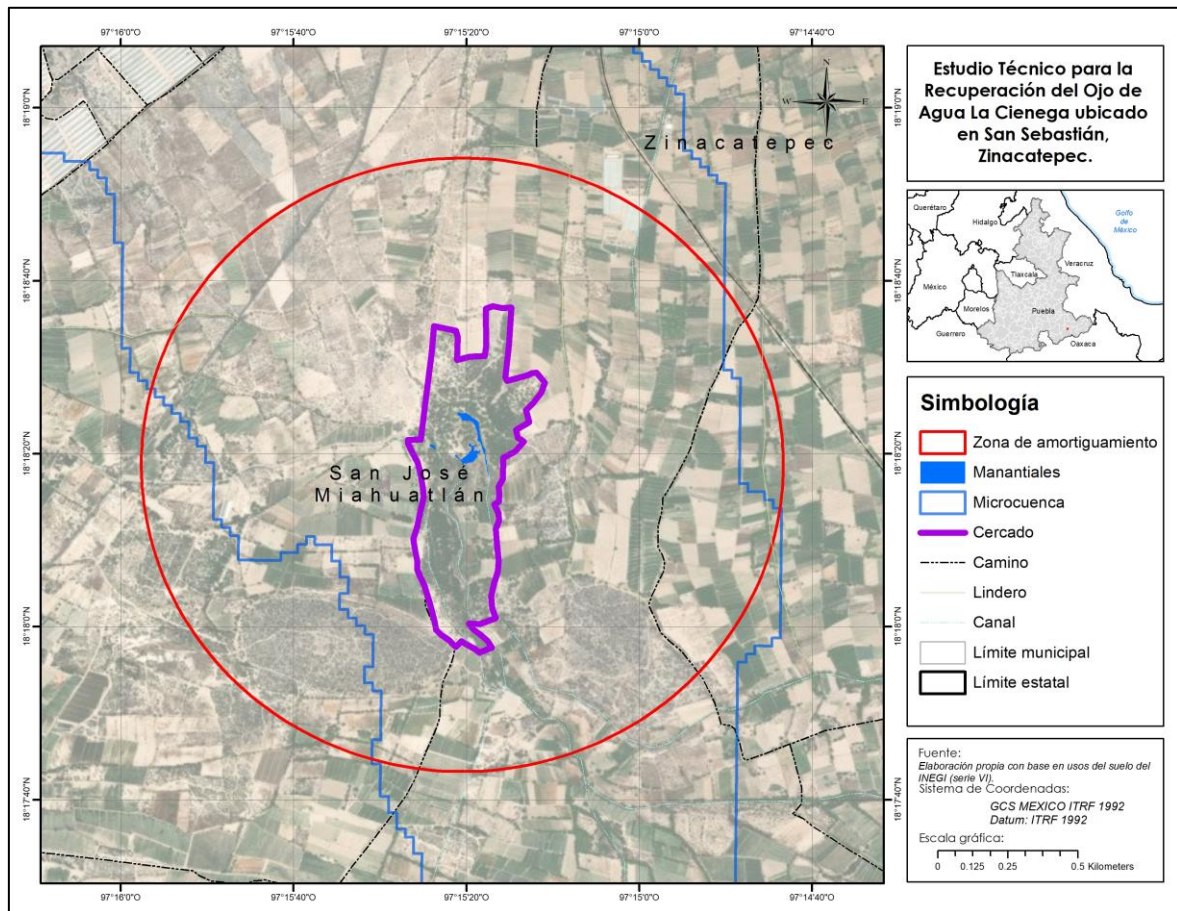
Dependiendo del tipo de poste será el material para su fijación: grapas metálicas para postes de madera, y alambre recocado/galvanizado para postes metálicos o de concreto

Figura 13.5 Cercado.



Fuente: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/fsuelos/galeria-suelos.html>

Mapa 13.5 Superficie propuesta para realizar el cercado.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

6) Zanjas derivadoras de escorrentía

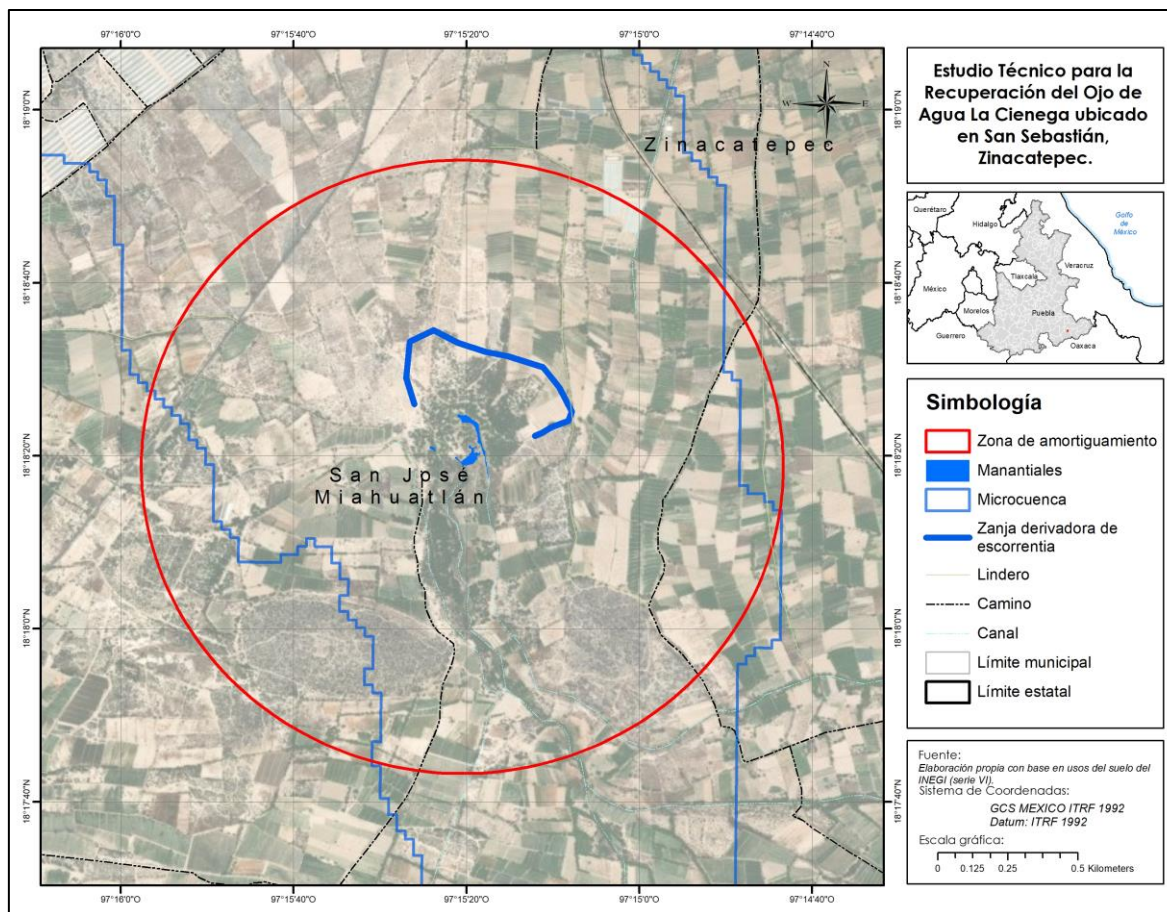
Las zanjas derivadoras de escorrentías son canales construidos en laderas que tienen el objetivo de captar el escurrimiento de agua, evitar procesos erosivos y conservar el suelo y el agua. Las zanjas son relativamente poco profundas, permiten la infiltración de agua en el suelo, pero también pueden recargar los acuíferos poco profundos y no confinados. Típicamente las dimensiones son 40 cm de ancho de la base y 40 cm de profundidad (Comisión Nacional de Riego de Chile, s.f.). Funcionan interceptando el agua de escorrentías y conduciéndola hacia lugares donde no provoquen daños (CONAFOR, 2007). Para prevenir la escorrentía de agua pluvial mezclada con sedimentos y aditivos agrícolas y pecuarios hacia los manantiales, se propone una zanja de infiltración con bordo de 1.3 km, cuya escorrentía sería conducida hacia 2 bordos almacenadores. Se realizan de manera manual con pico y pala.

Figura 13.6 Zanjas derivadoras de escorrentía.



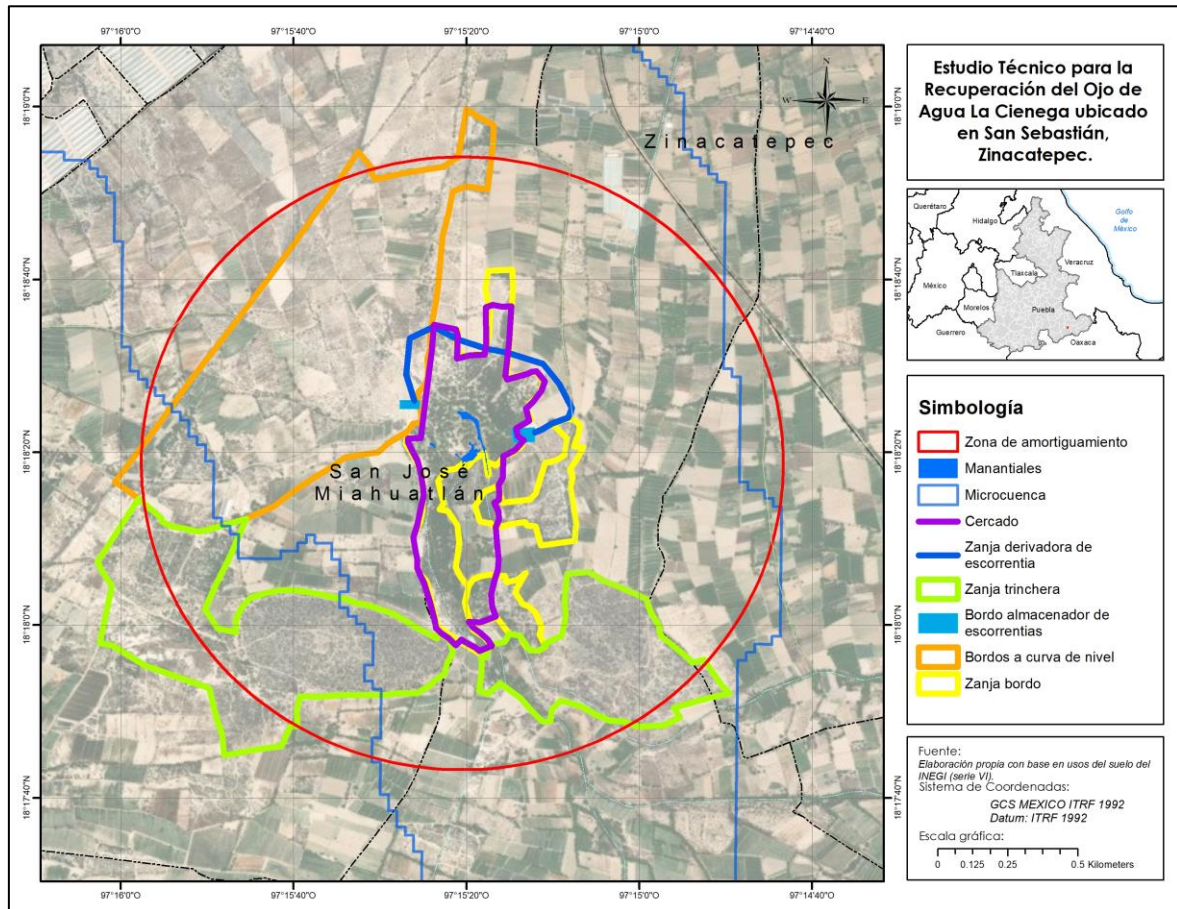
Fuente: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/fsuelos/galeria-suelos.html>

Mapa 13.6 Superficie propuesta para realizar las zanjas derivadoras de escorrentía.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

Mapa 13.7 Ubicación de la propuesta integral de acciones estructurales.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

13.2 Acciones de conservación

1) Sistemas agroforestales:

Los Sistemas Agroforestales (SAF) consideran una serie de técnicas que incluyen la combinación, simultánea o secuencial, de especies forestales y cultivos agrícolas. La agroforestería es una forma de cultivo múltiple en la que se cumplen tres condiciones fundamentales:

- Diversidad de cultivos.
- Al menos dos especies, una de ellas arbustiva.

- Las especies interactúan biológicamente, realizan el aporte de nutrientes y la retención del suelo.

Para el caso de proyectos con el objetivo de restauración de áreas degradadas, el sistema debe considerar la interacción de las siguientes actividades:

- Ejecución de obras o prácticas de conservación y restauración de suelo.
- Establecimiento del cultivo agrícola o de cobertera.
- Establecimiento de la reforestación.

Los sistemas agroforestales, tienen como finalidad evitar la erosión del suelo, proteger los cultivos agrícolas, mejorar la calidad del suelo, entre otras funciones.

Deben establecerse iniciando con la ejecución de las obras de conservación de suelo, finalmente se establecerá el cultivo agrícola que anualmente los dueños y poseedores del recurso implementan en su parcela.

Las obras serán de acuerdo a las condiciones del terreno, sugiriendo sean bordos a curva de nivel o bien zanja bordo que permita cualquiera que se emplee, reducir los escurrimientos superficiales, y canalizarlos hacia un lugar depósito de escorrentías.

Como especies forestales, se recomienda que en las áreas que así lo consensen con los propietarios de las parcelas, se pueda introducir el cultivo de maguey (*Agave salmiana*) y pitahaya, como una plantación comercial que en corto o mediano plazo permita generar utilidades, además que son plantas perennes y retenedoras de suelo, y consideradas con alto porcentaje de captación de carbono, entre algunas de las bondades de estas plantas.

Se recomienda incorporar máximo 300 plantas por hectárea, con separación entre líneas de 20 a 25 metros.

El concepto se creó para evitar la disminución de la fertilidad del suelo, típica de la agricultura migratoria y que se ha resuelto tradicionalmente con prácticas de barbecho; de esta manera se toma en cuenta el área y en forma simultánea el crecimiento del árbol. Al mismo tiempo que aumenta la productividad del cultivo asociado mediante la incorporación orgánica de abono verde y hojarasca, toma de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) de las capas profundas del suelo, regulación microclimática, disminución de la evapotranspiración y mantenimiento del área libre de arvenses invasoras. De esta manera también contribuyen a la conservación, recuperación o estabilización del suelo.

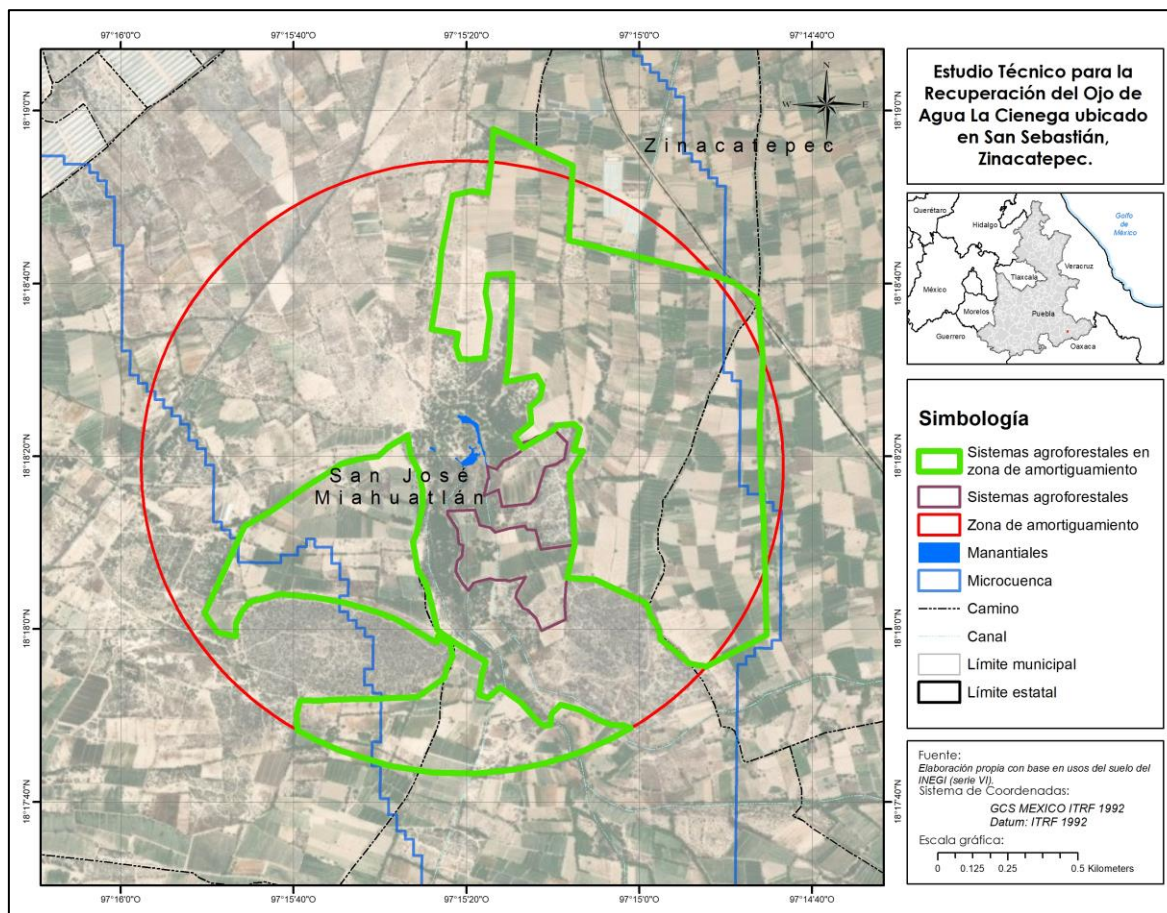
Además, se deben incluir las demás prácticas o actividades que garanticen el éxito del sistema agroforestal.

Figura 13.7 Sistemas agroforestales.



Fuente: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020.

Mapa 13.8 Superficie propuesta para realizar los sistemas agroforestales.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

Los sistemas agroforestales contemplan tres actividades:

- Realización de obras o prácticas de conservación y restauración de suelo.
- Establecimiento del cultivo agrícola o de cobertera.
- Establecimiento de la Reforestación.

Reforestación.

Plantación de árboles o plantas de interés económico, en la misma superficie donde se establecen las obras de conservación de suelos.

Para garantizar que la reforestación reciba la mayor cantidad de lluvia en el terreno, la plantación debe fundamentarse y ejecutarse en función a calendario óptimo de plantación en el que se

consideran las precipitaciones históricas de cada entidad. Con base en ello se realizará una proyección de las fechas para plantar. Es importante mencionar que este calendario no es un pronóstico preciso, por lo que, de acuerdo con la variación del temporal de lluvias en la región, se procederá a realizar el establecimiento de la planta en campo.

Tabla 13.1 Calendario de plantación

ESTAD O	TIPO ECOSISTEM A	MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE			
		Semana				Semana				Semana				Semana				Semana				Semana				Semana							
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Oaxaca	Templado									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
	Tropical									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
Puebla	Templado													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
	Tropical													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								
	Árido semiárido													x	x	x	x	x	x	x	x												

Fuente: CONAFOR, s.f.

De acuerdo con el tipo de obra de suelo que se vaya a establecer, se deberá indicar el acomodo que la planta deberá tener, ya sea al margen o sobre la obra, con la finalidad de estimar la cantidad de planta que se utilizará en esos sitios. Para el caso de bordos se recomienda hacerlo arriba del bordo o a un costado; para zanjas bordo, abajo del bordo, al igual que en las zanjas trincheras; en los sistemas agroforestales la planta se colocaría arriba del bordo, tratando de ganar espacio y disminuir riesgo de erosión.

De acuerdo con la densidad de plantas por hectárea, se definirá el espaciamiento entre plantas y entre hileras y se indicará el arreglo de la plantación (tresbolillo, marco real, lineal o en parches). De acuerdo con las condiciones del terreno, existirán sitios específicos donde la plantación podrá no mantener un patrón regular de distribución, sin embargo, deberá respetarse una densidad que permita el correcto desarrollo de las plantas establecidas.

Las especies para utilizar en las actividades de reforestación son:

Tabla 13.2 Especies recomendadas para la reforestación.

Especies	
Nombre científico	Nombre común
<i>Agave salmiana</i>	Maguey
<i>Prosopis laevigata</i>	Mezquite

Especies	
Nombre científico	Nombre común
<i>Leucaena leucocephala</i>	Guaje
<i>Hylocereus undatus</i>	Pitahaya

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como se mencionó anteriormente, estas especies fueron seleccionadas por ser plantas nativas, que se desarrollan y adaptan perfectamente al tipo de clima y suelo de la región. Adicionalmente, el cultivo de maguey (*Agave salmiana*) y la pitahaya fueron seleccionados por ser plantas comerciales perennes y retenedoras de suelo, con alto porcentaje de captación de carbono, que en corto o mediano plazo permitirán generar utilidades, maximizando con ello la productividad de los terrenos. En el caso específico del guaje (*Leucaena leucocephala*), este es utilizado como alimento tanto para platillos tradicionales como forraje para animales, además de ser utilizado ampliamente como leña en el proceso de fabricación de mezcal.

2) Desazolve del manantial La Ciénega

Durante las visitas realizadas, y con base en información recabada voz a voz con personas que acuden a la zona del manantial la Ciénega a realizar distintas actividades de recreación, se sabe que aproximadamente en el año 2013, debido a las fuertes lluvias en la región, se dieron “bajadas” de agua que arrastraron gran cantidad de suelo removido debido a los cambios de uso de suelo para el establecimiento y preparación de terrenos agrícolas. Al presentarse dichos eventos, el material se depositó en el cuerpo de agua, lo que desafortunadamente cambió la dinámica del sitio, mismo que presenta nulas señales de recuperación respecto de las condiciones originales del manantial, mismo que presentaba aguas cristalinas lo que le hacía un lugar agradable donde muchas familias acudían a bañarse.

Comentan, además que, si bien se tiene un nacimiento principal, en la parte de la “Cueva”, existían zonas en el fondo del cuerpo de agua, donde se presentaba nacimiento de agua por medio de “burbujeo”, mismas que se obstruyeron por la gran cantidad de material que se sedimentó en el manantial.

Es importante mencionar que el dragado de la zona azolvada representa una acción invasiva que no es la ideal, sin embargo, en este caso, resulta necesaria para la recuperación del manantial. Debido a la sensibilidad del sitio, es necesario realizar la actividad de manera adecuada y con el personal especializado, para evitar tener afectaciones sobre el medio ambiente inmediato al cuerpo de agua.

Dado las condiciones actuales de las áreas que presentan dicha condición, es urgente realizar esta acción con el objeto de generar las condiciones físicas para que la dinámica del cuerpo de agua mejore, coadyuvando a todas las acciones paralelas que se plantean para la recuperación y mejora en el mediano plazo.

Con base en el Art. 6° Inciso frac. III tercer párrafo, y el Art. 7° del “REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL” las condiciones actuales representan un estado de emergencia para el sitio, por lo que una eventual intervención en el sitio para realizar el dragado, no requiere presentar la correspondiente evaluación de impacto ambiental ante la SEMARNAT, por lo que será necesario estructurar la exención correspondiente, evidenciando que no se dará modificación de cauces, ni establecimiento de obra alguna.

Aunado a lo anterior, y una vez realizados los estudios que demostraron que no existen materiales de riesgo en la composición de los residuos, se presentan dos posibilidades para el destino final de los mismos, en primera instancia, se pueden trasladar a un banco de tiro autorizado por la secretaría, sin embargo, el más próximo se encuentra en el municipio de Cuautlancingo, por lo que el traslado y disposición final representaría altos costos financieros y de tiempo.

Por otro lado, es posible utilizar los sedimentos para la construcción de las obras de restauración y de retención de agua, por lo que sería necesario contar con un Plan de Manejo de dichos residuos, registrado y avalado por la secretaría; esta opción se plantea cómo la más conveniente y de menor costo.

Para llevar a cabo las acciones de desazolvado, se recomienda hacerlo de manera manual, mediante el uso de palas, lo anterior con la finalidad de utilizar un método menos agresivo, como lo es el uso de maquinaria, los cuales si no se realizan con personal experto puede propiciar una fractura, lo que implicaría un desequilibrio ecológico. Es importante mencionar, que la desventaja del método manual, es el tiempo, así como la posibilidad de que si no se realiza de manera cuidadosa, por los mismos movimientos de las personas, estas propicien la resuspensión de los sedimentos, haciendo más complicada la extracción de los mismos. De acuerdo con información recabada en la red, existen algunos casos donde se ha optado por la modalidad manual, los que se presentan a continuación.

Como ejemplo se nombran algunas alternativas para la realización de la actividad, mismas que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 13.3 Ejemplos de desazolves realizados en otras entidades.

Actividad	Noticia en internet
	<p>Chiapas ...decenas de habitantes comenzaron los trabajos de desazolve para hacer que la corriente regrese al cauce natural, afectado por la caída de un árbol en días pasados, presuntamente, entre otras causas, por el terremoto del 7 de septiembre pasado. Las fuentes no precisaron en qué medida los habitantes de Agua Azul lograron desazolver el cauce para reorientar la corriente del río Agua Azul, que alimenta las cascadas.</p>
	<p>Cuernavaca Morelos Parque barranca de Chapultepec</p>

Fuente: Henríquez, 2017.

Recomendación de reutilización del sedimento

Derivado del estudio realizado, se concluye que el azolve de los manantiales tiene un origen natural. Prácticamente todos los sedimentos que llegan al vaso provienen del arrastre de los suelos aguas arriba, la falta de cobertura arbórea, los suelos sin cubierta que los proteja, son los motivos para que los fenómenos meteorológicos como el viento y el agua de lluvia, provoquen erosión, misma que se refleja en el arrastre de partículas de suelo, que van hacia el vaso de los manantiales, donde son depositados.

Esta acumulación reduce la capacidad de almacenamiento. El suelo, el agua, el crecimiento de plantas, bacterias y demás fenómenos naturales hacen que los sedimentos depositados en el vaso de los manantiales sean ricos en elementos y minerales que, al depositarlos en los terrenos agrícolas, permitirán mejorar la estructura del suelo debido a la materia orgánica que favorece por igual la calidad del suelo. Por ello, la recomendación de aprovecharlos en las áreas donde se establecen prácticas de conservación de suelo, reforestación y sistemas agroforestales.

Estas acciones nos sirven como medidas que van en el sentido de evitar que el arrastre de partículas provenientes del desgaste de los suelos y que la degradación de los mismos se intensifique; pretende reducir al máximo que estos suelos se sigan erosionando, hasta su total degradación, como medida complementaria, se realizará depósito del sedimento que se obtenga del rescate del vaso de los manantiales, en terrenos o parcelas donde la degradación del suelo es más avanzada.

Como una alternativa más, junto con las obras de conservación, con las recomendaciones técnicas que los asesores y los mismos productores agrícolas pongan en práctica, se incorpora este material, que es rico en nutrientes, pues como se ha señalado, proviene directamente del suelo erosionado de las parcelas ubicadas aguas arriba. Al mismo tiempo que se combate la erosión, la pérdida de suelo, se mejoran los suelos, con la adhesión de material proveniente de los sedimentos de los manantiales.

Los sedimentos de los manantiales presentan una composición bastante interesante que permite asegurar el enriquecimiento de los suelos, para mejorar su composición mineral, así como su estructura, la presencia de Silicio, calcio y hierro, son elementos que ayudan a mejorar estos elementos del suelo, y por ende en mejorar la productividad de los sitios.

Se propone anexas 2 toneladas por hectárea, a los terrenos agrícolas, previo a la siembra, antes de iniciar las labores como el arado, rastra y surcado, debe depositarse estos sedimentos para que se incorporen al suelo y puedan ser incorporados durante la ejecución de dichas labores culturales.

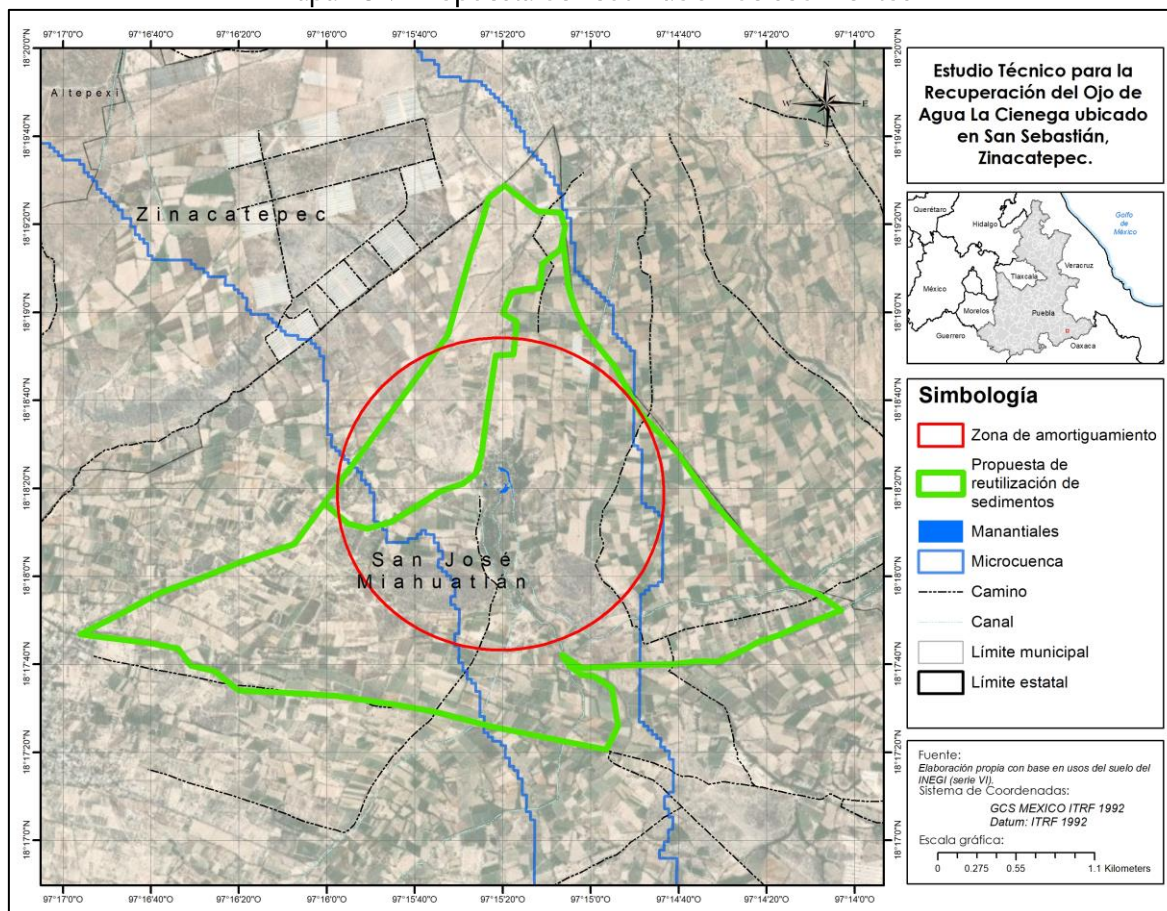
En los estudios para determinar la cantidad de sedimentos existentes en los manantiales, se encontró que aproximadamente existen 1,401.7 toneladas. Por lo que a razón de 2 ton/ha, que se aplicaran en esta práctica de enriquecimiento de parcelas agrícolas, se requiere aplicar en 700 ha. Mismas que se eligieron por su condición o presencia de erosión laminar incipiente y en algunos casos presencia de canalillos.

Es conveniente señalar que el agua proveniente del: subsuelo, de ríos, lagos, manantiales, manantiales, embalses, etc...son consideradas agua nacionales; por lo que es competencia del Gobierno Federal, autorizar su uso o aprovechamiento a través de concesiones, para los fines que la población demande, por igual, la infraestructura, construcciones, manejo y actividades para su uso, deben ser atendidas, valoradas y autorizadas por la dependencia del Gobierno Federal que corresponda, para el caso que nos ocupa, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es la encargada de normar las concesiones y uso de aguas nacionales.

El mejoramiento de la estructura de los suelos de las parcelas ubicadas en torno a los manantiales, para alcanzar mayor productividad y rendimientos agrícolas, es un proceso que corresponde a las instituciones del sector agropecuario, tanto federal, estatal y municipal, por lo que deberá darse un periodo de difusión y aceptación de las actividades que se realicen para sanear, mejorar y potencializar el uso del manantial la Ciénega.

El empoderamiento de los productores agrícolas en el uso del agua de los manantiales, se ha dado por muchos años, sin embargo no se ha atendido el mantenimiento, ni la protección de este vital e importante elemento, que es el agua y el suelo, la organización de productores agrícola, deberá ser el medio para que la difusión y capacitación en cuanto al aprovechamiento de sedimentos, se realice y se haga bajo el consentimiento y aceptación de los dueños y poseedores del recurso, sabiendo que con esta actividad, se lograra el mejoramiento de sus suelos.

Mapa 13.9 Propuesta de reutilización de sedimentos.



Fuente: Elaboración propia con base en usos del suelo del INEGI (serie VI).

Acciones complementarias en el desazolve

Se recomienda preparar un plan de mediciones de calidad del agua en los años siguientes al desazolve, a fin de conocer la evolución de las condiciones fisicoquímicas de la misma, principalmente en materia sólidos en suspensión y pH.

Beneficios de la implementación de la medida

La relación costo beneficio para el caso de la actividad propuesta de desazolve en el manantial, es muy alta; toda vez que se identifican dos grandes rubros de beneficios:

- 1) Por un lado, la recuperación del manantial La Ciénega donde la gente asistía originalmente y podía hacer uso de dicho cuerpo de agua; con la limpieza de los lodos, se generarán las condiciones para que el sitio sea nuevamente un centro de reunión e interacción social, convirtiéndose en un atractivo turístico natural. Esta actividad junto con las otras complementarias, cambiarán considerablemente la imagen del lugar, identificándose como usuarios potenciales a la población estimada del acuífero del Valle de Tehuacán que es de 580 mil habitantes, de ahí bajo un escenario conservador y con base en otros proyectos similares, podría considerarse de esa población un 7% como población real que asista, es decir 40,600 habitantes.
- 2) Por otro lado, se identifica un beneficio en cuanto a la reutilización de los lodos extraídos de La Ciénega, y que se propone sean depositados en los suelos como nutrientes y así evitar que se continúe con la degradación de estos; lo cual, evitaría en parte los altos costos de traslado a un banco de tierra, que como se señaló, el más cercano es en Cuautlancingo.

Esta reutilización tendría un gran impacto positivo al medio ambiente, ya que se estaría aprovechando el material orgánico para 700 ha; y se estaría liberando el espacio que en un momento dado tendría que utilizarse de cualquier banco de tierra.

El costo que implica el desazolve de 966.74 m³ de material de lodos oscila en los 4.7 MDP; que contribuirá a convertir el lago La Ciénega en un atractivo turístico, con lo cual será posible entonces detonar una derrama económica para la región; aparte del incremento de la capacidad de almacenamiento que tendría el cuerpo de agua.

3) Certificación como Área Destinada Voluntariamente a la Conservación

A partir de la urgencia de rescatar y mantener sanos diversos sitios a lo largo del territorio nacional con el fin de regular la temperatura, obtener servicios y beneficios ecosistémicos de mayor calidad, mejorar la calidad del agua y aire, y conservar diversas especies de flora y fauna, la Ley General del Equilibrio Ecológico en su Art. 77 Bis, refiere un instrumento de gran plasticidad social y ambiental, las “Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación”; estas son sitios que ayudan a preservar la biodiversidad y el equilibrio ecológico en nuestro país, favoreciendo la participación de la sociedad en procesos de gobernanza ambiental y sustentable.

Estas áreas naturales protegidas son competencia de la federación, están dedicadas a una función de interés público, y son establecidas mediante un certificado emitido por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), por conducto de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), quien trabaja con los promoventes otorgándoles el asesoramiento técnico, normativo y de manejo que más conviene al sitio del que se trate, responden a iniciativas de pueblos indígenas, organizaciones sociales, personas morales, públicas o privadas, para destinar predios con importantes servicios ecosistémicos, de su propiedad, a acciones de conservación y manejo, siendo administradas por sus legítimos propietarios, conforme a su propia estrategia de manejo; constituyen una importante aportación de la sociedad, para conservar el patrimonio natural de México”.

En nuestro país se cuenta ya con 368 áreas certificadas vigentes distribuidas en 25 estados, con una superficie total de 603,735.70 ha, destacando Oaxaca con una superficie certificada de 165,508.75 ha, seguida de Campeche y Guerrero con 104,912 y 57,918 ha, respectivamente; en el estado de Puebla se cuenta con siete ADVC que suman una superficie total de 1,707.14 ha. Mismas que, en poder de sus propietarios y con el acompañamiento institucional pertinente, han logrado mejorar su estado, contribuyendo a los objetivos fundamentales de este instrumento.

Se propone la certificación del sitio denominado “La Ciénega”, como “Área de uso Público, con vocación turística y de producción de peces para consumo humano” involucrando el trabajo de

gestión y colaboración del sector social con el gobierno del Estado de Puebla, la Federación a través de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, los Ayuntamientos de los municipios de Zinacatepec y San José Miahuatlán (Anexo 4).

1.3.3 Recomendaciones en cuanto a proyectos sustentables que sean compatibles con el cumplimiento de las acciones anteriormente citadas

1) Programa de educación ambiental

Con la finalidad de cubrir la necesidad de contar con información referente a cómo cuidar el agua, es necesario que se realice un diagnóstico de las necesidades de información por sector o tipo de usuario. Que se haga una adecuación de la estrategia de difusión de los programas de cultura del agua existentes, de acuerdo a la región y/o municipio. Con base en esta adecuación elaborar un programa de difusión que logre permear a un amplio sector de la población, esto puede ser fortalecido mediante un programa de capacitación de promotores de cultura del agua por municipio y/o localidad. Solicitar el apoyo, a las dependencias correspondientes, para la elaboración de material didáctico que refuerce las acciones propuestas en el programa de difusión.

2) Campaña de limpieza de residuos sólidos urbanos

Uno de los problemas identificados durante las visitas de campo, fue la presencia de gran cantidad de residuos sólidos, producto en su mayoría de reuniones familiares en la zona, lo que propicia que se tenga gran cantidad de platos y vasos de unicel, dando una imagen de suciedad y de nula existencia de reglas mínimas de convivencia dentro del sitio. Por lo que se recomienda relajar campañas de recolección de residuos de manera simultánea con el programa de educación ambiental.

3) Fomento al aprovechamiento de cría de peces

Una de las actividades que se realiza dentro del complejo manantial es la cría y comercialización de peces. Actividad que genera ganancias a las personas encargadas de la venta de mojaras. Resulta necesario elaborar un programa conjunto entre ejidatarios y autoridades que fortalezca las iniciativas de la comunidad.

4) Aprovechamiento de miel

El sector Apícola es en la mayoría de los casos una actividad rural e informal, debido a que significa un ingreso extra derivado de su actividad principal, como puede ser agricultura.

Esto trae como consecuencia la falta de innovación y tecnología en los procesos de producción apícola, realizándose muchas veces de manera rústica y poco eficiente, obteniendo como resultado un producto de baja calidad o de poco conocimiento para los consumidores.

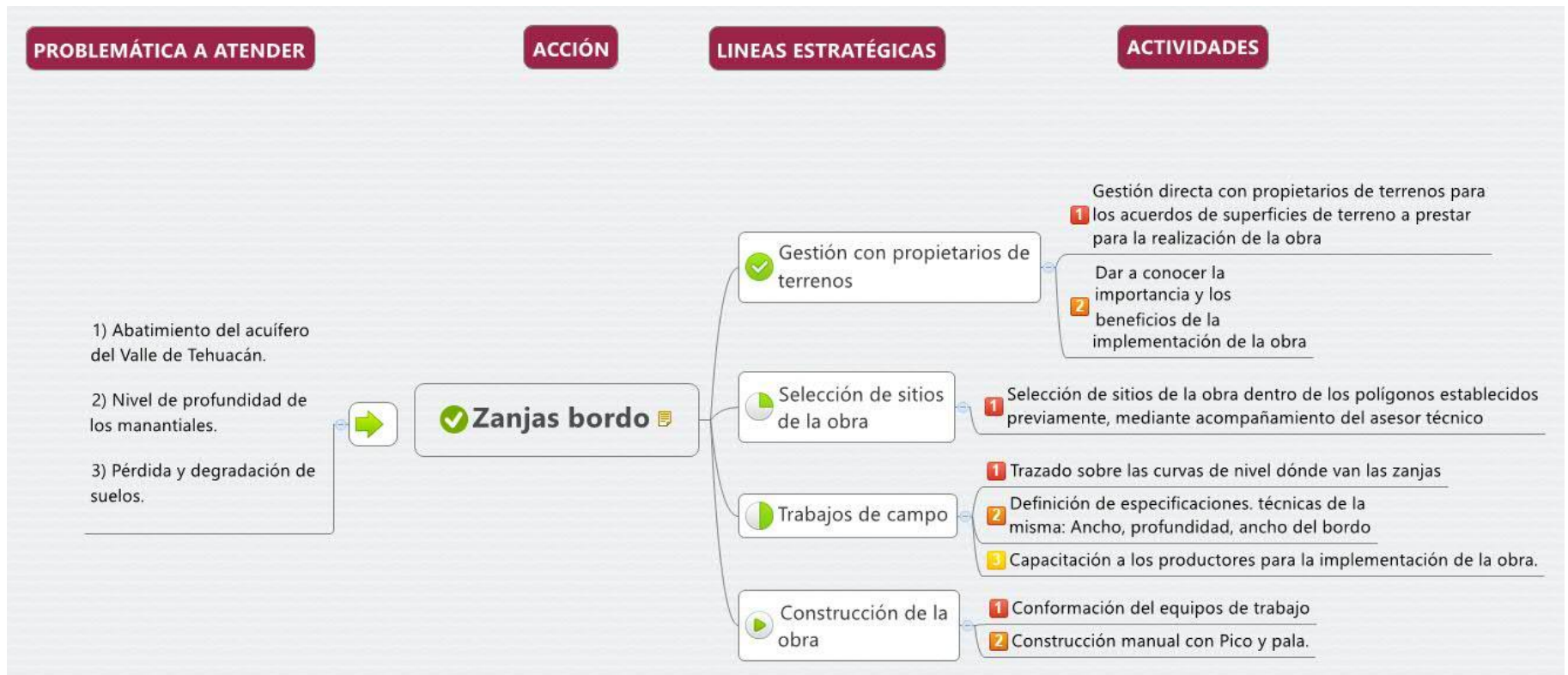
Es necesario diseñar el proceso de producción de miel; para lo cual se necesitará elaborar el diseño de la planta de producción, mapear los procesos, realizar la distribución de planta, y elaborar el manual de organización de funciones. De esta manera, lo que se busca es incentivar la formalización de la actividad apícola en la región, a través del diseño de procesos que permitan obtener mayores beneficios económicos y un producto final de alta calidad.

5) Turismo sustentable

Como se comentó con antelación, en el manantial Tochatl se lleva a cabo el aprovechamiento mediante la cría de mojaras, lo que de acuerdo con las personas encargadas propicia la visita de aproximadamente unas 20 personas los fines de semana. En este sentido, se propone el desarrollo de un proyecto de turismo sustentable que permita una mayor afluencia de personas hacia la zona y por lo tanto mayores ingresos económicos.

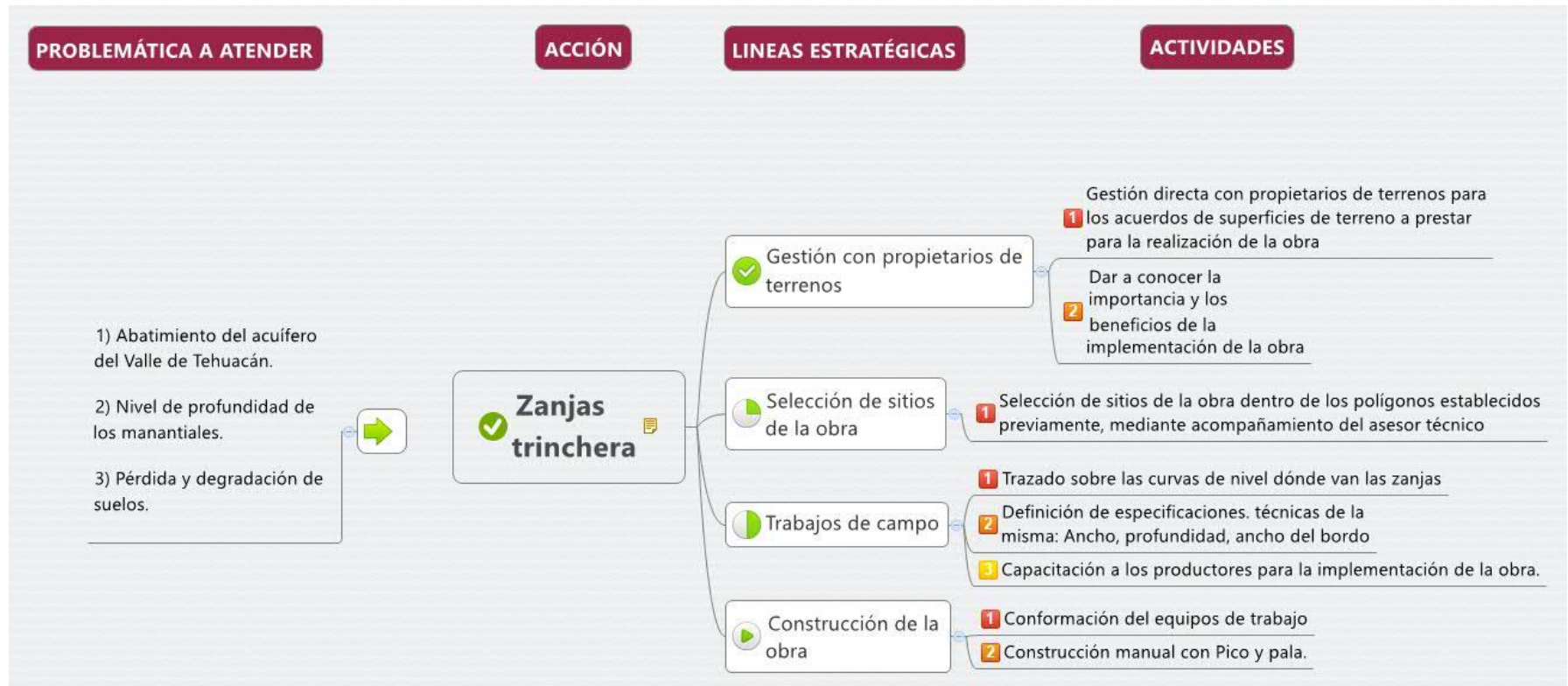
Lo anterior, en apego a lo estipulado en el programa de la ADVC, en cuanto a las zonas definidas como de aprovechamiento. Para mayores detalles de lo contemplado en este proyecto conceptual, ver Anexo 5.

Figura 13.8 Acción propuesta: Zanjas bordo.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.9 Acción propuesta: Zanjas trinchera.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.10 Acción propuesta: Bordos en curvas de nivel.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.11 Acción propuesta: Bordo almacenador de agua de escorrentía.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.12 Acción propuesta: Cercado.



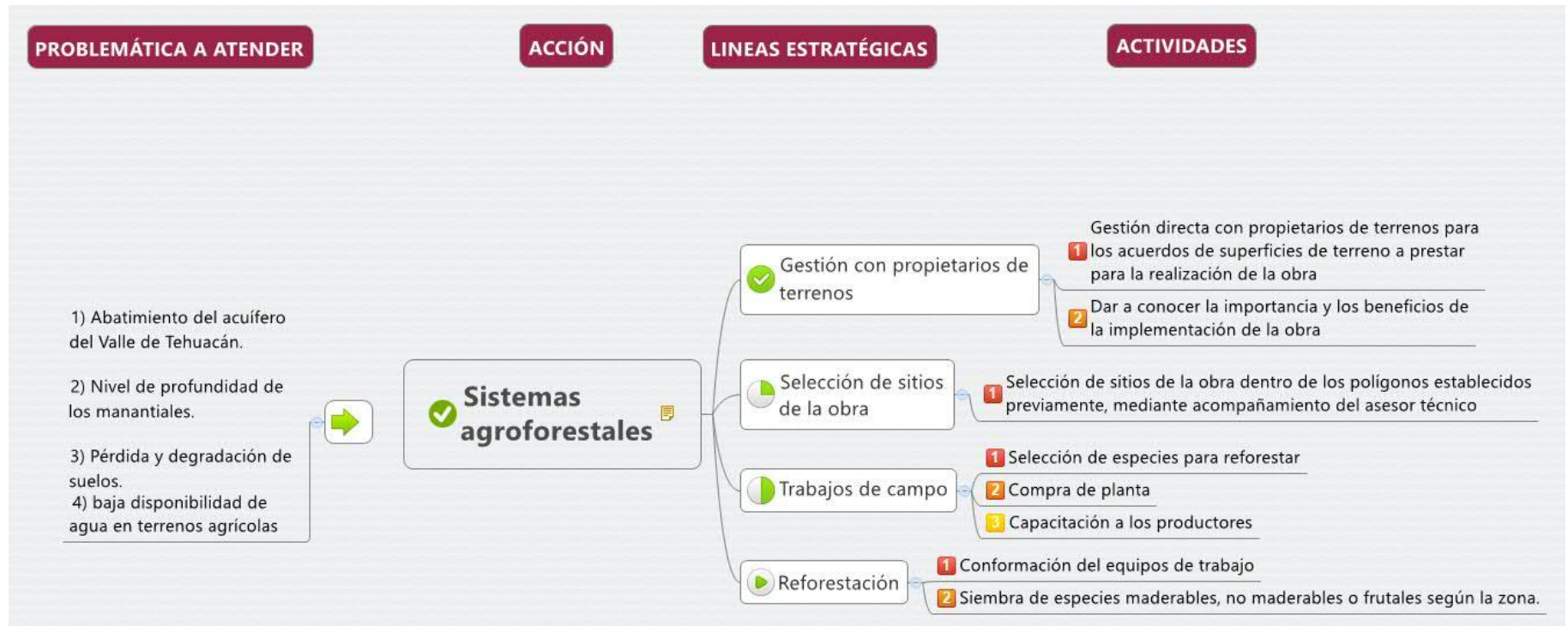
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.13 Acción propuesta: Zanjas derivadoras de escorrentía.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.14 Acción propuesta: Sistemas agroforestales.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.15 Acción propuesta: Desazolve del manantial La Ciénega.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.16 Acción propuesta: Certificación como Área Destinada Voluntariamente a la Conservación.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.17 Acción propuesta: Programa de educación ambiental.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.18 Acción propuesta: Campaña de limpieza de RSU.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.19 Acción propuesta: Fomento al aprovechamiento de cría de peces.



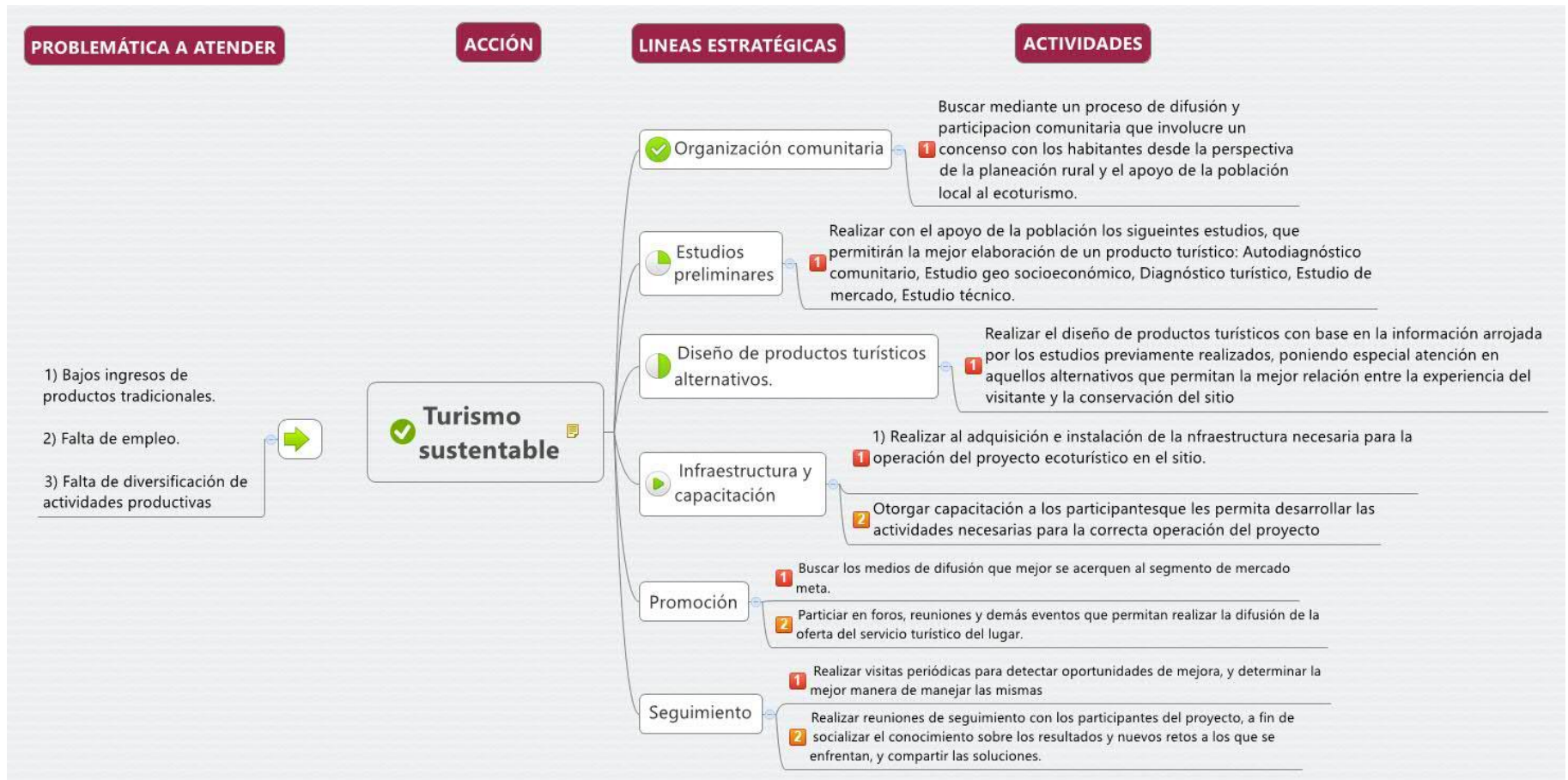
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.20 Acción propuesta: Aprovechamiento de miel.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.21 Acción propuesta: Turismo sustentable.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

13.4 Ruta Crítica

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en un inicio, se propone la siguiente ruta para la realización de las diferentes acciones mencionadas con antelación. Se inicia en el primer año con las acciones de recuperación, conservación y captación de agua, a fin de contar con las condiciones idóneas para la implementación de las acciones de reforestación y fortalecimiento de proyectos productivos propios de la región. Finalmente, resulta importante dar continuidad mediante el mantenimiento de las obras realizadas, todo lo anterior, bajo la figura de un Área Destinada Voluntariamente a la Conservación.

Figura 13.22 Ruta crítica.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Figura 13.23 Acciones inmediatas.



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como se comentó con antelación, se debe iniciar con acciones que nos permitan contar con las condiciones ideales, que nos aseguren que el suelo tenga la capacidad de retener la humedad y de permitir la filtración de agua. Lo anterior, para dar pauta a la implementación de acciones como la reforestación. Esto no otorga una mayor certidumbre de dar resultados satisfactorios.

Realizar acciones de conservación de suelos y de captación de agua, nos permiten la estabilización de las condiciones actuales del ambiente y promover su mejoramiento a través de diversas prácticas y actividades, a fin de proceder con las siguientes actividades.

Figura 13.24 Acciones a mediano plazo.

ACCIONES A MEDIANO PLAZO



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Una vez que se cuente con las condiciones favorables en cuanto a condiciones del suelo de las zonas a intervenir y la época del año adecuada, se procede con las acciones de reforestación y de fomento para el aprovechamiento a través de la implementación de proyectos productivos sustentables.

Figura 13.25 Acciones de seguimiento.

ACCIONES DE SEGUIMIENTO



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Finalmente, como todo proyecto integral, se debe contar con las acciones de mantenimiento, así como del monitoreo y evaluación del cumplimiento de metas y objetivos para determinar los beneficios obtenidos mediante su implementación.

Tabla 13.4 Calendario de implementación de acciones.

Acciones		Tipo de Obra			1 año												2 año												
Tipo	No	Actividad	Cantidad	Unidad	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
ESTRUCTURALES	1	Zanja bordo	34.45	ha	■	■	■																						
	2	Zanja trinchera	74.03	ha	■	■	■	■																					
	3	Bordos a curvas de nivel	81.99	ha					■	■																			
	4	Bordo almacenador de escorrentías	2	Bordo		■	■	■	■										■	■									
	5	Protección (Cercado)	3.5	km															■	■	■								
	6	Zanja de escorrentía	1.3	km		■	■	■											■	■									
	7	Asesoría técnica Mantenimiento	373.37	ha	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
CONSERVACIÓN	8	Sistemas agroforestales	182.00	ha				■	■	■	■	■	■	■	■														
		Bordos a curva de nivel				■	■	■																					
		Reforestación							■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■	■	■	■	■	■
		Cultivo							■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■	■	■	■	■	■
	9	Desazolve del manantial La Ciénega	966.74	m ³		■	■	■	■																				
10	Certificación ADVC	1	Polígono		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
PROYECTOS SUSTENTABLES	11	Programa de educación ambiental	1	Programa	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	12	Programa de limpieza de RSU	1	Programa	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	13	Fomento al aprovechamiento de cría de peces	1	Programa												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	14	Proyecto producción de miel	1	Programa												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	15	Turismo sustentable	1	Proyecto												■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

13.5 Sistema de monitoreo, evaluación y seguimiento de diversos indicadores que permita observar y analizar la ejecución de las acciones de recuperación, propuestas para medir su avance y el logro de sus objetivos, confrontando el avance programado contra el real.

El Plan de Manejo es un instrumento de planeación que demanda un reajuste periódico (corto mediano y largo plazo), el cual se debe llevar a cabo mediante una evaluación y seguimiento de los ejercicios de las acciones propuestas por zona en el sitio.

Por lo anterior, es preciso establecer una metodología que considere mecanismos cuantitativos y cualitativos de evaluación y seguimiento para comprobar el cumplimiento de las metas planteadas y revelar las pautas para realizar los ajustes de acuerdo a las necesidades y problemática detectada.

Se consideran evaluaciones parciales o semestrales, las que permitan detectar en tiempo real, los problemas y dar una respuesta oportuna.

Las evaluaciones de corto, mediano y largo plazo se ajustarán a las actividades planteadas en ese mismo plazo dentro de los componentes. En estas evaluaciones se podrá definir si es necesario modificar de manera sustancial alguna de las actividades planteadas en el Programa de Manejo o si es necesario adecuarlo a las condiciones del momento de la evaluación.

Los mecanismos a considerar en las evaluaciones señaladas son:

- Contar con una Línea Base. Consiste en describir la situación de los recursos naturales del Parque, así como de los usuarios a fin de permitir la realización de comparaciones a futuro.
- Seleccionar y Monitorear indicadores. Se identificarán y utilizarán criterios ecológicos y socioeconómicos que ayuden a evaluar el desempeño e impacto del Plan de Manejo, en complemento a la línea base de información.

- Revisar la pertinencia de las acciones, zonificación y medidas propuestas en el Plan de Manejo. Para tal efecto se puede invitar a instancias de educación superior y diversos actores institucionales presentes en la región.

Para ello resulta necesario y apropiado contar con los mecanismos de monitoreo y evaluación para las inversiones que contribuyan, en el futuro, a la toma de decisiones basadas en evidencia. Los sistemas de Monitoreo y evaluación (M&E) pueden abordar cuestiones como la determinación de resultados deseables o no, producto de una medida de adaptación; o bien, en el caso de acciones en proceso, evaluar si van por el camino apropiado o no (P. Naswa, 2015).

Es importante elegir los indicadores que nos permitan medir el proceso de aplicación y los beneficios de las medidas de adaptación, por lo que se debe contar con una línea base para determinar el progreso. Si bien el monitoreo es un proceso continuo, a veces es necesario definir objetivos intermedios específicos, contando con diversas herramientas que permitan el monitoreo como pueden ser investigadores de campo, sensores, mapas, fuentes de datos oficiales e incluso los datos documentados por los mismos beneficiarios.

Finalmente los resultados, así como los informes parciales y finales deben ser interpretados y comunicados a los responsables de la intervención. Este paso es una parte importante del proceso de M&E, ya que ayuda a definir las medidas de rectificación, si el proceso no va por buen camino.

Con respecto a las acciones específicas a implementar los indicadores pueden ser clasificados como indicadores de procesos, de resultados o de impactos. Donde los indicadores de proceso se enfocan en el diseño, el cumplimiento de un proceso predeterminado y la implementación real de los procesos involucrados en la intervención de adaptación. Los indicadores de resultado se enfocan en un set de metas o resultados obtenidos al final del programa de intervención para la adaptación y los indicadores de impacto tienen que ver con la efectividad de la intervención en términos de los objetivos y metas más generales, al implementar una intervención de adaptación específica (P. Naswa, 2015).

Finalmente, los indicadores pueden medir efectividad o eficiencia. Los indicadores de eficiencia miden el rendimiento por unidad de insumos y los indicadores de efectividad miden los insumos contra los impactos. En la tabla 13.5 se muestran ejemplos de los tipos de indicadores antes mencionados.

Tabla 13.5 Ejemplos de diferentes categorías de indicadores.

Categoría	Ejemplos
Indicadores cuantitativos	-Costo de recursos adicionales vs. Incremento en la producción -Número de beneficiarios
Indicadores cualitativos	-Aceptabilidad del tipo de cultivo -Aceptación legal del cultivo resistente a la sequía
Proceso	-Frecuencia de uso de fertilizante -Proceso de sembrado
Resultado	-Número de beneficiarios -Incremento en la producción
Impacto	-Incrementos en los niveles de ingresos -Incrementos en los estándares de salud
Eficiencia	-Costo de recursos adicionales vs. Incremento en la producción -Horas laborales adicionales vs. Incremento en la producción
Efectividad	-Requerimiento de agua -Requerimiento de humedad en el suelo

Fuente: UNEP-DTU 2015.

Indicadores de evaluación y seguimiento

Una vez identificados los componentes clave, se procedió a identificar los indicadores en concordancia con lo mencionado en los párrafos anteriores.

Tabla 13.6 Indicadores de seguimiento y evaluación.

No	Objetivo	Componente	Atributo	Categoría	Indicador	(Línea base)
1	Evaluar la evolución del nivel estático del acuífero cada 2 años con la finalidad de identificar el abatimiento de este.	Profundidad del Nivel estático	Piezometría	Cuantitativo	Profundidad en metros del nivel estático	Piezometrías 2008, 2017 y 2021 de pozos cercanos a la Ciénega
2	Cuantificar de manera anual la cantidad de azolve presente en el manantial La Ciénega	Nivel del manantial	Volumen de azolve	Cuantitativo	Cantidad de azolve en m ³	Volumen de azolve 2021
3	Reforestar las zonas propuestas para la recuperación de suelos y captación de agua durante el año 2022	Áreas Reforestadas	Superficie de zonas reforestadas	Cuantitativo	Hectáreas reforestadas	Áreas deforestadas 2021 (ha)
4	Realizar las obras de conservación durante 2022 y 2023	Obras de conservación	Número de obras realizadas	Cuantitativo	Número de obras	Áreas sin intervenir con obras (ha)

No	Objetivo	Componente	Atributo	Categoría	Indicador	(Línea base)
5	Realizar actividades de recuperación del espacio público en el polígono de estudio durante el año 2023	Recuperación del espacio público	Zonas intervenidas dentro del polígono	Contexto paisajístico	% de intervención del polígono	Superficie de estudio del polígono de los manantiales
6	Realizar actividades de fortalecimiento y fomento de proyectos sustentables durante el 2023 que favorezcan la reactivación económica de la zona de estudio.	Aprovechamiento sustentable	Número de actividades de aprovechamiento sustentable	Cuantitativo	Ingresos económicos por las actividades	Ingresos económicos 2021 por el aprovechamiento
7	Realizar la gestión para la certificación del polígono de manantiales como Área Destinada Voluntariamente a la Conservación.	ADVC	Certificación	Cuantitativo	Certificaciones actuales de la zona de estudio	Número de certificaciones en 2021

Fuente: Elaboración propia, 2021.

14. Conclusiones

El acuífero del Valle de Tehuacán, constituye la reserva estratégica de agua más importante para el sureste del estado de Puebla, zona donde el escurrimiento superficial es efímero y el agua subterránea históricamente ha sido una fuente de abastecimiento segura para los distintos usos. A través de la historia y hasta nuestros días, en el acuífero se cuenta con manantiales y galerías filtrantes, que denotan la existencia de zonas con baja profundidad del nivel estático.

El principal uso del agua subterránea es el agrícola que representa el 78.0% de la extracción total, seguido del uso público urbano que corresponde al 18.2%; para el uso industrial el 3.2% y el 0.6%, para uso doméstico. Del volumen utilizado en el acuífero, 128.4 hm³/año proviene de galerías filtrantes y manantiales, y 128.9 hm³/año se extrae a partir de pozos y norias.

Si bien, el acuífero se encuentra publicado en el Diario Oficial de la Federación, en condición de disponibilidad positiva de 28.19882 hm³, la realidad es que ha presentado un sistemático proceso de abatimiento en la generalidad de su superficie, condición que eventualmente presenta recuperaciones locales en las zonas con mayor susceptibilidad a la recarga durante la época de lluvias.

De las mediciones piezométricas 2008 – 2017 se denota un abatimiento medio anual del acuífero de 35 cm. Esto implica una pérdida próxima de 23 hm³ por año. Para 2021, comparando únicamente

los pozos cercanos a “La Ciénega” que cuentan con información tanto para 2017 como para 2021, se identificó que continúa la tendencia de abatimiento del nivel estático, con un incremento en la profundidad de 1.146 m, lo que equivale a 0.2865 m por año.

Lo anterior, aunado a que el clima en la zona presenta una tendencia a ser más seco y caluroso, aumentará los problemas en materia ambiental, como son: menor precipitación pluvial que incide en menor humedad en el suelo, pérdidas de bosque, incendios forestales, escasez de agua, mayor frecuencia de sequías y efectos severos en la agricultura.

Una de las situaciones detectadas en particular en el manantial “La Ciénega” es el azolve, material que se encuentra depositado en el cuerpo de agua, lo que desafortunadamente cambió la dinámica del sitio, que presenta nulas señales de recuperación respecto de las condiciones originales del manantial, mismo que presentaba aguas cristalinas lo que le hacía un lugar agradable donde muchas familias acudían a bañarse.

El levantamiento topográfico de la zona de “La Ciénega”, nos indica que sus pendientes más altas se localizan hacia el norte y las más bajas, que se mantiene constantes, se localizan en el Sur. Lo anterior, ha propiciado arrastre de material acumulándose dentro de la manantial “La Ciénega”. Del análisis se tiene como resultado un acumulado de 966.74 m³ de sedimento, correspondiente a 1,401.77 toneladas.

Los resultados del análisis de los sedimentos realizados en el laboratorio de Catálisis de la BUAP nos indican que la muestra presenta fuertes cantidades de SiO₂, resultado esperado por la presencia de arena (80%). Se presentan además compuestos de calcio, tal vez debido a la disolución de piedras tipo mármol y alabastro, así como la presencia de fuertes cantidades de carbón orgánico, mismo que proviene de la descomposición de los residuos vegetales y animales y actúa como la principal fuente de nutrientes para los microorganismos y las plantas.

La calidad del agua del manantial presenta en Sólidos totales disueltos, carbonato de calcio y cloruros valores por arriba del límite máximo permisible (LMP) establecido en la NOM-127-SSA1-1994. Datos consistentes con relación a un estudio realizado por CONAGUA en 2009.

De acuerdo con lo antes expuesto, es urgente realizar acciones con el objeto de generar las condiciones físicas para que la dinámica del cuerpo de agua mejore en el mediano plazo. Las propuestas de alternativas de restauración del acuífero planteadas tienen como objetivos asociados contribuir a la conservación de la biodiversidad y el bienestar humano de las comunidades de la región, fortalecer la conectividad del ecosistema, mejorar las oportunidades de experiencia de los visitantes y mejorar los servicios ecosistémicos.

Para lograr lo anterior, se recomiendan 3 tipos de acciones: estructurales, de conservación y proyectos sustentables, estos últimos con la finalidad de propiciar la reactivación económica local. Se presenta, una ruta crítica que contiene las acciones a implementar, los tiempos de implementación y los costos de las acciones, así como mapas conceptuales para cada una de las acciones que muestran el proceso de implementación. Finalmente, se establece el sistema de seguimiento y evaluación mediante indicadores de cumplimiento.

El empoderamiento la población en general en el uso del agua de los manantiales, se ha dado por muchos años, sin embargo no se ha atendido el mantenimiento, ni la protección de este vital e importante elemento. Por lo que resulta de gran importancia trabajar de la mano con la población en general y los distintos niveles de gobierno a fin de socializar las acciones que se pretenden realizar, bajo el consentimiento y aceptación de los dueños y poseedores del recurso, sabiendo que con esta actividad, se tendrá una serie de beneficios ambientales, sociales y económicos.

Referencias

Albert. (2009). *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. WMO-TD No. 1500.

Asistencia técnica para el desarrollo de procesos de purificación y recuperación de acuíferos, manantiales y cuerpos de agua en los estados de la región norte. Durango, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo león, Tamaulipas y Zacatecas, que permitan rescatar el dinamismo de la producción de ganado, leche y granos, al amparo del programa regional de desarrollo previsto en el PND. Enero 2015 SAGARPA.

Balaguer, L. (2011). *Restauración ecológica*. Recuperado el 11 de diciembre de 2021 de Researchgate: <https://www.researchgate.net/directory/publications>

Blaney, H. F., Criddle W. D. (1996). Determining water needs from climatological data. U. S. D. A. Soil Conservation Service. SOS-TP. P. 8 y 9.

Cairns, S., Dudley, N., Hall, C. y Stolton, s. (2014). Restauración ecológica para áreas protegidas: principios, directrices y buenas prácticas. Valentine, P. (Ed). Serie Directrices Sobre Buenas Prácticas en Áreas Protegidas de la UICN-CMAP, No. 18.

Campos-Aranda, D. (1992). *Procesos del ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí: UASLP.

CCF. (2020). Apoyar el proyecto de reparación de tapas de desbordamiento y dragado (traducción). Recuperado el 7 de enero de 2022, de <https://www.cfothai.or.th/drought-3/>

CENAPRED. (s.f.). *descargas*. Obtenido de <http://www.anr.gob.mx/descargas/>

Comisión Nacional del Agua, el agua en México Edición: marzo, 2006. ISBN 968-817-730-X D.R. © 2006, Av. Insurgentes Sur 2416 Col. Copilco El Bajo C.P. 04340 México, D. F

Comisión Nacional de Riego (s.f.). *Guía metodológica. Marco operativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos*. Chile: Autor.

Comité técnico de aguas subterráneas del acuífero del valle de Tehuacán, a. C., Hidrología Subterránea del Acuífero Valle de Tehuacán, Agosto 2019.

CONAFOR. (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas* (3ª Ed.).

CONAFOR y Universidad Autónoma de Chapingo. (2013). *Sistemas agroforestales maderables en México*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126296/Sistemas_agroforestales_maderables_en_Mexico.pdf

CONAGUA. (2020). *ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE TEHUACÁN (2105), ESTADO DE PUEBLA*. México.

Coordinación de Humanidades, "Estudio Sobre Protección De Ríos, Lagos y Acuíferos desde La Perspectiva de Los Derechos Humanos, Universidad Nacional Autónoma de México, Mayo 2018.

Daus, A. (2019). *Almacenamiento y Recuperación de Agua en Acuíferos: Mejoramiento de la Seguridad en el Abastecimiento de Agua en el Caribe Oportunidades y Desafíos*. Banco Interamericano de Desarrollo.

DesInventar. (2013). *Inventario Histórico de Desastres*. Obtenido de <https://online.desinventar.org/>

Diseño del proceso de producción de miel en la localidad de Malingas, región de Piura, Piura, universidad de Piura, noviembre de 2019

Doran, G. T. (1981). «There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives». *Management Review*. 70(11): 35–36.

El Regional Informativo. (2018). Registra 50% de avance rehabilitación de zanjas bordo en el Parque Nacional Malinche: CGE. Recuperado el 7 de enero de 2022, de <https://www.regionalinformativo.com/2018/07/04/registra-50-de-avance-rehabilitacion-de-zanjas-bordo-en-el-parque-nacional-malinche-cge/>

ETCCDI. (s.f.). *herramientas de software diseñadas para el control de calidad, la homogeneización y la generación de índices de cambio climático*. Obtenido de etcddi.pacificclimate.org/indices.shtml

González, D.A. (2017). *Gestión de la recarga de acuíferos como estrategia para la seguridad hídrica*. III Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2017.

Henríquez, E. (2017). Realizan trabajos de desazolve para reencausar río. Cuarto Poder de Chiapas. Recuperado el 29 de diciembre de 2021, de <https://www.cuartopoder.mx/chiapas/realizan-trabajos-de-desazolve-para-reencausar-rio/224337>

Hernández, D. (1989). Excursión Geológica. En P. "... Jardín Botánico de Zapotitlán, *Memorias Sobre Líneas de Investigación Ecológica en Zonas Áridas*.

INECC. (2013). *Escenarios de cambio climático para Mexico*. Obtenido de www.escenarios.inecc.gob.mx/

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Monitor Mesoamericano de Sequía. Obtenido de <http://galileo.imta.mx/Sequias/moseq/graficaGov.html>

IPCC. (2007). *Cuarto Informe de Evaluación del panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático AR4*.

- IPCC. (2013). *Guía Resumida, del Quinto Informe de Evaluación del IPCC Grupo de Trabajo I*.
- Landaeta Cruz J. Instituto Nacional de Canalizaciones. Dirección de Proyectos e Investigación, Caracas – Venezuela, *Potenciales Impactos Ambientales Generados Por El Dragado Y La Descarga Del Material Dragado*.
- Magaña, V. (2004). *Los impactos del niño en México*. México,,: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación.
- March I. J., B. U. (2013). *Herramientas disponibles en línea de utilidad para evaluar los impactos del cambio climático y apoyar el diseño de medidas de adaptación y mitigación. Alianza México Resiliente; áreas protegidas, respuestas naturales al cambio climático*. México.
- Moreno-Calles, A. I., Toledo, V., Casas, A. (2014). La importancia biocultural de los sistemas agroforestales tradicionales de México. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/305084163>
- NOAA. (s.f.). *Climate Prediction Center*. Obtenido de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/ensodisc_Sp.shtml
- OMM-Nº100. (2011). *Guía de prácticas climatológicas*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- OSSO, C. (2018). *Desinventar*. Obtenido de <https://www.desinventar.org/es/database>
- P. Naswa, S. T. (2015). *Buenas prácticas para el diseño e implementación de sistemas nacionales de monitoreo para la adaptación al cambio climático*. Dinamarca: PNUMA.
- Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. (2007). *Geología del Valle de Tehuacán*. Vol.24 no.2, Ciudad de México.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). Sistemas agroforestales, alternativa multifuncional de vida. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/sistemas-agroforestales-alternativa-multifuncional-de-vida>

SEMARNAT. (2003). *Clasificación de texturas y parámetros mecánicos de suelos*. México.

Smith, M., Cross, K., Paden, M. y Iavan, P. (éds.). *Acuíferos: Gestión sostenible de las aguas subterráneas*. San José, Costa Rica: UICN ORMACC, 2016.

Solomon, S. (2007). CLIMATE CHANGE 2007: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. CAMBRIDGE, UNITED KINGDOM AND NEW YORK, NY, USA,: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

UNAM, Memorias del Taller Recarga Artificial Del Acuífero Del Valle de México, 8 de junio de 2017.

UNESCO, Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en Zonas Semiáridas. 2005.

Weather, U. (s.f.). *Hurricane Data*. Obtenido de weather.unisys.com/hurricanes



Gobierno de Puebla

Hacer historia. Hacer futuro.