



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA  
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA

**ESTRATEGIAS PARA LA PROTECCIÓN DE  
MANANTIALES: PROPUESTA METODOLÓGICA DE  
ACUERDO AL ENTORNO FÍSICO-SOCIAL Y  
PROYECCIÓN DE ESCENARIOS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**DOCTOR EN CIENCIAS DEL AGUA**

PRESENTA  
**SONIA LÓPEZ VALLE**

TUTOR ACADÉMICO  
DR. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO

TUTORES ADJUNTOS  
DRA. MARIA VICENTA ESTELLER ALBERICH  
DR. ROBERTO FRANCO PLATA

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

JUNIO DE 2018

## Agradecimientos

Agradezco al CONACYT por el apoyo económico otorgado para la realización de mis estudios de Doctorado.

Al COMECYT y al CIRA por el otorgamiento de recursos para asistir a eventos científicos.

Al comité doctoral, que me brindó el tiempo y la orientación suficientes para poder efectuar este trabajo de investigación:

Dr. José Luis Expósito Castillo (CIRA-UAEMex)

Dra. Ma. Vicenta Esteller Alberich (CIRA-UAEMex)

Dr. Miguel Ángel Gómez Albores (CIRA-UAEMex)

Dr. Guillermo Pedro Morales Reyes (CIRA-UAEMex)

Dr. Roberto Franco Plata (Facultad de Geografía- UAEMex))

Dra. Eloísa Domínguez Mariani (UAM)

Dra. Marivel Hernández Tellez (CIRA-UAEMex)

A mis padres, por el apoyo que siempre me han brindado.

A mi hermana, que ha estado conmigo en el transcurso de mis estudios, sobre todo en la última etapa de la tesis.

A un gran amigo que me ha apoyado incondicionalmente.

A mis compañeros del CIRA por el apoyo recibido.

*Dedicado a mi familia*

# ÍNDICE GENERAL

|   |      |
|---|------|
| ÍNDICE GENERAL.....   | i    |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | iv   |
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | viii |
| INTRODUCCIÓN.....   | 1    |
| JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA.....  | 2    |
| HIPÓTESIS .....   | 3    |
| OBJETIVOS.....  | 3    |
| CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO .....   | 5    |
| 1.1. Localización y características generales.....  | 5    |
| 1.2. Marco geológico .....  | 9    |
| 1.3. Evolución de la población y la demanda de agua.....  | 13   |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....   | 16   |
| 2.1. Importancia de la gestión del agua subterránea y de los manantiales .....                      | 16   |
| 2.2. Clasificación y tipología de los manantiales .....   | 20   |
| 2.3. Protección de las fuentes de agua subterránea y manantiales.....                               | 25   |
| 2.4. Métodos y técnicas para la protección de manantiales .....                                     | 29   |
| 2.5. Delimitación de zonas de protección de manantiales .....                                       | 33   |
| 2.6. Los SIG como herramientas de apoyo en la protección de manantiales .....                       | 38   |
| 2.7. Regionalización de variables físicas para la caracterización de manantiales .....              | 39   |
| 2.8. Evaluación Multicriterio (MCE) en el análisis de protección de manantiales .....               | 46   |
| 2.9. Estimación del balance hídrico para la delimitación de zonas de protección de manantiales..... | 53   |
| 2.10. Proyección de escenarios para la protección de manantiales .....                              | 64   |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....  | 77   |
| 3.1. Búsqueda, análisis y síntesis de la información bibliográfica y cartográfica .....             | 77   |
| 3.2. Regionalización física del área de estudio.....  | 80   |
| 3.2.1. Variables utilizadas para la regionalización .....   | 81   |
| 3.2.2. Método de regionalización.....   | 84   |

|   |            |
|---|------------|
| 3.3. Identificación, selección regional y clasificación de los tipos de manantiales ..... | 85         |
| 3.3.1. Identificación y ubicación de manantiales .....                                    | 86         |
| 3.3.2. Selección de manantiales a nivel regional .....                                    | 86         |
| 3.3.3. Clasificación de los manantiales .....   | 90         |
| 3.4. Selección de manantiales prioritarios con la aplicación MCE .....                    | 90         |
| 3.4.1. Definición del objetivo .....  | 90         |
| 3.4.2. Identificación de criterios .....  | 91         |
| 3.4.3. Reescalamiento de factores .....   | 100        |
| 3.4.4. Ponderación de pesos de los factores.....  | 101        |
| 3.4.5. Agregación de factores .....   | 102        |
| 3.5. Delimitación de las zonas de protección de manantiales.....                          | 102        |
| 3.5.1. Delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales .....            | 103        |
| 3.5.2. Estimación del balance hídrico .....   | 106        |
| 3.5.3. Delimitación de las zonas de protección de los manantiales .....                   | 114        |
| 3.6. Proyección de escenarios futuros de las estrategias de protección de manantiales .   | 117        |
| 3.6.1. Proyecciones de los cambios en los usos del suelo .....                            | 117        |
| 3.6.2. Escenarios del cambio climático para la estimación del balance hídrico ..          | 123        |
| <b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>   | <b>125</b> |
| 4.1. Regionalización física del área de estudio .....                                     | 125        |
| 4.1.1. Variables utilizadas para la regionalización.....                                  | 125        |
| 4.1.2. Regionalización de las variables físicas.....                                      | 133        |
| 4.2. Identificación, selección regional y clasificación de manantiales.....               | 136        |
| 4.2.1. Identificación y ubicación de manantiales .....                                    | 136        |
| 4.2.2. Selección de manantiales a nivel regional .....                                    | 136        |
| 4.2.3. Parámetros fisicoquímicos de los manantiales.....                                  | 146        |
| 4.2.4. Clasificación de manantiales.....  | 151        |
| 4.3. Selección de manantiales a nivel local y análisis multicriterio (MCE).....           | 151        |
| 4.3.1. Definir el objetivo .....  | 151        |
| 4.3.2. Identificación de Criterios.....   | 151        |
| 4.3.3. Reescalamiento de factores .....   | 159        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.3.4. Ponderación de pesos de los factores.....   | 163 |
| 4.3.5. Agregación de factores .....  | 165 |
| 4.3.6. Priorización de manantiales a proteger.....   | 165 |
| 4.4. Características generales de los manantiales con prioridad de protección .....                              | 168 |
| 4.4.1. Manantial Chichotla, Temascaltepec.....   | 168 |
| 4.4.2. Manantial Las Fuentes Yече, Jocotitlán .....  | 170 |
| 4.4.3. Manantial Real de Arriba (El fresno), Temascaltepec .....   | 173 |
| 4.4.4. Manantial Ojo de Agua, Almoloya de Juárez .....   | 174 |
| 4.4.5. Manantial Los Fresnos, Villa Guerrero .....   | 175 |
| 4.4.6. Manantial El Capulín, Zinacantepec .....  | 177 |
| 4.5. Delimitación de zonas de protección de manantiales .....  | 178 |
| 4.5.1. Delimitación de zonas de captura potencial de los manantiales .....                                       | 178 |
| 4.5.2. Estimación de la infiltración para la delimitación de las zonas de protección<br>de manantiales.....      | 183 |
| 4.5.3. Delimitación de las zonas de protección de manantiales.....   | 204 |
| 4.6. Proyección de escenarios futuros en la delimitación de las zonas de protección ....                         | 215 |
| 4.6.1. Proyección de escenarios de cambio del uso del suelo.....   | 215 |
| 4.6.2. Proyección de escenarios de variabilidad climática para la estimación de las<br>zonas de protección ..... | 238 |
| 4.6.3. Escenarios de las zonas de protección .....   | 246 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....   | 252 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 256 |
| ANEXO 1. FOTOGRAFÍAS DEL CONTEXTO DE LOS MANANTIALES.....  | 268 |
| ANEXO 2. FICHAS DESCRIPTIVAS DEL INVENTARIO DE MANANTIALES .....   | 275 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1.1. Mapa de ubicación del Estado de México.....   | 6   |
| Figura 1.2. Mapa de altitud, con base en el Modelo Digital de Elevación.....  | 7   |
| Figura 1.3. Mapa de precipitación media anual (1980-2010).....  | 8   |
| Figura 1.4. Mapa geológico.....   | 10  |
| Figura 1.5. Crecimiento de la población de 1950 a 2015 y proyecciones de 2020 a 2030 .....  | 14  |
| Figura 2.1. Esquema sobre el origen de los manantiales.....   | 21  |
| Figura 2.2. Esquema de las zonas de protección de manantiales.. ..  | 36  |
| Figura 2.3. Interpretación del sistema de flujo de agua subterránea en valles<br>volcanosedimentarios. ....                                     | 45  |
| Figura 2.4. Funciones de pertenencia difusa para reescalar factores.....  | 49  |
| Figura 2.5. Estrategia de decisión triangular .....   | 52  |
| Figura 3.1. Secuencia del proceso metodológico .....  | 78  |
| Figura 3.2. Proceso metodológico de la regionalización del área de estudio. ....  | 80  |
| Figura 3.3. Esquema del proceso del método de Análisis de Tabulación Cruzada.....   | 84  |
| Figura 3.4. Secuencia metodológica para la selección regional de manantiales. ....  | 85  |
| Figura 3.5. Secuencia metodológica para la selección de manantiales prioritarios para su<br>protección utilizando el EMC.....                   | 91  |
| Figura 3.6. Captación de manantial de ladera concentrado con caja de captación y cercado ..   | 93  |
| Figura 3.7. Captación de manantial de ladera concentrado descubierto .....  | 94  |
| Figura 3.8. Secuencia metodológica para la delimitación de zonas de protección de<br>manantiales. ....  | 103 |
| Figura 3.9. Delimitación de una cuenca hidrográfica y una cuenca hidrogeológica.....  | 105 |
| Figura 3.10. Proceso del cálculo de la $ET_p$ mediante la fórmula de Thornthwaite.....  | 113 |
| Figura 3.11. Proceso del cálculo de la $ET_o$ mediante la fórmula de Hargreaves.....  | 113 |
| Figura 3.12. Delimitación del área de captura potencial de un manantial y de las zonas de<br>protección I, II y II.....                         | 115 |
| Figura 3.13. Diagrama de Todd, que muestra la relación de la descarga media del manantial, la<br>recarga media anual y el área de recarga ..... | 116 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.14. Secuencia metodológica para la proyección de escenarios de las estrategias de protección. ....                               | 117 |
| Figura 4.1. Mapa del tipo de roca de acuerdo con su génesis. ....   | 126 |
| Figura 4.2. Mapa de clasificación de rocas de acuerdo a su funcionamiento hidrogeológico. ....  | 128 |
| Figura 4.3. Mapa de clasificación de geformas (con base en la pendiente del terreno) en relación a su funcionamiento hidrogeológico. .... | 130 |
| Figura 4.4. Mapa de clasificación de precipitación anual. ....  | 131 |
| Figura 4.5. Extensión territorial por región en km <sup>2</sup> .....   | 133 |
| Figura 4.6. Mapa de regionalización física del Estado de México. ....   | 135 |
| Figura 4.7. Mapa de ubicación de los manantiales con títulos de asignación .....  | 137 |
| Figura 4.8. Mapa de ubicación de los manantiales por uso de agua. ....  | 139 |
| Figura 4.9. Mapa de manantiales seleccionados a nivel regional. ....  | 142 |
| Figura 4.10. Mapa de manantiales seleccionados a nivel regional y visitados en campo. ....  | 145 |
| Figura 4.11. Gráfica de caudal asignado de agua (l/s). ....   | 162 |
| Figura 4.12. Gráfica de población abastecida. ....  | 162 |
| Figura 4.13. Esquema de ejecución del EMC en el módulo Spatial Decision Modeler. ....   | 165 |
| Figura 4.14. Localización de los manantiales con prioridad de protección. ....  | 167 |
| Figura 4.15. Localización de los manantiales dentro de los límites político-administrativos de los acuíferos. ....                        | 169 |
| Figura 4.16. Caja de captación y excedente del manantial Chichotla .....  | 170 |
| Figura 4.17. Caja de captación y usos del manantial Las fuentes Yече. ....  | 172 |
| Figura 4.18. Caja de captación y usos del manantial Real de Arriba. ....  | 173 |
| Figura 4.19. Caja de captación del manantial y usos del manantial Ojo de Agua. ....   | 175 |
| Figura 4.20. Caja de captación del manantial Los Fresnos .....  | 176 |
| Figura 4.21. Caja de captación del manantial El Capulín. ....   | 177 |
| Figura 4.22. Mapa de la delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales. ....   | 180 |
| Figura 4.23. Mapa de precipitación media anual (1980-2010) y zonas de captura potencial de los manantiales. ....                          | 184 |
| Figura 4.24. Histograma de precipitación media mensual de las zonas de captura de los manantiales. ....                                   | 185 |
| Figura 4.25. Mapa de edafología de la zona de estudio .....   | 187 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.26. Tipo de suelo según su textura y zonas de captura potencial de manantiales....                                    | 188 |
| Figura 4.27. Mapa de uso del suelo para 2016 y zonas de captura potencial de manantiales.                                      | 190 |
| Figura 4.28. Valor de k en función del tipo y uso del suelo y zonas de captura potencial de los manantiales. ....              | 192 |
| Figura 4.29. Mapa de Coeficiente de escurrimiento anual y zonas de captura potencial de los manantiales. ....                  | 194 |
| Figura 4.30. Mapa de escurrimiento superficial anual y zonas de captura potencial. ....  | 195 |
| Figura 4.31. Histograma de Escurrimiento superficial mensual de las zonas de captura potencial.....                            | 196 |
| Figura 4.32. Temperatura media anual y zonas de captura potencial de los manantiales. ....                                     | 197 |
| Figura 4.33. Histograma de Temperatura media mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.....                 | 198 |
| Figura 4.34. Mapa de evapotranspiración potencial anual y las zonas de captura potencial.                                      | 199 |
| Figura 4.35. Histograma de evapotranspiración de referencia mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales. .... | 200 |
| Figura 4.36. Histograma de infiltración potencial mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.....            | 201 |
| Figura 4.37. Mapa de infiltración real anual y zonas de captura potencial de manantiales. ..                                   | 202 |
| Figura 4.38. Histograma de infiltración real mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales. ....                | 203 |
| Figura 4.39. Zonas de protección del manantial Chichotla y Real de Arriba, Temascaltepec. ....                                 | 206 |
| Figura 4.40. Zona de captura potencial para el manantial Las Fuentes Yeche, Jocotitlán. ....                                   | 208 |
| Figura 4.41. Zona de captura potencial para el manantial Ojo de Agua, Almoloya de Juárez. ....                                 | 210 |
| Figura 4.42. Zona de captura potencial para el manantial Los Fresnos, Villa Guerrero. ....                                     | 212 |
| Figura 4.43. Zona de captura potencial para el manantial El Capulín, Zinacantepec. ....  | 214 |
| Figura 4.44. Mapa del uso de suelo para el año 1986 y zonas de captura potencial. ....   | 216 |
| Figura 4.45. Gráfica de pérdidas y ganancias por categoría de uso de suelo 1986 y 2016. ...                                    | 217 |
| Figura 4.46. Gráfica del cambio neto por categoría entre 1986 y 2016. ....   | 218 |
| Figura 4.47. Gráfica de contribuciones al cambio neto en el uso de suelo urbano. ....  | 219 |
| Figura 4.48. Gráfica de contribuciones al cambio neto en el uso de suelo agrícola ....   | 220 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.49. Gráfica de contribuciones al cambio neto en el uso de suelo de pastizal. ....  | 221 |
| Figura 4.50. Gráfica de contribuciones al cambio neto en el uso de suelo de bosque. ....  | 222 |
| Figura 4.51. Imágenes de MDE, pendiente, temperatura y precipitación anual del área de estudio.....   | 225 |
| Figura 4.52. Imágenes de la distancia a cuerpos de agua y zonas urbanas, de probabilidad de evidencia y de NDVI del área de estudio. ....   | 226 |
| Figura 4.53. Proceso y tasa de Precisión de la Red Neuronal Perceptrón Multicapa (MLP). ....  | 228 |
| Figura 4.54. Mapa del uso de suelo para el año 2016, zonas de captura potencial y límite de la ZP II. ....  | 230 |
| Figura 4.55. Mapa del uso de suelo para el año 2030, zonas de captura potencial y límite de la ZP II. ....  | 231 |
| Figura 4.56. Mapa del uso de suelo para el año 2050, zonas de captura potencial y límite de la ZP II. ....  | 232 |
| Figura 4.57. Gráfica de usos del suelo para el año 1986, 2016 y proyectados a 2030 y 2050 de las zonas de captura potencial.....  | 235 |
| Figura 4.58. Gráfica de la temperatura media anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050, con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM).....       | 239 |
| Figura 4.59. Precipitación promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM).....                 | 241 |
| Figura 4.60. Gráfica del escurrimiento superficial anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM).....  | 242 |
| Figura 4.61. Gráfica de evapotranspiración promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM)..... | 243 |
| Figura 4.62. Gráfica de infiltración promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM).....       | 245 |
| Figura 4.63. Infiltración anual proyectada a 2030 con RCP 4.5 y proyección de las ZP.....   | 248 |
| Figura 4.64. Infiltración anual proyectada a 2050 con RCP 8.5 y proyección de las ZP.....   | 249 |
| Figura 4.65. Mapa que muestra la dinámica espacio temporal de las zonas de protección. ..   | 251 |

# ÍNDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 2.1. Matriz Saaty para la comparación por pares .....  | 51  |
| Tabla 2.2. Coeficiente de escurrimiento .....  | 56  |
| Tabla 2.3. Tipo de textura del suelo .....   | 57  |
| Tabla 2.4. Valores de $K$ en función del tipo y uso de suelo. ....   | 58  |
| Tabla 2.5. Fórmulas e insumos necesarios para evaluar la $ET_p$ y $ET_o$ .....   | 60  |
| Tabla 2.6. Características de los escenarios climáticos .....  | 76  |
| Tabla 3.1. Información cartográfica utilizada: tabular, vectorial y ráster. ....   | 79  |
| Tabla 3.2. Clasificación de geoformas considerando la pendiente en términos de su<br>funcionamiento hidrogeológico. .... | 83  |
| Tabla 3.3. Clasificación de la precipitación anual.....  | 84  |
| Tabla 3.4. Ficha descriptiva en términos de operación y conservación de manantiales. ....                                | 88  |
| Tabla 3.5. Parámetros medidos por los electrodos de pH, Conductividad Eléctrica y ORP....                                | 89  |
| Tabla 3.6. Estado de conservación del manantial de la infraestructura.....   | 94  |
| Tabla 3.7. Uso del suelo. ....   | 95  |
| Tabla 3.8. Existencia de fuentes alternas de abastecimiento.....   | 97  |
| Tabla 3.9. Índice y grado de marginación. ....   | 98  |
| Tabla 3.10. Clasificación de manantiales según descarga.....   | 100 |
| Tabla 3.11. Valores de $K$ en función del tipo y uso de suelo .....  | 110 |
| Tabla 3.12. Variables e insumos para determinar los cambios de uso del suelo.....  | 121 |
| Tabla 4.1. Clasificación de tipo de roca de acuerdo con su funcionamiento hidrogeológico.                                | 127 |
| Tabla 4.2. Clases por cada variable física (roca, geoforma, precipitación).....  | 133 |
| Tabla 4.3. Clases de las regiones de interés .....   | 134 |
| Tabla 4.4. Uso y volúmenes de agua de manantiales asignados .....  | 138 |
| Tabla 4.5. Listado de manantiales seleccionados regionalmente para el uso público urbano.                                | 140 |
| Tabla 4.6. Características de los 27 manantiales visitados en campo. ....  | 144 |
| Tabla 4.7. Reasignación de numeración a las regiones que cuentan con manantiales<br>representativos .....                | 146 |
| Tabla 4.8. Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua de los manantiales .....                                     | 147 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4.9 Estado de conservación de la infraestructura de los manantiales.....  | 153 |
| Tabla 4.10. Uso de suelo donde se localizan los manantiales .....   | 154 |
| Tabla 4.11. Existencia de otras fuentes de abastecimiento a los manantiales .....                                     | 156 |
| Tabla 4.12 Población abastecida por el caudal de los manantiales .....  | 157 |
| Tabla 4.13 Índices y grados de marginación de las localidades abastecidas por los manantiales.<br>.....               | 158 |
| Tabla 4.14. Caudal asignado para el abastecimiento público.....   | 159 |
| Tabla 4.15. Valores de los factores reescalados .....   | 163 |
| Tabla 4.16. Pesos de los factores realizando una comparación por pares según grupo de<br>expertos.....                | 164 |
| Tabla 4.17. Orden de importancia de los factores de acuerdo con la comparación por pares.                             | 164 |
| Tabla 4.18. Asignación de pesos de los manantiales prioritarios a proteger.....                                       | 164 |
| Tabla 4.19. Grado de prioridad de protección de los manantiales por regiones.....                                     | 166 |
| Tabla 4.20. Área de las zonas de captura potencial de los manantiales. ....   | 179 |
| Tabla 4.21. Precipitación media mensual y anual de las zonas de captura potencial de los<br>manantiales. ....         | 185 |
| Tabla 4.22. Valores de $K$ en función del tipo y uso del suelo. ....  | 191 |
| Tabla 4.23. Valores de $K$ , $C_e$ y Escurrimiento promedio anual de las zonas de captura<br>potencial.....           | 193 |
| Tabla 4.24. Escurrimiento superficial mensual y anual de las zonas de captura potencial. ...                          | 196 |
| Tabla 4.25. Temperatura promedio mensual y anual de las zonas de captura potencial de los<br>manantiales . ....       | 198 |
| Tabla 4.26. Radiación solar mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales..                            | 198 |
| Tabla 4.27. Evapotranspiración potencial mensual y anual de las zonas de captura potencial de<br>los manantiales..... | 200 |
| Tabla 4.28. Infiltración potencial mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales<br>. ....             | 201 |
| Tabla 4.29. Infiltración real mensual y anual de las zonas de captura potencial de los<br>manantiales .....           | 203 |
| Tabla 4.30. Área ocupada por uso del suelo para el año 1986 y 2016 en la entidad.....                                 | 215 |
| Tabla 4.31. Pérdidas y ganancias por categoría de uso de suelo entre 1986 y 2016.....                                 | 217 |
| Tabla 4.32. Cambio neto por categoría entre 1986 y 2016. ....   | 218 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 4.33. Contribuciones al cambio neto en el uso de suelo urbano.....   | 219 |
| Tabla 4.34. Contribuciones al cambio neto en el uso de suelo agrícola.....   | 220 |
| Tabla 4.35. Contribuciones al cambio neto en el uso desuelo de pastizal.....   | 221 |
| Tabla 4.36. Contribuciones al cambio neto en el uso de suelo de bosque.....  | 222 |
| Tabla 4.37. Transiciones de los cambios de uso del suelo .....   | 223 |
| Tabla 4.38. Variables explicativas seleccionas en la predicción del cambio del uso de suelo  | 224 |
| Tabla 4.39. Área ocupada por uso del suelo en la entidad para el año 1986, 2016 y para<br>escenarios al año 2030 y 2050. ....  | 229 |
| Tabla 4.40. Cambio de los usos del suelo para el año 1986, 2016 y proyecciones al 2030 y<br>2050 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM).....  | 234 |
| Tabla 4.41. Extensión superficial de los usos del suelo en las ZP II para el año 2016. ....  | 237 |
| Tabla 4.42. Temperatura media anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y<br>2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales<br>(ZCPM).....                  | 239 |
| Tabla 4.43. Precipitación promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y<br>2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales<br>(ZCPM).....             | 240 |
| Tabla 4.44. Esgurrimiento superficial promedio anual para el periodo 1980-2010 y<br>proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura<br>potencial de los manantiales (ZCPM)..... | 241 |
| Tabla 4.45. Evapotranspiración promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al<br>2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los<br>manantiales (ZCPM).....        | 243 |
| Tabla 4.46. Infiltración promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y<br>2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales<br>(ZCPM).....              | 244 |
| Tabla 4.47. Estimación de la ZP II con base en la infiltración anual proyectada para el año<br>2030. ....  | 246 |
| Tabla 4.48. Estimación de la ZP II con base en la infiltración anual proyectada para el año<br>2050. ....  | 247 |

# INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un componente significativo del ciclo hidrológico, representa el 98% del agua dulce no congelada, es el sostén de varias funciones y servicios ecológicos; además de ser una fuente segura de agua para consumo humano en regiones áridas y semiáridas, así como en pequeñas islas.

La extracción de este recurso hídrico se ha visto incrementada durante los últimos 50 años a causa del aumento de la población y las actividades que ésta realiza, debido a su abundancia, alta calidad y confiabilidad, así como a los avances en los estudios de las condiciones hidrogeológicas, pues facilitan su extracción a un costo monetario relativamente accesible (UNESCO, 2014).

El agua subterránea mantiene una estrecha relación con el agua superficial debido a que esta última se incorpora constantemente al sistema acuífero por la recarga producto de las precipitaciones y en ocasiones de los cuerpos de agua superficiales.

Este recurso subterráneo descarga en manantiales, humedales o cuerpos de agua superficial (arroyos, lagos, ríos, mares), lo que representa un importante aporte de caudal en muchos de ellos. Por su parte, los acuíferos también reciben agua de cuerpos de agua superficial, de modo que su interacción es un tema fundamental en la gestión del agua subterránea. El diagnóstico de la relación entre el agua superficial y el acuífero subyacente es un importante componente de la caracterización de sistemas de agua subterránea (Cap-Net, 2010) y a menudo es difícil separar los dos (Trček & Zojer, 2010), por lo tanto, la relación entre la recarga y descarga de acuíferos es uno de los aspectos más importantes en la protección de los recursos hídricos subterráneos.

A pesar de que en los últimos años se han logrado grandes avances en el conocimiento a nivel mundial sobre el agua subterránea, aún hay temas a profundizar, tales como el funcionamiento de los sistemas acuíferos, el creciente riesgo global de agotar el recurso, así como la contaminación y deterioro de la calidad del agua, entre otros. Estos desafíos requieren de

estudios e investigación exhaustiva, implementación de nuevas metodologías con base científica y un sistema de protección ambientalmente sólido (UNESCO, 2014).

Por tal razón, la protección del agua subterránea debe ser una prioridad, y en el caso particular de esta investigación, la de los manantiales, que representan puntos donde el agua subterránea emerge de forma natural desde una roca o suelo y fluye hacia la superficie o hacia una masa de agua superficial (GHI, 2012).

Existen diferentes metodologías de tipo cualitativo y cuantitativo para la protección de los recursos hídricos. En este trabajo se revisaron y analizaron las mejores estrategias apoyadas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la identificación de áreas prioritarias para la protección y conservación de manantiales. De esta manera se buscó establecer un esquema metodológico general que oriente a la realización de estudios futuros en este tema.

## **JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA**

Los manantiales cumplen una función importante en el ciclo hidrológico, además de que son indicadores de la salud ambiental de las aguas subterráneas. A pesar de la importancia que tienen los manantiales, sobre todo en zonas rurales como fuentes de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, se ha prestado poca atención a su gestión, protección y conservación. Las referencias bibliográficas sobre estudios de este tipo en el país son muy escasas y a nivel mundial se han centrado sobre todo en ambientes kársticos.

En el Estado de México se han contabilizado 3,006 manantiales que cuentan con títulos de concesión ante la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En 2005 la Secretaría del Medio Ambiente (SMA, antes de Ecología) inició trabajos de campo con el fin de efectuar un programa de localización y caracterización de estas fuentes con el objetivo principal de contar con un inventario, como base de una estrategia de conservación, protección y recuperación. Actualmente se han contabilizado 10,554 manantiales (SMA, 2014). Además, CONAGUA ha señalado la importancia de la conservación de los manantiales, por ejemplo, de los manantiales del Desierto de los Leones para abastecimiento urbano (CONANP, 2011).

El gobierno y otras organizaciones han realizado proyectos que contribuyen a la conservación de manantiales debido a su importancia para el abastecimiento, en particular, de comunidades con cierto grado de marginalidad. Debido al crecimiento de la población, el cambio de uso de suelo y la industria, entre otras causas, muchos de estos manantiales están en peligro tanto en su cantidad como su calidad (extracción excesiva y contaminación respectivamente) y tanto en el presente como en el futuro, por lo que es necesario realizar un trabajo que contribuya a la propuesta de estrategias de protección de manantiales para su uso sustentable, trabajo que hasta el momento ni en el Estado de México ni en el país se ha encontrado documentado.

El aporte al conocimiento científico se basa por un lado, en la implementación de una metodología que permita definir cuál es la o las estrategias más adecuadas para la protección de manantiales de acuerdo a su entorno físico-social y a su necesidad de protección; y por otro, en la proyección de escenarios futuros que permitan vislumbrar la importancia y necesidad de gestión y protección de los manantiales. Las conclusiones y metodología obtenidas en esta investigación pueden servir como punto de partida para trabajos posteriores en otras regiones.

## **HIPÓTESIS**

Las estrategias óptimas para la protección de manantiales están orientadas al grado de conocimiento del funcionamiento de estos últimos, su clasificación, tipología y características de su entorno físico-social. Estas estrategias ayudan a identificar aquellas zonas que tienen prioridad para su protección, con lo que se pueden sugerir alternativas de solución que faciliten un marco de gestión encaminado a la sustentabilidad del recurso hídrico y, por consecuencia, asegurar su uso futuro para la población.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Proponer una metodología que permita definir las mejores estrategias para la protección de manantiales en el Estado de México, considerando su tipología, entorno físico-social y escenarios futuros de acuerdo con la evolución de las variables involucradas.



**Objetivos específicos**

1. Analizar y sintetizar la información documental existente relacionada con la temática de estudio para generar una base de datos.
2. Regionalizar el Estado de México con base en sus características físicas tales como: tipo de rocas considerando su funcionamiento hidrogeológico, geoforma y precipitación, para identificar su relación con la génesis y clasificación de los manantiales existentes.
3. Identificar, seleccionar y clasificar los principales manantiales en el área de estudio, partiendo de su localización en regiones específicas y considerando sus características socioeconómicas y entorno del manantial.
4. Evaluar, seleccionar y aplicar los métodos de protección más adecuados para los manantiales en estudio, considerando su tipología, entorno ambiental y social. características físicas, climáticas y sociales.
5. Establecer las posibles variaciones futuras en las estrategias de protección de los manantiales mediante la proyección de futuros escenarios que contemplen las variables físicas, ambientales y sociales

# CAPÍTULO 1

## CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 1.1. Localización y características generales

El Estado de México se localiza en el centro sur de la República Mexicana; colinda al norte con Querétaro e Hidalgo; al este con Puebla y Tlaxcala; al sur con Guerrero, Morelos y el Distrito Federal; al oeste con Michoacán. Comprende una superficie de 22,336 km<sup>2</sup>, distribuidos en 125 municipios (Figura 1.1) (PEDU, 2006).

La entidad se ubica en una de las regiones más elevadas del país, en la parte más alta de la Mesa Central dentro de la Altiplanicie Mexicana, caracterizada por la presencia de regiones montañosas, zonas con escasas pendientes, abruptos y escarpados valles, lomeríos y llanuras.

En el Estado de México hay una diferencia altitudinal que va desde los 300 metros sobre el nivel del mar (msnm) al sur, en los límites con el Estado de Guerrero, hasta más de 5 200 msnm al oriente, en los límites con el Estado de Puebla, en la cima del volcán Popocatepetl (López et al., 2009) (Figura 1.2).

En la entidad se pueden localizar tres de las cinco montañas más altas del país: los volcanes Popocatepetl (5,500 msnm), Iztaccíhuatl (5,220 msnm) y Xinantécatl o Nevado de Toluca (4,680 msnm), aunque también destacan el Cerro del Mirador (4,120 msnm), el Telapón (4,060 msnm), Cerro Atlamasha (3,980 msnm) y Cerro Jocotitlán (3,910 msnm).

La altitud junto con el relieve de alguna manera condiciona el clima de la entidad. Las condiciones de temperatura y precipitación en el estado dan lugar al predominio de los climas templados en más de la mitad del territorio estatal, distribuyéndose en el oeste, centro, norte y este; también cuenta con climas semifríos localizados en cerros y serranías por encima de los

3,000 metros de altura; los semicálidos, bordeando los climas templados por la porción sur y suroeste; los cálidos, principalmente en el extremo suroeste; los secos, en el noreste y por último los fríos, principalmente en las cimas de los volcanes Iztaccihuatl, Popocatepetl y Nevado de Toluca (INEGI, 2008).

La temperatura media anual es de 14.7°C, y la mínima promedio se presenta en los meses de enero y febrero con alrededor de 3°C. La temperatura máxima promedio se presentan en abril y mayo con alrededor de 25°C. Las lluvias acontecen durante el verano, en los meses de junio a septiembre, siendo la precipitación media anual muy variable, con un valor en torno a los 842 mm. Las mayores precipitaciones se presentan en las subregiones Medio Balsas y Alto Lerma, donde los valores medios anuales superan los 1,300 mm (Figura 1.3).

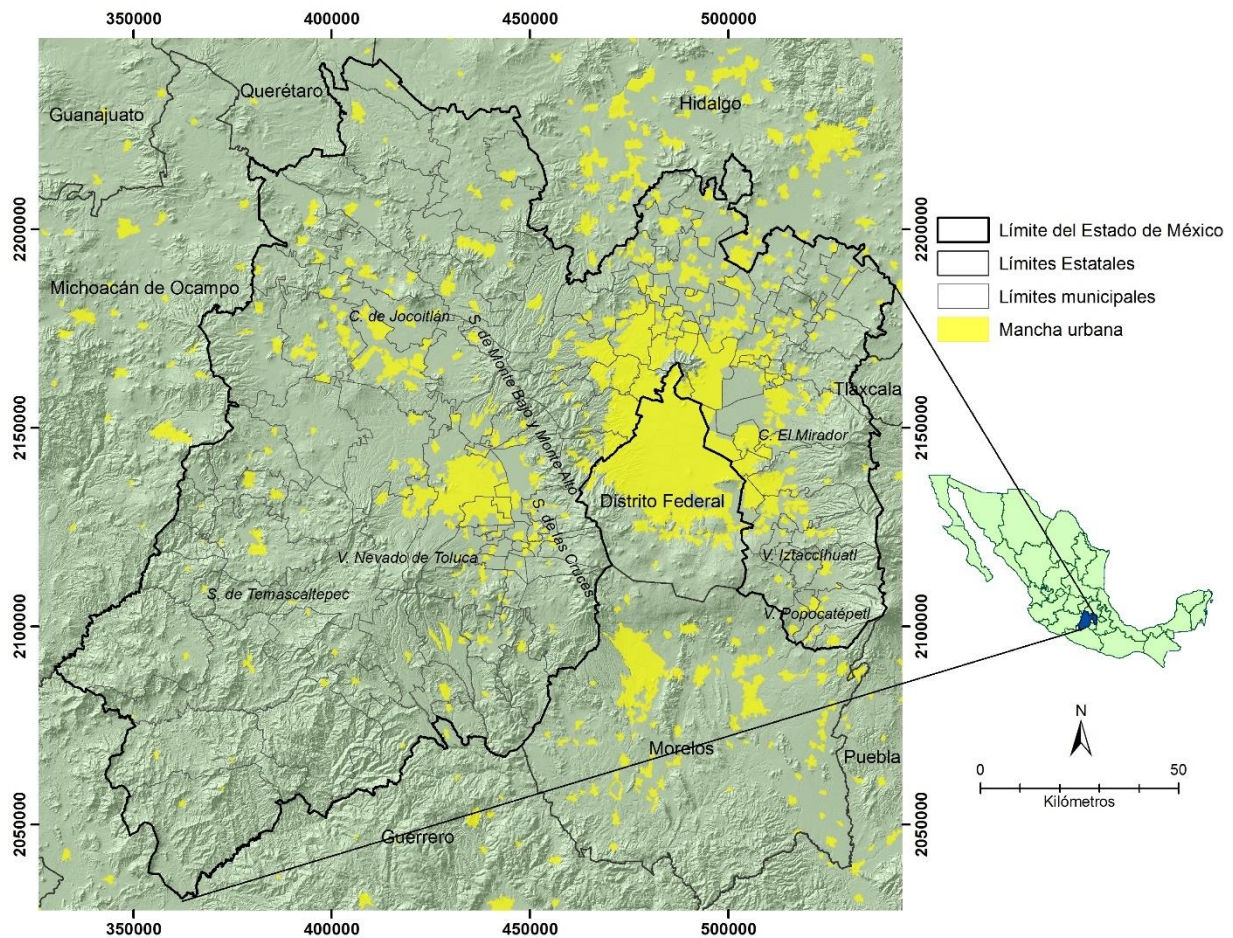


Figura 1.1. Mapa de ubicación del Estado de México.

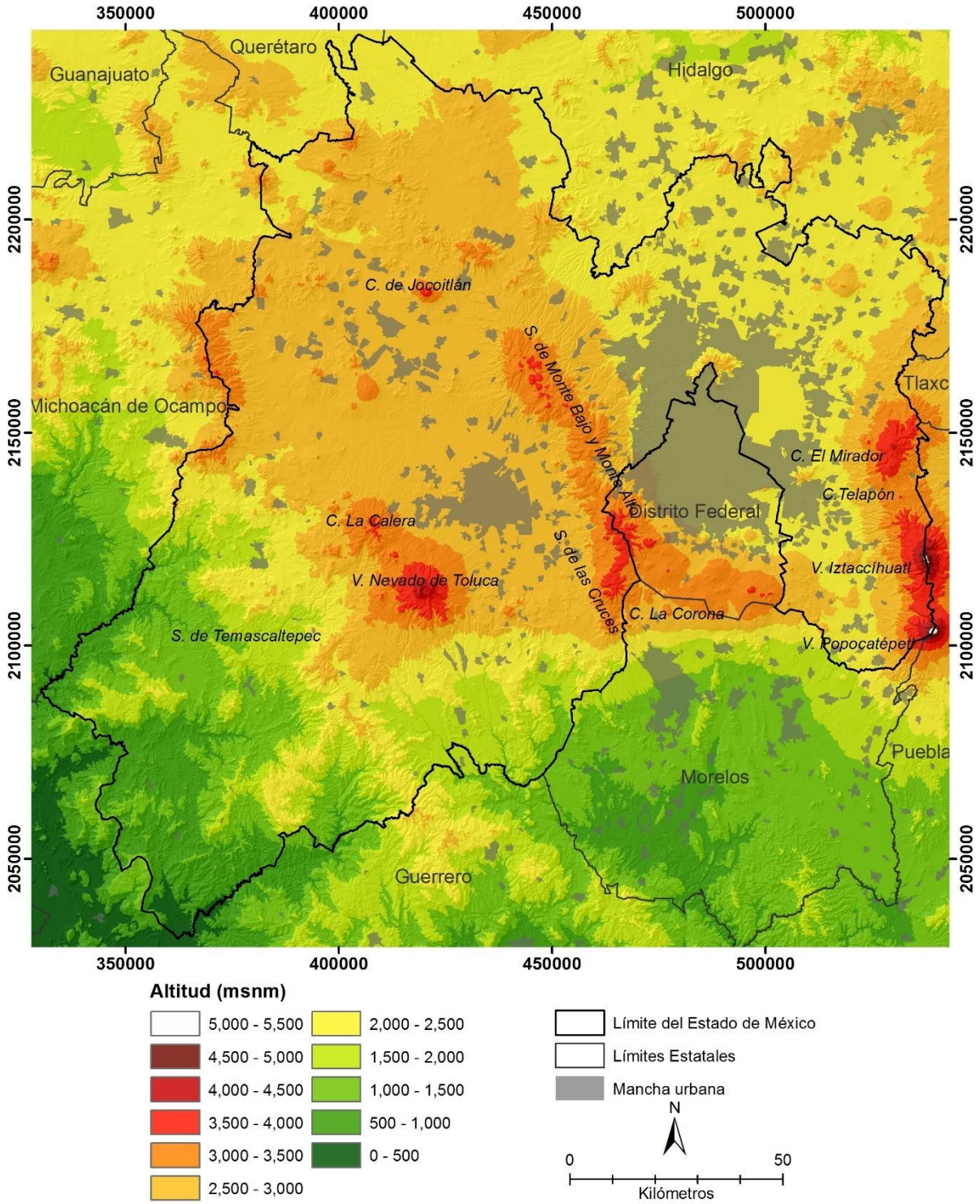


Figura 1.2. Mapa de altitud, con base en el Modelo Digital de Elevación.

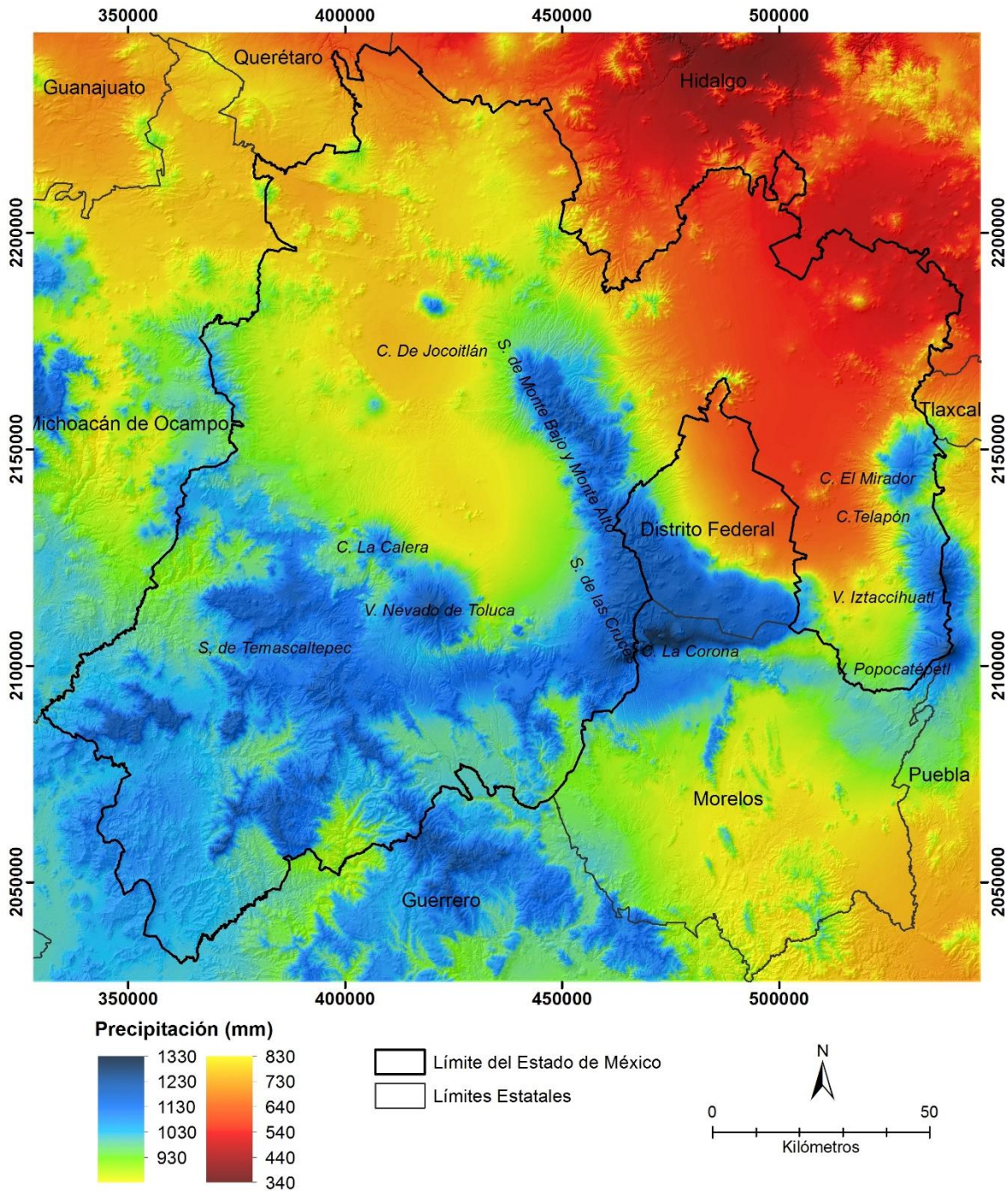


Figura 1.3. Mapa de precipitación media anual (1980-2010), con base en datos del SMN (2015) y Ordoñez (2015).

## 1.2. Marco geológico

El territorio mexiquense geológicamente está conformado por rocas de las eras Mesozoico y Cenozoico. Del Cenozoico corresponden rocas del periodo Terciario (Neógeno y Paleógeno) y Cuaternario; y del Mesozoico rocas del periodo Jurásico y Cretácico (Figura 1.4).

El relieve y su red hidrográfica han sido esculpidos sobre terrenos volcánicos cenozoicos, a excepción de su parte suroccidental, donde los terrenos son en su mayoría metamórficos y sedimentarios marinos mesozoicos.<sup>1</sup>

### a) Provincias geológicas

En el territorio confluyen tres de las grandes provincias de la geología mexicana: el complejo Orogénico Guerrero-Colima, la Plataforma de Morelos y la Faja Volcánica Transmexicana. Cada una de las provincias posee características estratigráficas y estructurales propias, las cuales han conferido relieves, paisajes e hidrografía diferentes (IFOMEGEM, 2014).

El Complejo Orogénico Guerrero-Colima es una provincia de edad mesozoica de origen volcanosedimentario y de ambiente geotécnico de arco insular submarino. La Plataforma de Morelos es una provincia de edad mesozoica, de origen sedimentario marino y de ambiente geotectónico de plataforma. Estas dos provincias constituyen la porción suroccidental del estado. Las provincias Complejo Orogénico Guerrero-Colima y la Plataforma de Morelos están representadas por formaciones sedimentarias y volcanosedimentarias mesozoicas marinas, formadas por calizas de plataforma, secuencias calcáreo terrígenas y arenolíticas (formaciones Mezcala, Arcelia, Morelos, Xochipala, Amatepec, Xochicalco y Acuiltapan).

Las rocas más antiguas (Triásico-Jurásico), consisten en esquistos (Esquisto Taxco Viejo) y granitos milonitizados. Posteriormente, tanto durante el Mesozoico como en el Cenozoico, cuerpos de diversos tamaños y composiciones se han emplazado a la región, y han intrusionado a las formaciones mesozoicas. Finalmente, todas las formaciones fueron cubiertas por materiales volcánicos cenozoicos.

---

<sup>1</sup> La era del Cenozoico comprende desde 65 millones de años hasta el día de hoy; el Mesozoico comprende desde 65 a 251 millones de años.

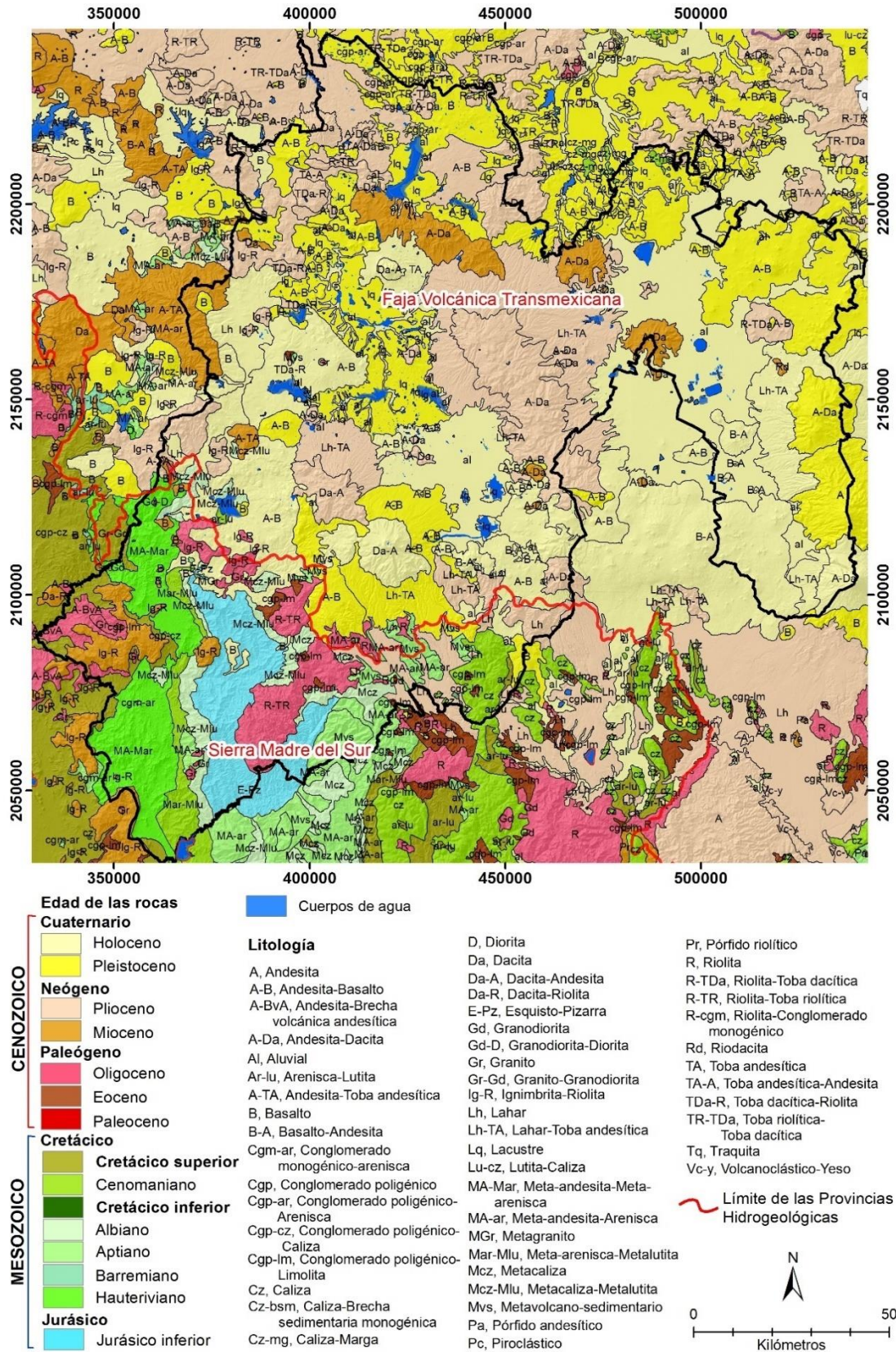


Figura 1.4. Mapa geológico con base en IFOMEGEM (2014) y Chávez et al. (2006).

Las rocas sedimentarias marinas del surponiente fueron depositadas en cuencas mesozoicas intracontinentales, relacionadas con la apertura del Océano Atlántico durante el Mesozoico, o en cuencas oceánicas también mesozoicas de afinidad pacífica.

La Faja Volcánica Transmexicana está representada por espesas secuencias de rocas volcánicas, de composición andesítico-basáltica, que forman las grandes cadenas montañosas, como la Sierras Nevada y la Sierra de las Cruces, constituidas por lavas y diversos materiales piroclásticos.

El origen del volcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana ha sido relacionado con los fenómenos de subducción de la Placa de Cocos (litósfera oceánica), por debajo de la placa Norteamericana (litósfera continental). Este volcanismo se ha ido manifestando desde la segunda mitad del Mioceno (desde hace 12 millones de años).

#### **b) Tectónica**

El plegamiento de las rocas marinas es muy antiguo, sucedió hace aproximadamente 65 millones de años, a finales del Mesozoico e inicios del Cenozoico como una respuesta a la tectónica de tipo comprensivo (Orogenia Laramide), cuyos esfuerzos deformaron la corteza terrestre (IFOMEGEM, 2014).

En cuanto al fallamiento posterior, este se estableció durante el Cenozoico y el Cuaternario (con una antigüedad que comprende desde 65 millones de años hasta nuestros días), y su origen es una tectónica cortical de tipo distensivo en esta región del país.

Las fallas resultantes de esta última deformación se agrupan mayormente en sistemas orientados NNW-SSE, NNE-SSW y E-W. El sistema estructural NNW-SSE en la literatura geológica, fue conocido como Sistema de Fracturas Querétaro-Taxco, que derivó después, como Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende. Su edad es incierta, aunque en algunas regiones para manifestar actividad reciente. La falla más representativa de este sistema en territorio mexiquense es la Falla de Perales.



Las fallas NNE-SSW, que pueden alcanzar orientaciones hasta ENE-WSW, son poco conocidas y están evidenciadas por lineamientos tectónicos y por la el drenaje superficial que muestra esa tendencia estructural. El graben del Barrientos podría pertenecer a este sistema de fallamiento.

Son las fallas del sistema estructural E-W, las que tiene más presencia en el estado. Son estructuras tectónicas de carácter muy regional, que se circunscriben casi exclusivamente, a la provincia de la Faja Volcánica Transmexicana; en la literatura geológica se les conoció originalmente como Zona de Fallas Chapala-Tula, la cual derivó como Sistema de Fallas Tula-Chapala. Geológicamente estas fallas son de edad muy reciente y algunas de ellas actualmente manifiestan actividad tectónica.

Todos los procesos geológicos que registra el estado, están íntimamente ligados entre sí, la tectónica y el fallamiento, la tectónica y el vulcanismo, la tectónica y la sismicidad, etc. Son fenómenos que tienen gran relevancia, e inciden directamente en los procesos geológico-ambientales actuales.

### **c) Hidrogeología**

Desde el punto de vista hidrogeológico, el Estado de México está comprendido por dos de las once grandes provincias hidrogeológicas del país: la provincia de la Faja Volcánica Transmexicana como ya se mencionó (tres cuartas partes del territorio estatal), y la provincia de la Sierra Madre del Sur (ocupa una cuarta parte) (Chávez et al., 2006) (Figura 1.4).<sup>2</sup>

La provincia de la Faja Volcánica Transmexicana consiste en un área de montañas compuesta por una secuencia compleja de rocas volcánicas del Cenozoico, con fosas profundas rellenas con material lacustre del Terciario y Cuaternario. Los derrames basálticos y la mayoría de rocas se caracterizan por una alta permeabilidad debido a su grado de fracturamiento. A profundidad las rocas consolidadas forman barreras para el flujo subterráneo.

---

<sup>2</sup> Dentro de la complejidad geológica del territorio mexicano, en el país se han clasificado 11 regiones hidrogeológicas, cuya división responde a la necesidad de agrupar regionalmente áreas que se caracterizan por su fisiografía y homogeneidad geológico-estructural. Para la delimitación de estas provincias se tomó como referencia la división de las regiones hidrológicas, las provincias fisiográficas y geológicas, y los terrenos tectono-estratigráficos (Chávez et al., 2006).

Los derrames de rocas no fracturadas intercaladas con relleno aluvial forman acuíferos locales independientes en rocas adyacentes. En las partes más bajas, los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales por lo que forman acuíferos de tipo semiconfinado. En superficie se encuentran los depósitos lacustres muy porosos y de poca permeabilidad del Plioceno Tardío formando acuitardos (Chávez et al., 2006).

Por su parte, la provincia de la Sierra Madre del Sur es un área montañosa altamente disectada, compuesta por rocas metamórficas y paleozoicas, rocas sedimentarias del Mesozoico y rocas volcánicas del Mesozoico y Cenozoico, cubiertas en las altiplanicies por suelos residuales. En la porción estatal se encuentran las sierras transversales que alojan a las principales rocas permeables y el mayor volumen de agua subterránea. Las montañas están formadas por calizas y dolomías del Cretácico altamente carstificadas y las mesetas y valles altos están compuestas de rocas sedimentarias continentales del Terciario, aluvión del Holoceno y gruesos depósitos de sedimentos piroclásticos del Cuaternario (Chávez et al., 2006).

### **1.3. Evolución de la población y la demanda de agua**

El Estado de México en 2010 ocupó el primer lugar a nivel nacional en cuanto al número de habitantes, seguido por el Distrito Federal y Veracruz de Ignacio de la Llave, con un total de 15,175,862; 8,851,080 y 7,643,194 habitantes respectivamente de un total de 112,336,538 que se reportaron a nivel nacional (INEGI, 2011).

De 1900 a 1940, el crecimiento poblacional de la entidad no mostró muchos cambios; sin embargo, partir de 1950 se registra un aumento significativo en la población. De 1950 a 2010 la población ha aumentado casi once veces, pasando de 1,392,623 a 15,175,862 habitantes; sin embargo, los cambios más significativos fueron en la década de 1970 a 1980, donde se duplicó el número de personas de 3,833,185 a 7,564,335.

Los últimos datos indican que para 2015 hubo un total de 16,870,388 pobladores, doce veces más que en 1950 y para 2030 se proyecta una población de más de 20 millones de personas (INEGI, 1963, 1970, 1981, 1991, 2011, 2016; CONAPO, 2016) (Figura 1.5).

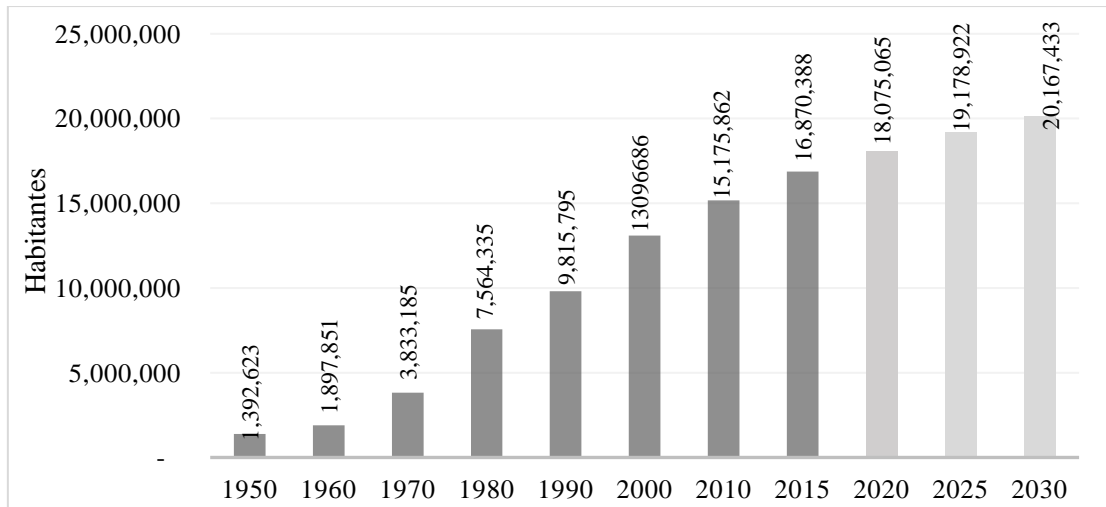


Figura 1.5. Crecimiento de la población de 1950 a 2015 y proyecciones de 2020 a 2030, con base en INEGI (1963-2016) y CONAPO (2016).

De la población existente en la entidad el 87 % es urbana y el 13 % rural.<sup>3</sup> Debido a la constante migración del campo a las ciudades, el número de habitantes de localidades urbanas ha ido en aumento; en contraste, el de las rurales ha disminuido.

En este sentido la evolución de la población tiene un impacto considerable en la extracción, uso y consumo de las fuentes de agua subterránea, pues el incremento de ella sobre el territorio supone que, a mayor concentración de población mayor es el consumo de agua (Manzano, 2007).

El crecimiento poblacional implica una mayor demanda en el suministro de infraestructura, equipamiento y servicios urbanos, para una población en constante incremento, siendo el más importante de todos ellos el suministro de agua potable. El crecimiento en la demanda del agua ha causado que los recursos hídricos locales sean insuficientes para el abastecimiento de la ciudad. Debido a la demanda de agua, se hace indispensable un aprovechamiento, manejo y uso de este recurso en una forma sustentable (García et al., 2012).

<sup>3</sup> De acuerdo con el INEGI, una población se considera rural cuando tiene menos de 2 500 habitantes, mientras que la urbana es aquella donde viven más de 2 500 personas.

La alta demanda de agua subterránea ha generado un mayor abatimiento de los niveles de agua subterránea, a manera de ejemplo, de los 365 acuíferos que se han identificado en el país 106 acuíferos se reportan como sobreexplotados (CONAGUA, 2016). En la entidad mexiquense son 14 los acuíferos que se localizan total y parcialmente dentro del territorio estatal, de los cuales 5 de ellos se consideran sobreexplotados (Valle de Toluca, Ixtlahuaca-Atlacomulco, Chalco-Amecameca, Texcoco y Cuautitlán-Pachuca) (CONAGUA, 2012) por lo que es necesario establecer medidas de protección de estas fuentes de agua subterránea.

---

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

### 2.1. Importancia de la gestión del agua subterránea y de los manantiales

El agua subterránea es vital para muchas naciones; se estima que entre 1,500 y 3,000 millones de personas en el mundo se abastecen de los recursos hídricos subterráneos, y el 40% del consumo industrial y el 20% de los regadíos dependen de ellos (UNESCO, 2009).

En el caso mexicano, alrededor del 38% del consumo de agua procede de fuentes subterráneas, donde más de 75 millones de mexicanos se abastecen de ella (CONAGUA, 2016). En aproximadamente tres cuartas partes del territorio de naturaleza árida o semiárida, el agua del subsuelo constituye una de las alternativas más viable y económica para ser la base del desarrollo de la población (CONAGUA, 2007); sin embargo, la sobreexplotación y la contaminación de agua subterránea están provocando una serie de impactos ambientales de muy diversa índole.

El agua subterránea tiene dinámicas que no responden a los límites planteados por CONAGUA para los acuíferos, pues tiene una hidrodinámica que responde a flujos locales que nutren manantiales temporales, flujos intermedios que nutren acuíferos superficiales y flujos regionales vinculados con acuíferos profundos. El interrumpir estas dinámicas provoca el agotamiento de los acuíferos ocasionando conflictos sociales y una distorsión en el crecimiento de las regiones económicas más dinámicas de México, debido también a la falta de regulación y monitoreo en las concesiones otorgadas y volúmenes extraídos de agua subterránea (Agua para todos, 2014).

Desde el punto de vista de la protección del agua subterránea, ha prevalecido la idea errónea de que los acuíferos se encuentran protegidos de manera natural de las diversas fuentes de contaminación; sin embargo, se ha registrado la presencia de contaminantes sobre todo de origen industrial, urbano y agrícola.

En México la calidad del agua es protegida y regulada por medio de Normas Oficiales Mexicanas y otras disposiciones normativas; pero, a pesar de estos ordenamientos, hay un amplio campo a desarrollar en materia de determinación, tratamiento, normativa y remediación de contaminantes (Arreguín, 2011).

Respecto a los trabajos realizados sobre el tema de los manantiales, hasta hace poco eran relativamente raros los estudios cuando el concepto de sostenibilidad de los recursos de agua se dio a conocer en todo el mundo, y se abordó este tema debido a que los manantiales son un reflejo directo del estado de las aguas subterráneas en los acuíferos que los alimentan y que influyen directamente en los arroyos y otros cuerpos de agua superficial en el que se descargan, incluidos todos los ecosistemas dependientes (Kresic, 2010a), puesto que los manantiales siempre ocurren en la interfase entre las aguas subterráneas, las aguas superficiales y los ecosistemas terrestres, es decir, constituyen un ecotono único de tres ecosistemas, considerados como puntos de alta diversidad biológica (Barquín, 2005).<sup>4</sup>

Por otra parte, el avance tecnológico y la perforación de pozos con la invención de las bombas sumergidas se han convertido en herramientas de gran eficacia para la explotación del agua subterránea. Los pozos, cada vez más profundos suelen atravesar e interconectar varios niveles acuíferos, donde los más profundos pueden aflorar a grandes distancias, además de contener aguas sometidas a grandes presiones (artesianas), que terminan por deprimir a largo plazo los niveles de agua, secando las surgencias de sectores alejados al lugar de las captaciones (Castillo, 2008a).

El aumento continuado de las extracciones de agua subterránea para satisfacer usos crecientes, es una de las causas del agotamiento de los manantiales; no obstante, otra causante se puede deber también al régimen climático, manifestado en precipitaciones que cada vez son menores y temperaturas que son cada vez más altas en ciertas regiones, debido a que los manantiales por

---

<sup>4</sup> Los ecotonos poseen atributos fisicoquímicos, propiedades bióticas y flujos de energía y materia específicos. La estabilidad del caudal y de las condiciones fisicoquímicas del agua de la mayoría de los manantiales les confiere, junto con la condición de ecotono, características distintivas que definen el tipo de flora y fauna que habita en estos ecosistemas (Barquín, 2005).

su propia condición, sufren oscilaciones naturales en su caudal, y por ende pueden llegar a su agotamiento tras períodos más o menos largos sin precipitaciones (Castillo, 2008a).

Aunado a esto, los diferentes focos de contaminación contribuyen de igual manera al agotamiento del recurso, no refiriéndose estrictamente a la cantidad, sino al deterioro de la calidad del mismo, puesto que los manantiales han cumplido también funciones tales como: el abastecimiento a núcleos de población; lugar de recreo, ocio y esparcimiento en su entorno; y origen de agua embotellada de calidad o uso con fines terapéuticos (Morell, 2008).

Esto proporciona una idea de la importancia que tiene el agua subterránea como reserva para la población y como elemento fundamental en el equilibrio de la naturaleza, dejando clara la necesidad de favorecer su uso racional, preservarla y salvaguardarla cuantitativa y cualitativamente, para brindar un estilo de vida digno a generaciones futuras mediante un manejo sustentable y con la participación de los habitantes.

Los manantiales son surgencia de los embalses subterráneos, por lo que constituyen indicadores ideales de su salud ambiental. Basta comprobar el estado de conservación de manantiales y fuentes de una región para tener una rápida noción de la situación general de sus acuíferos y aguas subterráneas y, por tanto, del grado de sostenibilidad del modelo de explotación y uso aplicado en cada territorio (Castillo, 2008b).

A lo largo de las últimas décadas se ha producido un descenso de la precipitación y un aumento del aprovechamiento de las aguas subterráneas, que ha tenido como contrapartida la paulatina desecación de numerosos manantiales. Este proceso de deshidratación de la tierra no sólo supone la degradación y pérdida de recursos hídricos vitales para la conservación de la naturaleza, sino que cuestiona la viabilidad del modelo de desarrollo socioeconómico y, también, la desaparición de un rico patrimonio cultural (Castillo, 2008b).

En este sentido, la gestión de manantiales incluye muchos de los mismos principios que guían la gestión tanto de los recursos hídricos superficiales como de los subterráneos. La gestión del manantial debe centrarse en la protección de la calidad y cantidad de aguas subterráneas en su área de drenaje para el uso específico del manantial (Kresic, 2010a).

Cuando se utiliza el agua de manantial para el abastecimiento de cualquier tipo, los requisitos de gestión adicionales incluyen: a) asegurar la entrega en cuantía de agua a todos los usuarios, incluidos los caudales ecológicos, utilizando diversos medios de ingeniería; b) asegurar una adecuada calidad de agua, incluyendo el tratamiento de agua potable y; c) establecer zonas de protección del manantial como es requerido por las regulaciones de algunos países (Kresic, 2010a).

En este marco, es necesario destacar que los manantiales tienen una importancia significativa para el suministro de agua de numerosas comunidades del Estado de México (área de estudio de esta investigación), por lo que es necesario una adecuada gestión para la protección del recurso, ya que en el REPDA están registrados 3,006 manantiales concesionados, mientras la Secretaría de Medio Ambiente ha contabilizado 10,554 (SMA, 2014).

Como parte de las acciones para salvaguardar el recurso hídrico subterráneo en el Estado de México se han llevado a cabo algunos proyectos en diversas comunidades. En el municipio de Malinalco (microcuenca del río San Miguel) se inventariaron manantiales con el objetivo de contribuir a su saneamiento, protección y preservación, y en los cuales hubo tanto beneficiarios directos como indirectos (Escuela del Agua, 2015).

Otro proyecto “Cosecha de lluvia y protección y recarga de manantiales 2010-2011”, fue ejecutado en el municipio de San Felipe del Progreso, en donde uno de los objetivos fue contribuir a resolver la falta de acceso al agua de varias familias, así como incitar una mayor recarga de las fuentes de agua, reforzando la interrelación entre factores de biodiversidad propicios a la conservación de suelos y aguas, y apoyar el proceso de empleo temporal de campesinos marginados (Red Campo, 2015).

Pese a estas acciones, hay otros manantiales que requieren de una gestión adecuada para su protección y uso sustentable debido a que son la principal fuente de abastecimiento; sin embargo, aún es una tarea pendiente crear estrategias para la protección de manantiales.

En general, la protección de fuentes de agua se caracteriza como un conjunto de prácticas que se aplican con el objetivo de mejorar las condiciones de producción de agua, en cantidad y



calidad, reducir o eliminar las posibilidades de contaminación y optimizar las condiciones de uso y manejo.

En la literatura, las estrategias para la protección de los manantiales incluyen generalmente los temas de la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación y los impactos de la explotación excesiva en los acuíferos; no obstante, es importante resaltar que las estrategias no sólo se limitan a este rubro, y pueden ser también de carácter social o legal.

Para poder proponer tales estrategias de protección, se tienen que conocer las características de los manantiales y tener una clasificación de estos.

## **2.2. Clasificación y tipología de los manantiales**

En la literatura existen varias definiciones para manantiales, para Morell (2008) la manera más sencilla de definir un manantial es como una surgencia natural de agua subterránea; sin embargo, se deja a un lado el por qué el agua aflora suave y mansamente o de manera abrupta; o por qué el agua es fría o caliente, si es dulce o salada, o si es una surgencia efímera o permanente; tampoco describe el origen del agua, su edad, el camino que ha recorrido y los cambios que ha sufrido en su trayecto, considerando que hay diferencias entre los manantiales. Por tal razón, se deben explicar las características que tienen estas fuentes de agua subterránea.

En este sentido, la descarga o surgencia de un manantial se debe generalmente a la diferencia entre la elevación de la carga hidráulica en el acuífero y la elevación de la superficie del suelo donde se lleva a cabo dicha descarga (Kreye et al., 1996; Kresic, 2010a); y pueden originarse en medios de origen karsticos, detriticos, volcánicos, metamórfico, o en medios porosos o fracturados (Figura 2.1).

En su mayoría, el agua fluye a través de una formación de estratos permeables, pero cuando el agua subterránea entra en contacto con estratos impermeables, éstos bloquean el flujo del agua y permiten que el agua aflore a la superficie (OPS, 2004).

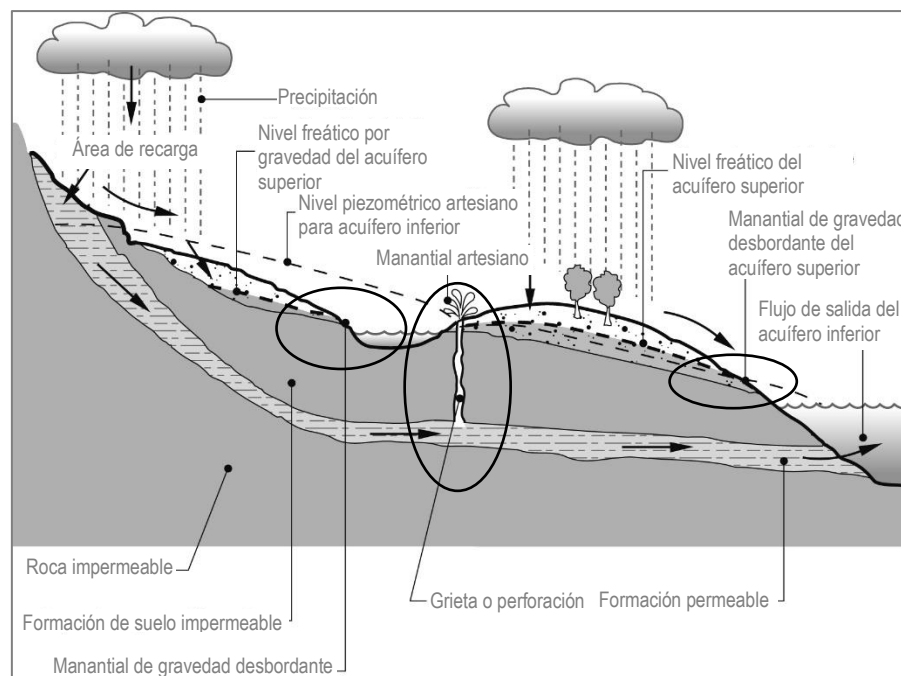


Figura 2.1. Esquema sobre el origen de los manantiales (Tayong, 2005).

Los manantiales que brotan en rocas consolidadas por lo general tienen un punto de surgencia bien definido, en oposición a los manantiales en sedimentos no consolidados donde suelen existir surgencias de carácter difuso, aunque estas últimas también pueden tener un punto de salida claramente visible. A veces, el punto de surgencia puede estar en el fondo de un cuerpo de aguas profundas y no es fácilmente visible, o puede ser cubierta por sedimentos y restos de rocas (Kresic, 2010b).

Algunos manantiales se designan en singular y otros en plural; la idea que subyace a este uso es que, si el agua emana a partir de una sola abertura o varias aberturas muy próximas, se forma un manantial, mientras que, si este emana a partir de una serie de aberturas que están más separadas, se forman manantiales. Sin embargo, la terminología local es tan variable al respecto que no existe una distinción consistente entre un manantial y manantiales, y muchas veces no hay uniformidad en el uso de términos, incluso para el mismo grupo de aberturas (Kresic, 2010b).

El término manantial es empleado para hacer referencia a una fuente de agua; no obstante, el primero se reduce exclusivamente a las surgencias naturales y el segundo puede referirse también a las captaciones subterráneas (Gil, 2015). Los manantiales varían enormemente en su

morfología y caudal, dependiendo en gran medida de las características hidrogeológicas del acuífero parental. Así, pueden consistir en pequeñas filtraciones en las llanuras aluviales de grandes ríos, o en grandes oquedades que pueden llegar a rendir más de 50 m<sup>3</sup>/s (p.ej., surgencia de Dumanli, Turquía) (Barquín, 2005).

Además de servir como fuentes de agua para la población, dada la estabilidad de caudales de muchos manantiales y su posición entre distintos ecosistemas, se les ha considerado (con excepciones) como puntos de alta diversidad biológica. Además, los manantiales que presentan una mayor continuidad en su caudal suelen contener un importante número de especies endémicas.

Reconocer la diferencia entre los tipos de manantiales, considerando el entorno geológico en el que sobreyacen, además de sus características hidrogeológicas, geomorfológicas y pluviométricas, harán dar cuenta de sus posibles patrones de comportamiento y sus variaciones, por lo que es necesario hacer una clasificación de ellos. Varios autores (Kreye et al., 1996; OPS, 2004; Gil, 2015; Kresic, 2010b) hicieron una serie de clasificaciones considerando criterios distintos de acuerdo a las características del manantial.

En la literatura revisada por Kreye et al. (1996) las clasificaciones de manantiales se basan por lo general en cualquiera de las características físicas o parámetros de ocurrencia, tales como:

- a) Geología.
- b) Magnitud, variación, y permanencia del caudal.
- c) Calidad y la mineralización del agua.
- d) Temperatura del agua.

La Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2004) propone una clasificación considerando los siguientes criterios:

- a) Ubicación del manantial.
- b) Tipo de surgencia.

Gil (2015) considera los siguientes criterios para clasificar a los manantiales:

- a) Tipo de materiales geológicos que constituyen el acuífero.
- b) Geomorfología del terreno.
- c) Régimen del caudal o la composición química.
- d) Temperatura del agua.

Una de las referencias más completas es la clasificación realizada por Kresic (2010b), autor que considera como criterios más comunes de clasificación:

- a) Naturaleza de la carga hidráulica que origina la descarga.
- b) Tipo de descarga y constancia en el caudal de descarga.
- c) Geomorfología y estructura geológica que controla la descarga.
- d) Calidad del agua y su temperatura.

Considerando las clasificaciones propuestas, para la presente investigación se tomará en cuenta la referencia más reciente (Kresic, 2010b), ya que el autor agrupa a los manantiales considerando criterios similares a los autores anteriores.

Para el primer criterio, *naturaleza de la carga hidráulica*, Kresic (2010b) menciona que aunque todos los manantiales (excepto algunos asociados con vulcanismo joven y actividad hidrotermal donde la descarga es impulsada por los gases y los gradientes de temperatura) descargan finalmente en la superficie de la tierra a causa de la fuerza de gravedad por lo general, se dividen en *dos grandes grupos* en función de la naturaleza de la carga hidráulica en el acuífero subyacente del punto de descarga (y son los que a su vez se pueden subdividir en otros tipos de manantiales), los cuales son:

- a) Manantiales de gravedad: surgen en condiciones no confinadas donde el nivel piezométrico intercepta la superficie terrestre; también son denominados manantiales descendentes o de ladera.
- b) Manantiales artesianos: descargan bajo presión debido a las condiciones confinadas en el acuífero subyacente; también son llamados manantiales ascendentes o en aumento (crecientes) o de fondo.

Desde el punto de vista del *tipo de descarga y constancia de su caudal*, son de varios tipos:

- a) Manantial de filtración: indica la descarga difusa de agua, por lo general a partir de sedimentos no consolidados, como arena o grava.
- b) Manantial de fractura: se refiere a la descarga concentrada de agua en los planos de estratificación, fisuras, fallas y otras rupturas de la roca consolidada.
- c) Manantial tabular: a veces se usa para describir el flujo en aberturas relativamente grandes en las rocas; estos manantiales son característicos de terrenos kársticos.
- d) Manantial permanente: son aquellos con salida de agua permanente, aunque con caudal variable. Se han utilizado como fuentes de suministro de agua en todo el mundo a lo largo de la historia.
- e) Manantial intermitente: descarga sólo por un período de tiempo, mientras que en el resto del tiempo está seco, lo que refleja directamente el patrón de la recarga de acuíferos.
- f) Manantial de flujo y reflujos, o manantiales periódicos: se encuentran generalmente en acuíferos de calizas. Su descarga se produce en intervalos de tiempo (periodos) relativamente uniformes y se explica por la existencia de un sifón en la estructura del acuífero.

Desde el punto de vista de la *geomorfología y estructura geológica* (tipo de roca y características tectónicas, tales como pliegues y fallas) que juegan un papel clave en la aparición de estas fuentes, Kresic (2010b) los clasifica en:

- a) Manantial de contacto descendente: es cuando el contacto entre las rocas que contienen agua y los materiales impermeables subyacen al manantial en la dirección del flujo de agua subterránea, y el acuífero se localiza por encima de este contacto impermeable.
- b) Manantial de contacto desbordante: es cuando el contacto con los materiales impermeables está localizado lejos del manantial, en una dirección opuesta al flujo de agua subterránea.
- c) Manantial de depresión: se forma en los acuíferos no confinados cuando la topografía corta el nivel del agua subterránea, por lo general debido a la incisión de una corriente superficial.
- d) Manantial de barrera: se refiere a cualquier contacto lateral entre el acuífero y un material de baja permeabilidad. Tal contacto puede tener diversa geometría, causada por procesos

de sedimentación y movimientos tectónicos, que forman gran variedad de fallas y pliegues.

Finalmente, basándose en el último criterio, de la *calidad del agua y la temperatura*, los manantiales se diferencian en:

- a) Manantiales de aguas termales: Si el agua aflora a una temperatura 4°C superior a la media ambiente de la zona (Morell, 2008). Se dividen en manantiales calientes (warm springs) y manantiales termales (hot springs) en función de su temperatura relacionada a la temperatura del cuerpo humano de 37 °C; los primeros tienen una temperatura más baja en comparación con los segundos (Kresic, 2010b).
- b) Manantiales de aguas frías (cold springs): tienen una temperatura menor a los manantiales termales.

Otra de las clasificaciones de manantiales es la utilizada por los limnólogos, la cual es propuesta por Steinman (1915) citada en Barquín (2005). Esta tipología se basa en los *patrones de flujo del agua*:

- a) Manantiales limnocrenos: el punto de descarga de la surgencia se encuentra en la base de un lago o poza.
- b) Manantiales reocrenos: la surgencia forma inmediatamente un río en cuanto el agua sale a la superficie.
- c) Manantiales helocrenos: la surgencia del agua se produce de una manera difusa, llegándose a formar un humedal que luego puede dar origen a un arroyo o río.

De acuerdo con estas clasificaciones y tipologías, se revisaron y se adoptaron las más convenientes de acuerdo a las características de los manantiales seleccionados en el Estado de México. De este modo, se implementaron las estrategias necesarias para la protección de manantiales.

### **2.3. Protección de las fuentes de agua subterránea y manantiales**

Como una función vital de los recursos hídricos para los seres humanos, el suministro de agua se ha convertido en una tarea complicada. Los recursos hídricos subterráneos enfrentan un serio

problema en cuanto a su calidad y su cantidad, por lo que es necesario profundizar en su protección.

Hay dos enfoques generales para la protección del agua subterránea: la protección de los recursos y la protección de las fuentes. El término recurso se utiliza a menudo para describir un cuerpo de agua subterránea, mientras que una fuente puede ser un manantial aprovechado, un pozo de bombeo, u otro tipo de punto de extracción de agua subterránea; sin embargo, los conceptos de protección del recurso y de las fuentes están inseparablemente conectados, ya que es imposible proteger una fuente en particular, sin proteger el recurso en general (Goldscheider, 2010).

La protección de los acuíferos y fuentes se logra mediante la prevención de la posible contaminación, remediación de agua subterránea ya contaminada, y la detección y prevención de la extracción insostenible. El aspecto de la prevención incluye programas de prevención de la contaminación y las medidas de control en fuentes potenciales de contaminación, el control del uso del suelo y la educación pública (Kresic, 2010b).

Uno de los métodos de protección es la identificación de áreas prioritarias que permite orientar y optimizar los esfuerzos de conservación en los recursos naturales; para ello existen diferentes metodologías de tipo cualitativo y cuantitativo. En este trabajo se revisaron y analizaron los métodos utilizados para la identificación de áreas prioritarias para protección y conservación para de este modo proponer una definición de las mismas y establecer un esquema metodológico general que oriente la realización de estudios futuros en este tema.

En la literatura disponible sobre la protección de fuentes de agua subterránea, se hace referencia principalmente de los perímetros de protección para pozos (Pacheco et al., 2004; Sabon, 2005; IGME; 2009a; 2009b; CONAGUA, 2007; Expósito et al., 2007; Gárfias et al., 2008); mientras que, para manantiales, son pocos los trabajos que abordan este tema. Además, las metodologías empleadas son en su mayoría para la protección de la calidad del agua y poco se menciona sobre la protección de la cantidad del recurso (Martínez, 2002; Civita, 2008).

De las investigaciones a nivel internacional que aborda el tema de las zonas de protección de manantiales, en donde se delimitan aquellas áreas en las que hay necesidad de proteger se puede

citar Elhatip & Afşin (2001), Qian et al. (2006), Pochon et al. (2008), Civita (2008), Silva et al. (2010), Marín & Andreo (2010), Galleani et al. (2011), Biava et al. (2014), Banzato et al. (2015).

La delimitación de perímetros de protección de pozos puede estar dirigida a las captaciones de agua para el abastecimiento de algunas poblaciones o de zonas con cierta importancia ambiental. Se diferencian principalmente tres zonas, si bien con denominaciones distintas en cada país: zona inmediata o de restricciones absolutas, zona próxima o de restricciones máximas, zona alejada o de restricciones moderadas; en algunos casos también consideran una zona de protección de la cantidad del agua.

En lo que se refiere a manantiales, estos presentan problemas especiales en la delimitación del área de protección ya que la extracción está gobernada por el flujo natural del agua subterránea. Así, el tamaño del área de captura depende del caudal total del manantial en lugar de la proporción de flujo que se extrae realmente (Foster et al., 2002).

El área de captura se define como el área geográfica donde se infiltra agua que se dirige hacia el punto de descarga o manantial. A partir de esta zona de captura es posible definir un área de protección (Vargas, 2002).

En este sentido, se debe tomar en cuenta que la delimitación de zonas o perímetros de protección de manantiales se puede realizar utilizando los métodos aplicados para pozos, cuando por ejemplo se trata de manantiales artesianos (también llamados ascendentes o de fondo). En el caso de los manantiales de gravedad (también llamados descendentes o de ladera) no son directamente aplicables, pues en estos manantiales no se contempla el sector aguas abajo porque no se genera un cono de abatimiento.

Para poder determinar la protección de los manantiales hay una serie de cuestionamientos. La primera pregunta para la protección de la fuente es ¿dónde está el área de captura del manantial? A veces, las áreas de captura son denominadas también áreas de drenaje, áreas de recarga o cuencas hidrográficas; sin embargo, no siempre es correcto hablar indistintamente de estos términos, ya que el comportamiento del agua subterránea no siempre refleja el comportamiento del agua superficial. La cuenca hidrográfica (cuenca superficial) no necesariamente coincide con la cuenca hidrológica (también llamada hidrogeológica), mientras que la primera incluye la



caracterización superficial en función de los parteaguas, la segunda incluye la estructura hidrogeológica del acuífero.

La cuenca vertiente o cuenca hidrográfica es una zona del relieve en la que las aguas superficiales circulan y se reúnen hacia un lugar común (río, lago, etc.); está determinada por la geomorfología, es decir, por las divisorias de aguas vertientes. Por otro lado, la cuenca hidrogeológica es la unidad estructural que almacena un acuífero, por consiguiente, de ella dependerá la circulación subterránea y las reservas (Gil, 2015).

Por esta razón, la cuenca hidrogeológica e hidrográfica de una región determinada no tiene que presentar necesariamente los mismos límites. Las cuencas hidrológicas subterráneas, salvo casos excepcionales, no coinciden con las cuencas hidrológicas superficiales, ya que de una manera general los accidentes topográficos no reflejan siempre la estructura del subsuelo, ni la disposición de los estratos permeables e impermeables o los accidentes tectónicos ocultos.

La circulación del agua subterránea en el interior de una cuenca hidrogeológica queda delimitada por la presencia de las rocas impermeables que constituyen el substrato regional y por los accidentes geológicos: fallas y estratificación, que condicionan la disposición y la profundidad del basamento impermeable (Gil, 2015).

De este modo, las zonas de captación para los manantiales serán aquellas áreas que obedecen el sentido de la dirección del flujo en general del agua subterránea que llega a los manantiales, no de las superficiales.

La segunda pregunta es ¿con qué facilidad pueden los contaminantes entrar en el acuífero y ser transportados al manantial? Esta cuestión conduce a otro concepto importante: la vulnerabilidad del agua subterránea frente a la contaminación, la cual puede definirse como la facilidad con que los contaminantes podrían entrar al agua subterránea. Los términos vulnerabilidad a la contaminación y protección natural contra la contaminación se pueden utilizar alternativamente. Alta vulnerabilidad significa baja protección natural y viceversa. Dos tipos principales de vulnerabilidad de las aguas subterráneas se pueden distinguir: vulnerabilidad intrínseca y vulnerabilidad específica.

Vulnerabilidad intrínseca depende únicamente de las propiedades geológicas e hidrogeológicas de un área y es independiente del tipo de contaminante. La vulnerabilidad específica considera adicionalmente las propiedades de un contaminante o grupo de contaminantes específicos y su interacción con el entorno geológico. Los mapas de vulnerabilidad pueden utilizarse como base para la delimitación de las zonas de protección de los recursos de aguas subterráneas y de fuentes. Los mapas de vulnerabilidad no son documentos autónomos, pero pueden combinarse con otros tipos de información, dependiendo del propósito.

Un mapa de peligro muestra la ubicación y el tipo de actividades efectivas o potencialmente contaminantes, como la agricultura, la industria y los sitios de eliminación de desechos. Un mapa de peligro combina la información de un mapa de vulnerabilidad y un mapa de amenazas y permite identificar zonas en las que el agua subterránea es susceptible a contaminarse. Por consiguiente, un mapa de peligro demuestra la necesidad de actuar, idealmente eliminando los peligros existentes y cambiando las prácticas de uso del suelo u otras formas mediante la implementación de sistemas de alerta temprana.

Otro elemento de los esquemas adecuados de protección de las aguas subterráneas es la evaluación de la importancia de las aguas subterráneas o de manantial para su uso como agua potable, para los ecosistemas conexos de aguas superficiales o para otros fines. Un manantial que es una fuente de agua potable para una población grande siempre será clasificado como muy importante, y la protección debe ser dada una alta prioridad. Un gran número de legislaciones y acuerdos nacionales e internacionales se ocupan de la delimitación de las zonas de protección de recursos.

Para definir una protección a estas fuentes de agua subterránea, se han propuesto e implementado distintos métodos y técnicas que se detallan en el siguiente apartado.

#### **2.4. Métodos y técnicas para la protección de manantiales**

La definición de zonas de protección de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea tanto en calidad como en cantidad se puede realizar utilizando una gran variedad de métodos que comprenden desde los más simples hasta los más elaborados. Entre los métodos generales más usados se encuentran: radio arbitrario fijo/calculado, formas variables simplificadas, modelos

hidrogeológicos analíticos, mapeo hidrogeológico, y modelos numéricos de flujo de agua subterránea (CONAGUA, 2007).

En lo particular, se pueden citar los siguientes métodos: método de Albinet, modelos matemáticos, método de Rehse (cálculo del poder autodepurador del terreno), trazadores, estudios isotópicos, método de Hoffman y Lillich, empleo de ábacos para el cálculo de isócronas, métodos Jacobs y Bear y el método de Wyssling (López et al., 1996; Elhatip & Afşin, 2001; Vargas, 2002; Foster et al., 2002; Qian et al., 2006; He et al., 2010; Silva et al., 2010).

Estos métodos son usados comúnmente para delinear las zonas de protección de los pozos de abastecimiento de agua, particularmente mediante perímetros; sin embargo, como menciona Civita (2008), algunos de estos métodos no son directamente aplicables a todos los tipos de manantiales.

Pese a esta situación, hay trabajos que emplean métodos y técnicas específicas para definir zonas y perímetros de protección de manantiales, los cuales son: método hidrogeológico, pruebas de trazadores, monitoreo hidrológico, así como análisis químico y microbiológico, análisis de curvas de recesión, método VESPA, método de radio fijo, método radio calculado, método DISCO, método matemático analítico, modelos matemáticos tridimensionales con elementos finitos, método estocástico, EPIK, COP+K y mecanismo de compensación ecológica (Elhatip & Afşin, 2001; Qian et al., 2006; Pochon et al., 2008; Civita, 2008; Silva et al., 2010; Marín & Andreo, 2010; Galleani et al., 2011; Biava et al., 2014; Banzato et al., 2015).

Estos métodos son aplicados a diferentes tipos de manantiales considerando sus características geológicas e hidrogeológicas particulares, diferenciando así, manantiales que se ubican en medios kársticos (mayormente aplicados), volcánicos, detríticos, fracturados, porosos, confinados y libres.

Para manantiales en medios kársticos, en Italia se presentan algunos ejemplos. En los Alpes, se mejoró un método estándar para delinear zonas de protección en manantiales kársticos. El método, basado en el análisis de curvas de recesión, definió cuatro escenarios de vulnerabilidad para determinar las dimensiones apropiadas de las zonas de protección (Civita, 2008). En esta misma región se utilizó un índice para estimar la vulnerabilidad, el índice VESPA (estimador

de vulnerabilidad para las áreas de protección de manantiales), basado en un análisis de la descarga, la temperatura y la conductividad eléctrica (Galleani et al., 2011)

En un acuífero kárstico fracturado (Italia), se delimitaron zonas de protección mediante la aplicación del método estocástico en combinación con el método EPIK (mapa de vulnerabilidad). Los resultados muestran la vulnerabilidad local del agua subterránea a la contaminación, con zonas de protección que engloban tanto a manantiales como a pozos (Biava et al., 2014).

En China, en un acuífero kárstico fracturado, se emplearon modelos matemáticos tridimensionales con elementos finitos (método numérico) para simular el cambio del nivel del agua subterránea debido a su extracción excesiva, lo que permitió definir la necesidad de disminuir el bombeo para mantener los caudales en los manantiales (Qian et al., 2006).

Otro método utilizado para medios kársticos, ha sido el mecanismo de compensación ecológica aplicado en China. En la zona de estudio se comprobó que se había generado un abatimiento en el nivel de agua subterránea, agotamiento de manantiales, contaminación del agua, y daños en el entorno ecológico del agua, por lo que se empleó dicho método para determinar el costo y valor ecológico del entorno debido a los servicios ambientales ofrecidos. Se obtuvo el valor económico de la compensación del área de protección de las fuentes de agua con el fin de cumplir con una situación de ganar-ganar entre protección de las fuentes de agua y el desarrollo económico (Shen et al., 2010).

Por otro lado, en Suiza se empleó una metodología basada en la vulnerabilidad para delimitar zonas de protección de los manantiales en acuífero fracturado (a pesar de que la delimitación de las zonas de protección de acuíferos fracturados es una tarea difícil debido a la heterogeneidad y la anisotropía de la conductividad hidráulica). El estudio considera la diversidad de las condiciones hidrogeológicas y permite seleccionar uno de los tres métodos para la delimitación de zonas de protección de manantiales: método de la distancia (radio fijo), método isócrono (radio calculado) y el método DISCO (cartografía de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas) (Pochon et al., 2008).

Para manantiales de acuíferos confinados y libres, en Costa Rica se utilizó el método matemático analítico para definir las zonas de protección de manantiales en este tipo de acuíferos localizados en áreas urbanas. El método considera la diferenciación de los manantiales según su entorno geológico (manantial en depresión, manantial de contacto y manantial en abanico aluvial) (Vargas, 2002).

En el caso de los manantiales en áreas volcánicas existen menos ejemplos. En Turquía por medio de métodos hidrogeoquímicos (hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos) se estimaron las zonas de protección de manantiales. A pesar de que los análisis hidroquímicos mostraron que las aguas de estos manantiales cumplen con los estándares de agua potable y de riego, el área alrededor de los manantiales continuamente está siendo contaminado por desechos domésticos y agrícolas. Por lo tanto, se propusieron tres zonas de protección principales frente a los efectos de la contaminación antrópica (Elhatip & Afşin, 2001).

Existen otros trabajos que han estudiado tanto la calidad como la cantidad de los manantiales, pero no proponen un método de protección de dichas fuentes de agua. Para el caso mexicano, en la literatura se han encontrado pocos casos enfocados a los métodos para definir zonas de protección de manantiales. En Michoacán se determinaron los niveles de vulnerabilidad acuífera en el Valle de Los Reyes, un acuífero libre de tipo volcánico, utilizando el método SINTACS para la protección del acuífero y manantiales amenazados por actividades antrópicas, en donde como conclusión se propuso la ampliación de la zona de amortiguamiento del área natural protegida Chorros del Varal, una superficie que rodea y protege la zona núcleo para evitar impactos ambientales (Silva et al., 2010).

Por otro lado, el estudio de González (2006) tuvo como objetivo realizar un inventario y analizar el comportamiento hidráulico y calidad del agua de los manantiales disponibles en la microcuenca Atécuaro, Morelia, Michoacán, donde se localizaron 14 manantiales (de contacto en medio volcánico) a los que se les determinó el gasto mensual durante un año y se estimó el índice de calidad del agua (ICA). Los resultados mostraron que sólo 5 de ellos mantienen su gasto hidráulico estable hasta la época de estiaje, en tanto que en 9 el escurrimiento depende total o parcialmente de la época de lluvias.

En el estudio de García et al. (2012) se muestrearon seis manantiales ubicados dentro de la zona urbana de Tijuana, con el propósito de evaluar la calidad del agua de manantiales y afloramientos urbanos. Las muestras se analizaron para parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los resultados mostraron que el agua de los manantiales con potencial para ser aprovechados no es apta para el consumo humano sin un tratamiento previo y sugieren medidas de protección.

En el Estado de México, se llevó a cabo un estudio, que aunque si bien no se llevó a la práctica, tuvo como objetivo evaluar el peligro de contaminación de los manantiales del municipio de Almoloya de Juárez. La evaluación del peligro de contaminación se realizó considerando dos aspectos fundamentales: la definición de las zonas de captura de los manantiales con base en criterios hidrodinámicos e hidrogeológicos y el inventario de los focos de contaminación presentes en las zonas de captura. Con base en ello se obtuvieron mapas que muestran las dimensiones de la zona de captura y el tipo de foco de contaminación que en ellos se localizan, así como la ubicación de los focos de contaminación que representan un mayor peligro de contaminación a los manantiales (Esquivel, 2008).

Varias son las técnicas y metodologías implementadas para la protección de manantiales en la literatura citada; sin embargo, distintos autores coinciden en que para ello se necesitan delimitar áreas con distinto grado de protección, las cuales varían de acuerdo a las políticas implementadas en cada país.

## **2.5. Delimitación de zonas de protección de manantiales**

Debido a que el concepto de zonas de protección de manantiales no se ha aplicado en nuestro país, se puede adecuar la definición de protección de pozos que proporciona la United States Environmental Protection Agency (USEPA).

De acuerdo con la USEPA una *zona de protección de pozos* consiste en “la superficie y subsuelo que encierra o rodea a un pozo o campo de pozos que proveen agua para abastecimiento poblacional, de tal modo que, en dicha región, en caso de que se presente un contaminante, es más factible que se mueva y alcance el agua que extrae dicho pozo o campo de pozos.” El cálculo de la zona de protección de un pozo considera un volumen de extracción. En condiciones

ideales, dicho caudal debe corresponder al máximo autorizado al Organismo Operador correspondiente para dicho aprovechamiento (CONAGUA, 2007). En este sentido, es imposible proteger una fuente particular sin proteger el recurso.

Tomando en consideración esta definición, se puede definir *zona de protección de un manantial* como aquella superficie del terreno y subsuelo que se encuentra aguas arriba del manantial (en el caso de manantiales de gravedad). Esta zona de protección podrá ser calculada considerando el volumen del caudal de la fuente, cuya finalidad es proteger la calidad y cantidad del agua subterránea que se destina para el uso de la población, además de contribuir al equilibrio ambiental.

La determinación de zonas de protección se referirá a todo el proceso de especificación de una región aledaña al aprovechamiento, con el propósito de limitar al máximo un posible evento que conduzca a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos y a su agotamiento.

Para llevar a cabo la delimitación de las zonas de protección de manantiales, primero se debe llevar a cabo la delimitación de la *zona de captura potencial* también conocida como zona de contribución, que consiste en el área que potencialmente puede contribuir al volumen del caudal del manantial a largo plazo. Dentro de la zona de captura potencial se han de estimar y definir las zonas de protección de manantiales (zonas con distinto grado de protección).

La delimitación de las zonas de captura potencial puede basarse en diversos parámetros dependiendo de la amenaza de contaminación percibida que involucra: distancia horizontal, tiempo de flujo horizontal, proporción del área de recarga, dilución de contaminantes en la zona saturada o la capacidad de atenuación. No obstante, es común emplear una combinación del tiempo de tránsito en sentido vertical en la zona no saturada y cuasi horizontal en la saturada (Vargas, 2002).

Una vez delimitada la zona de captura potencial se pueden utilizar los métodos para la protección de manantiales que mejor se adapten a las características del manantial, su contexto físico y a la información disponible.

En la literatura existente se han definido desde tres hasta cinco zonas de protección de manantiales, según el país del que se trate.

Losilla (1992) propone una metodología que considera aspectos hidrogeomorfológicos, al definir el área de protección con base en las divisorias de la cuenca hidrológica donde se encuentra el manantial. Se asume que los límites de la cuenca hidrogeológica coinciden con los límites de la cuenca hidrológica, según la cual se sigue la curva de elevación topográfica más baja del manantial, a ambos lados del mismo, hasta cruzar un río importante, considerado como influente; a partir de esto se sigue por las divisorias de las subcuencas hasta unirse en su parte superior. Esta metodología está diseñada para delimitar zonas de recarga de manantiales que son originados desde acuíferos someros.

Otras de las técnicas para delimitar las zonas de protección se basan en la modelación de fuentes de agua; sin embargo, esta puede no ser el método más apropiado para la definición de zonas de protección por lo que se recomienda el uso de métodos manuales o formas de zona predeterminadas (Environment Agency, 2009).

Además, debe recordarse que el proceso de zonificación de protección de fuentes, al igual que el sistema de agua subterránea en el que opera, es dinámico. Las zonas de protección de pozos por ejemplo, no solo cambian con las condiciones del agua subterránea (como en acuíferos extensamente explotados), sino que también con nueva información que permite que un acuífero se represente con mayor precisión. Sin embargo, es difícil definir objetivamente cuándo se ha alcanzado este punto. Por lo general, se trata de una decisión subjetiva basada en la precisión percibida de una zona de captura hidráulica y los costos de una mayor recopilación / modelado de datos.

En el caso británico, la Agencia del Medio Ambiente (Environment Agency, 2009) ha definido tres zonas de protección para fuentes de abastecimiento de agua que se aplica tanto para pozos como para manantiales: a) zona de protección interna (ZP I), b) zona de protección externa (ZP II) y c) protección de la zona de captura potencial



### a) Zona de protección interna (ZP I)

La zona de protección interna se define por un tiempo de tránsito de 50 días desde cualquier punto por debajo de la capa freática hasta la fuente o un radio mínimo de 50 metros desde la fuente, el que sea mayor. Está ubicado inmediatamente adyacente al pozo. Está diseñado para proteger contra la transmisión de químicos tóxicos rápidamente degradantes y algunas enfermedades transmitidas por el agua. La política de protección de aguas subterráneas de la Agencia de Medio Ambiente establece los más estrictos controles sobre la actividad humana en esta zona (Figura 2.2).

Los límites del ZP I se ajustan cuando el acuífero está confinado debajo de un material de permeabilidad sustancialmente baja o cuando existen zonas insaturadas profundas. Esta es una medida de precaución para protegerse contra el caso donde las vías rápidas para el transporte de contaminantes están presentes, como las estructuras profundas. La zona de protección interna de 50 metros de radio se asume por defecto para cualquier fuente potable.

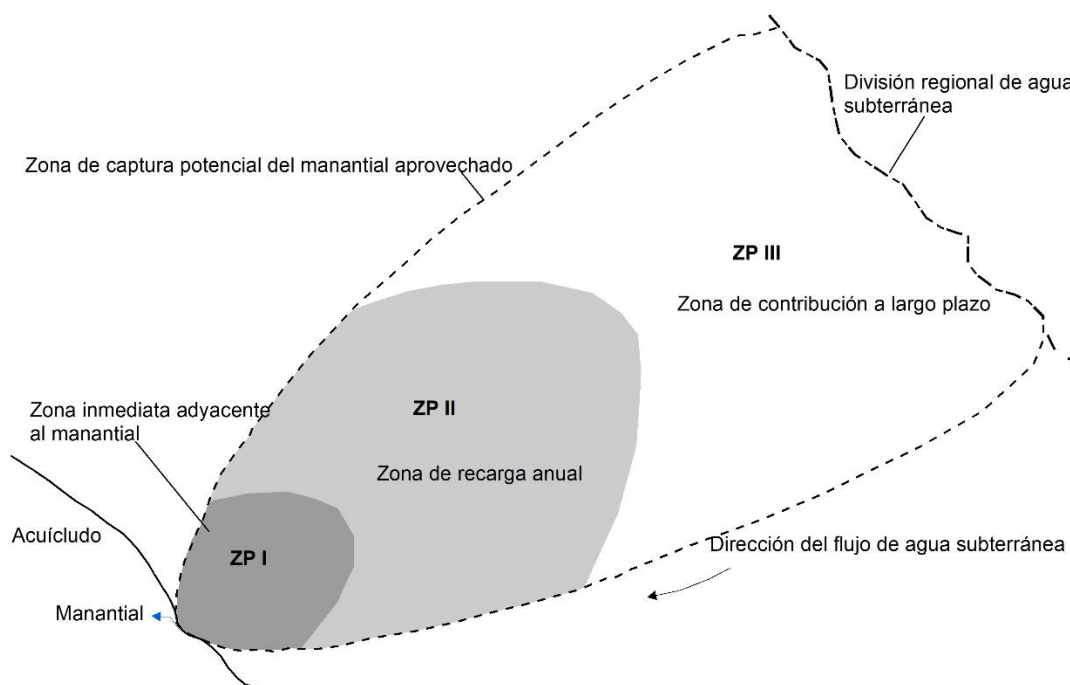


Figura 2.2. Esquema de las zonas de protección de manantiales. Elaboración propia.

**b) Zona de protección externa (ZP II)**

La zona de protección exterior se define como un tiempo de tránsito de 400 días y un radio mínimo de 250 m o 500 m alrededor de la fuente. El tiempo de 400 días se basa libremente en la consideración del tiempo mínimo requerido para proporcionar retardo, dilución y atenuación de los contaminantes que se degradan lentamente. La zona generalmente no está definida para acuíferos confinados.

**c) Protección de la zona de captura potencial (ZP III)**

La zona de captura potencial de la fuente de agua se define como el área necesaria para soportar el rendimiento protegido de la recarga de aguas subterráneas a largo plazo. En áreas donde el acuífero está confinado debajo de estratos impermeables, la fuente de captación puede ubicarse a cierta distancia de la abstracción real.

Una cuarta zona de protección (ZP IV) o zona de interés especial es opcional y se puede definir sólo para algunas fuentes. Generalmente representa una captación de agua superficial que desemboca en el acuífero que alimenta el suministro de agua subterránea (es decir, la captación que drena a una desaparición).

Esta metodología ha sido adaptada en la presente investigación de acuerdo con la información disponible y realizar modificaciones adicionales para definir las zonas de protección de manantiales.

La delimitación de zonas de protección de fuentes de agua debería ser un elemento clave en el marco de la política ambiental del país y también en otras partes del mundo, con el fin de controlar el riesgo en el suministro de aguas subterráneas en cantidad y calidad y de las actividades potencialmente contaminantes o emisiones accidentales de contaminantes.

Hay que tener en cuenta que establecer cuáles son las actividades antrópicas que requieren mayor atención ambiental es una de sus mayores dificultades, ya que implica contar con información de todas las actividades que se realizan dentro del área de estudio debido a la gran diversidad y densidad de actividades humanas además de los altos costos de las investigaciones

detalladas, por lo que es un trabajo muy complejo e impráctico sobre todo para áreas muy extensas (Alvarado, 2009).

Sin embargo, el uso del suelo es una variable importante, ya que al identificar un uso específico aguas arriba del manantial se puede elegir el tipo de protección a emplear.

La identificación de las diferencias del uso del suelo ayudará a definir las posibles fuentes de contaminación del agua subterránea (Barquín & Scarsbrook, 2008).

La delimitación de zonas de protección junto con otras estrategias pueden ser apoyadas mediante los SIG, ya que son ampliamente utilizados como una herramienta esencial para el análisis espacio temporal de la protección de fuentes de agua subterránea.

## **2.6. Los SIG como herramientas de apoyo en la protección de manantiales**

Los SIG se han convertido en una herramienta importante para el manejo y análisis de información cartográfica, ya que mediante su uso se integra información procedente de diferentes fuentes facilitando su correlación o vinculación; además, comprende una geo-base de datos (metadatos, información vectorial y raster) que propicia el mejor control y manejo de la información, así como la visualización de resultados.

En hidrología subterránea se han empleado este tipo de herramientas en investigaciones relacionadas con el agua subterránea tal como la vulnerabilidad de acuíferos (Esteller et al., 2012; Expósito et al., 2007; Velázquez et al., 2017), protección de la calidad del agua subterránea (Martínez, 2002; Pacheco et al., 2004; Gárfias et al., 2008; fao., 2012), sobreexplotación de acuíferos (Noyola et al., 2009; López, 2010; López et al., 2013), o redes de monitoreo de cantidad y calidad del agua subterránea (Esquivel, 2011), entre otras.

En el marco de protección de manantiales, se han utilizado los SIG para el análisis de diferentes variables cartográficas, así como de métodos y programas que han permitido definir áreas prioritarias para su protección (Elhatip & Afşin, 2001; Sabon, 2005; Qian et al., 2006; Pochon et al., 2008; Civita, 2008; Silva et al., 2010; Marín & Andreo, 2010; Galleani et al., 2011; Biava et al., 2014; Banzato et al., 2015).

La aplicación de los métodos y técnicas para la protección de los manantiales dependerá fundamentalmente de la información disponible, así como del objetivo que se persigue.

La regionalización de variables físicas de un territorio, por ejemplo, resulta ser un elemento clave debido a que se pueden asociar grupos de manantiales a las características particulares de la región y de este punto definir qué método es el más idóneo para delimitar zonas de protección de estas fuentes de agua.

## **2.7. Regionalización de variables físicas para la caracterización de manantiales**

La regionalización implica la división de un territorio en áreas menores con características comunes y representa una herramienta metodológica básica en la planeación ambiental, pues permite el conocimiento de los recursos para su manejo adecuado (CONABIO, 2008), en este caso, de los recursos hídricos subterráneos.

En la literatura consultada no se pudo identificar algún patrón secuencial y/o metodológico para la gestión y protección de manantiales que vaya de lo regional a lo particular. Por esta razón, la importancia de la regionalización en esta investigación estriba en un análisis de variables de carácter físico con el objetivo de definir aquellas regiones con características similares y que mejor representen a los manantiales localizados en esas áreas, para que una vez determinadas éstas, se proceda a una selección a escala local de aquellos manantiales con mayor necesidad de protección contemplando aspectos socioeconómicos.

La surgencia de los manantiales es controlada fundamentalmente por la combinación de varias características que la mayoría de los autores abordan: estructura geológica, geomorfología y caudal (Kreye et al., 1996; OPS, 2004; Gil, 2015; Kresic, 2010b; Arumí, et al., 2014); sin embargo, hay otras características que influyen también en la surgencia de estas fuentes de agua como son las topográficas, geológicas y factores hidrogeológicos (Martínez et al., 2014) además de la precipitación (Peña, et al., 2012)

De este modo, los factores a tomar en consideración para esta investigación son la *geología*, *geoformas* y *precipitación*, ya que son las que condicionan la presencia y movimiento del agua subterránea. Reconocer la diferenciación entre los tipos de manantiales, considerando el entorno

geológico en el que sobreyacen (aunadas a sus características hidrogeológicas), forma del terreno y precipitación, así como la correlación entre ellos harán dar cuenta de sus posibles patrones de comportamiento y sus variaciones.

**a) Geología (tipo de roca y funcionamiento hidrogeológico)**

La geología juega un papel clave en la aparición de estas fuentes de agua subterránea debido al tipo de roca y características tectónicas, tales como pliegues y fallas (Kresic, 2010b).

Las rocas pueden ser ígneas (volcánicas extrusivas y plutónicas intrusivas); rocas sedimentarias: consolidadas (no clásticas o no detríticas) y no consolidadas (clásticas o detríticas) y; rocas metamórficas.

Las rocas volcánicas son caracterizadas usualmente por una alta permeabilidad debido a su grado de fracturamiento, pueden alojar grandes volúmenes de agua subterránea y facilitar la salida de agua en una parte de la superficie en forma de manantiales.<sup>5</sup> Las rocas ígneas plutónicas (intrusivas) generalmente pueden ser muy impermeables y no tener la capacidad de almacenar agua.<sup>6</sup>

Las rocas sedimentarias consolidadas (no clásticas o no detríticas)<sup>7</sup> son formaciones muy heterogéneas con una permeabilidad que permite tener caudales generalmente elevados; son consideradas como rocas fracturadas, a partir de pequeñas fisuras el agua disuelve la roca.

---

<sup>5</sup> Las rocas volcánicas son rocas ígneas de textura afanítica o microgranular, producto de la consolidación del magma sobre la superficie o muy cerca de ella (Dávila, 2011).

<sup>6</sup> Las rocas plutónicas son rocas ígneas, consolidada a grandes profundidades, que aflora en la superficie por procesos tectónicos endógenos y/o erosión de las rocas suprayacentes que las cubrían, su textura es granular. Generalmente se forman en grandes masas estructurales a las que se les denomina batolitos o stocks. Algunas veces se pueden presentar como rocas intrusivas en forma de grandes estructuras lacolíticas, diques o sills. También se les llama rocas abisales. Se clasifican de acuerdo a su composición mineralógica en: granitos, sienitas, granodioritas, dioritas, gabros y ultrabásicas. De acuerdo a su contenido de sílice en: ácidas, intermedias y básicas. De acuerdo a su color en: leucócratas, intermedias y melanócratas (Dávila, 2011).

<sup>7</sup> En las rocas sedimentarias consolidadas (no clásticas) los fragmentos han sido unidos unos con otros procesos posteriores a la sedimentación. Estos procesos que consolidan a las rocas sueltas se denominan diagénesis (Pasotti, 2014). Ejemplo de rocas no clásticas o químicas tenemos yeso, sal, calizas, dolomitas. y las no clásticas se formaron por la precipitación de las soluciones disueltas en las aguas de los fondos marinos, lagos, etc.

Las rocas sedimentarias no consolidadas (detríticas o clásticas)<sup>8</sup> están constituidas por una mezcla de materiales orgánicos, presentados como aluviones y sedimentos lacustres, producto de la sedimentación de detritos recibidos por arrastre de una corriente, caracterizados como sedimentos muy permeables donde su sistema hidrológico está íntimamente relacionado con el cauce fluvial que los origina.

Finalmente, las rocas metamórficas son rocas que en su mayoría se consideran poco permeables y de escasa capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas; sin embargo, pueden retener el agua en hendiduras, grietas, fracturas y fallas; además, por el intemperismo, estas rocas son objeto de alteraciones que pueden crear condiciones favorables a la infiltración y almacenamiento de agua subterránea. Por esta razón las rocas metamórficas se consideran con porosidad secundaria.

La geología determina la composición química de las aguas subterráneas, pues pueden originarse en medios karsticos, porosos y fracturados, de acuerdo al tipo de roca según su funcionamiento hidrogeológico.

La porosidad (los huecos o intersticios) del terreno puede ser de dos tipos: porosidad primaria (u originada), originada al mismo tiempo que se formaron las rocas que los contienen, por ejemplo, las rocas detríticas y; porosidad secundaria (adquirida), producida posteriormente por fracturación o por disolución, por ejemplo, las rocas metamórficas y las calizas (Gil, 2015).<sup>9</sup> De este modo, se pueden distinguir manantiales que surgen en tres tipos de medios acuíferos:

- Acuíferos de medios porosos: Se encuentran en los sedimentos detríticos (gravas, conglomerados, arenas y areniscas), presentan unas excelentes condiciones para almacenar y transmitir el agua, aunque las velocidades de esta son, por lo general, bajas (Gil, 2015).

---

<sup>8</sup> Las rocas no consolidadas (clásticas) son las rocas sedimentarias compuestas por fragmentos o partículas de materiales rocosos, que pueden ser: bloques, cantos, gravas, arenas, limos, lodo, arcilla, etc. Las rocas de acuerdo al tamaño de los fragmentos son: conglomerados, aglomerados, pudingas, areniscas, limolitas, argilitas, etc. Las rocas clásticas constituidas por fragmentos mayores se denominan psefitas y las constituidas por fragmentos menores se les denominan pelitas (Dávila, 2011).

<sup>9</sup> La porosidad (P) de un terreno se define como la relación (%) entre el volumen de huecos (Vh) y el volumen total del terreno (Vt) que los contiene:  $P = Vh/Vt \times 100$

- Acuíferos de medios fisurados: Se encuentran en formaciones de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias consolidadas cuya permeabilidad es debida al desarrollo de un sistema de fisuras o fracturas (CONAGUA, 2016)
- Acuíferos de medios kársticos: Se trata de grandes embalses subterráneos cuyas aguas circulan y se almacenan dentro de las cavidades de las formaciones rocosas calcáreas (calizas y dolomías), las cuales tienen una porosidad secundaria originada por disolución, presentando canales y cavernas de gran tamaño que cuando se saturan de agua constituyen acuíferos muy importantes (Gil, 2015).

También la geología influye en la temperatura del agua dando origen a manantiales fríos y termanales con distinta calidad del agua (Kresic, 2010b) (ver apartado 2.2 Clasificación y tipología de los manantiales).

Las características fisicoquímicas del agua de los manantiales dependen de la geología del acuífero y del tiempo de residencia del agua en el mismo. Cuanto más tiempo tarde en viajar el agua desde la zona de recarga hasta la surgencia, mayor será la carga mineral. Además, aquellos manantiales alimentados por acuíferos regionales tienen una menor variabilidad en las condiciones fisicoquímicas del agua y no se secan en períodos de estiaje, en oposición a los que se encuentran alimentados por acuíferos locales y pequeños (Barquín, 2005).

Pues si bien, la composición química del agua subterránea es el resultado de continuos procesos de interacción entre el agua de precipitación (y nieve o granizo) que se infiltra en el terreno, y los minerales de la litología por donde circula (González et al., 2012).

#### **b) Geoformas (pendiente)**

Una geoforma o forma del terreno es una porción de la Tierra con cualidades de relieve homogéneo y continuo debido a la acción de procesos geológicos y geomorfológicos comunes (Genchi et al., 2011). En pocas palabras, designa todos los tipos de formas del relieve (Zinck, 2012)<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> El término geoforma, con significado genérico, ha sido introducido recientemente en la Guía para la Descripción de Suelos de la FAO (FAO, 2009). Las geoformas tienen un componente interno (hipogeo) y un componente externo (epigeo), en relación a la superficie del terreno. El componente interno es el material de la geoforma

En este sentido, la pendiente se relaciona con las formas del relieve; prácticamente todas ellas tienen un umbral límite que las clasifica o jerarquiza de acuerdo a su geometría; es decir, la pendiente constituye un factor que favorece la delimitación de los procesos y los tipos de formas que se encuentran en el terreno (Oropeza, 2010).

Por ejemplo, las montañas tienen una importancia determinante en el suministro de agua para el consumo y la producción de alimentos y energía y para la industria. El agua de los manantiales de montaña alimenta también unos ecosistemas privilegiados y la biodiversidad tanto de los montes como de los valles (Liniger & Weingartner, 1998)

Las regiones montañosas están actualmente amenazadas por la deforestación, la agricultura y el turismo, así como por la creciente demanda de sus recursos en los valles densamente poblados. A menudo son zonas marginales para ser habitadas por el hombre, por las dificultades derivadas de las fuertes pendientes, la pobreza de los suelos, las temperaturas frías y la inaccesibilidad. Los valles próximos suelen ser más favorables para los asentamientos, la agricultura y la industria, pero dependen de los recursos hídricos de las montañas (Liniger & Weingartner, 1998).

De esta manera, las geoformas tienen una estrecha relación con la composición geológica y la lluvia y son algunos de los factores que influyen en el tipo de manantial.

### **c) Precipitación**

El origen de la mayoría de las aguas continentales es la precipitación (lluvia o nieve). Cuando el agua de precipitación alcanza la superficie del terreno hay una fracción que vuelve a la atmósfera en estado gaseoso por efecto de la evaporación y la transpiración. El agua restante (también llamada precipitación efectiva) puede seguir dos caminos diferentes: fluir superficialmente o infiltrarse a cierta profundidad dentro del terreno. El que siga un camino u otro vendrá determinado principalmente por la naturaleza hidrogeológica de los materiales.

---

(contenido), cuyas características conllevan información genética y estratigráfica (cronológica). El componente externo de la geoforma es su figura, la cual expresa una combinación de características morfográficas y morfométricas (Zinck, 2012).



En terrenos con predominio de materiales impermeables, la fracción mayoritaria de la precipitación efectiva corresponde al flujo superficial. Por el contrario, en materiales de elevada permeabilidad, una fracción mayoritaria de la precipitación efectiva se infiltra, por lo que generará apenas cursos de drenaje superficial (Herrera, 2008).

El agua de lluvia es la fuente primaria de la recarga hidrológica de los acuíferos. Ésta toma del suelo una determinada composición química antes de pasar a formar parte del agua de un acuífero. A partir de este momento, el agua circula por el interior del terreno, surgiendo en superficie, unas veces con un recorrido relativamente corto y otras con un recorrido de cientos de kilómetros.

El tiempo de contacto del agua con las rocas del acuífero es muy variado, siendo mayor cuanto más elevada sea la profundidad y menor la permeabilidad. Por esta razón las aguas profundas suelen ser más salinas que las más próximas a la superficie. Las aguas que circulan próximas a la superficie apenas interaccionan con el terreno y mantienen la configuración adquirida durante la infiltración.

Además, la precipitación es un factor que influye en la formación y la temporalidad del caudal del manantial. Cuando llueve, el agua que llega a la superficie del suelo se infiltra o se escurre por su superficie. Parte del agua que se infiltra en el suelo la absorben las capas subsuperficiales, y parte lo atraviesa y llega a las capas más profundas (FAO, 2015).

El grado de penetración del agua depende de la permeabilidad de la superficie del suelo, la presencia de vegetación y la topografía local. Cuanto más permeable es el suelo más fácilmente se infiltra el agua de lluvia y puede llegar a alimentar a acuíferos (USGS, 2015). Cuando el agua no alcanza los niveles freáticos y sólo fluye subsuperficialmente también pueden manifestarse en forma de manantiales (Figura 2.3).

La figura 2.3 muestra a manera de ejemplo un esquema general del sistema de flujo de agua subterránea, en donde la infiltración de la precipitación y derretimientos de la nieve en las montañas forman un nivel piezométrico (NP) con gradientes descendentes, algunos de los cuales se manifiestan en niveles de agua poco profundos en las estribaciones bajas o en las regiones de piedemonte (Mn-Su y Mn-De), y la mayoría fluye bajo el fondo de valles y hacia arriba a través

de las arcillas como descarga difusa (Mn-As) y como manantiales termales (Mn-Tr) a través de las fracturas en el acuífero profundo.

En algunos casos, los manantiales responden rápidamente a las precipitaciones, en donde su caudal depende de la estación del año y del volumen de las precipitaciones. Pueden ser permanentes o intermitentes, y tener un origen atmosférico (cuando el agua de lluvia se filtra en la superficie) o ígneo (cuando el agua se calienta por contacto con rocas ígneas) para dar lugar a manantiales de agua caliente o termales (EEG, 2006).

La infiltración varía según la naturaleza del suelo o la roca, los manantiales de infiltración se secan a menudo en periodos secos o de escasas precipitaciones; sin embargo, otros tienen un caudal abundante y constante que proporciona un importante suministro de agua a nivel local.

La menor pluviometría explica principalmente las variaciones de caudal de manantiales de carácter estacional, pero no justifica el secado de aquellas fuentes de las que no existe constancia histórica de haberse secado (López, 2010b).

El conocimiento sobre el uso de los manantiales de infiltración durante la etapa más crítica de sequía en un determinado lugar es clave para considerar la conservación de estos suministros de agua, al ser, en algunos casos, la única fuente de agua disponible durante la época más seca. La importancia de estos manantiales puede pasar desapercibida por el poco caudal de agua disponible de unos pocos mililitros que apenas humedecen las rocas y forman pequeños charcos (Charre et al., 2010).

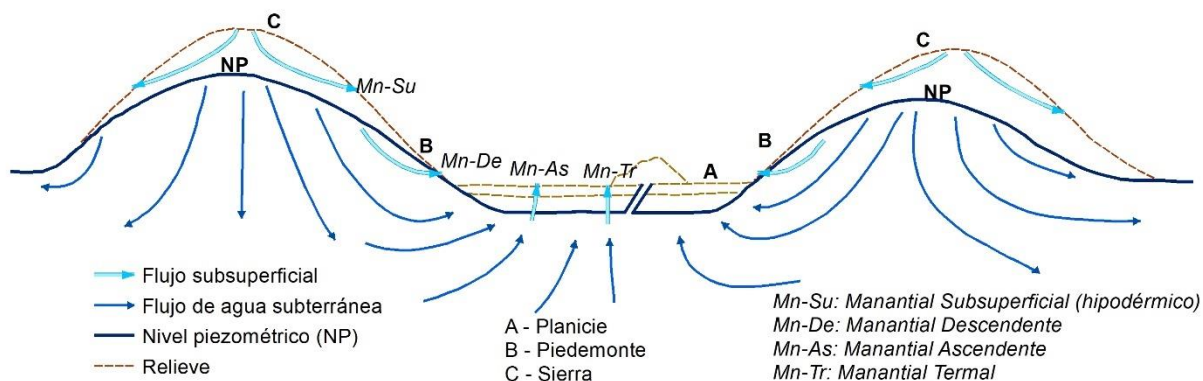


Figura 2.3. Interpretación del sistema de flujo de agua subterránea en valles volcanosedimentarios. Modificado de NAS (1995).

## **2.8. Evaluación Multicriterio (MCE) en el análisis de protección de manantiales**

El método de Evaluación Multicriterio (MCE por sus siglas en inglés Multi-Criterial Evaluation) o también llamado Análisis Multicriterio es un conjunto de técnicas utilizadas en la decisión multidimensional y los modelos de evaluación dentro del campo de la toma de decisiones, lo cual permite seleccionar aquella alternativa que mejor satisfaga las preferencias de acuerdo al objetivo considerado (Drobne & Lisec, 2009).

El MCE se ha utilizado como herramienta para la toma de decisiones en aquellos casos en que existen varias alternativas o posibilidades. En el caso de recursos hídricos, se ha utilizado, por ejemplo, para la identificación de las áreas prioritarias a monitorear en la redes dinámicas de monitoreo del agua subterránea (Esquivel, 2015) para la identificación de fuentes de abastecimiento de agua subterránea de uso urbano con mayor necesidad de protección (Alvarado, 2009); o para la delimitación de zonas donde construir captaciones de aguas en acuíferos fisurados (Hanich, et al., 2008).

El análisis multicriterio se puede ejecutar en varios softwares tipo SIG, uno de ellos es IDRISI a través del módulo MCE. El MCE incluye varios módulos específicos que cubren los procedimientos requeridos para llevar a cabo análisis de criterios y objetivos múltiples, incluso cuando los objetivos son antagónicos, es una valiosa herramienta para la toma de decisiones sobre la asignación de recursos (Eastman, 2016). Para el caso de la versión IDRISI Selva el módulo Decision Wizard reúne la información a procesar, en el caso de la versión reciente IDRISI TerrSet lo hace el módulo Spatial Decision Modeler (SDM).

El SDM en el sistema TerrSet es un entorno gráfico para el soporte de decisiones y proporciona una interfaz gráfica para el desarrollo de modelos de decisión que puedan resolver las decisiones de asignación de recursos complejos, usando varios de los productos de otras herramientas. Utiliza el lenguaje y la lógica desarrollada en torno a las herramientas de soporte de decisiones TerrSet, incluyendo el desarrollo de factores y restricciones con herramientas tales como Fuzzy y Reclass, la combinación de factores para producir mapas de aptitud con la herramienta de MCE y la combinación adicional de múltiples objetivos con la herramienta de MOLA (MultiObjective Land Allocation).

El MCE es un método que permite orientar la toma de decisiones tomando como basamento varios criterios comunes. Se utiliza para emitir juicios comparativos entre proyectos o medidas heterogéneas, y su objetivo es llegar a la solución del problema mediante su simplificación.

Para realizar el análisis multicriterio se sigue una serie de cinco pasos: a) definir el objetivo; b) identificar los criterios, c) identificar los criterios, d) reescalar los factores, e) ponderar los pesos de los factores y f) agregar los factores.

#### **a) *Definir el objetivo***

El primer paso en una evaluación multicriterio consiste en la definición del objetivo del análisis. Es lo que se persigue para la resolución de un problema. El número de objetivos debe ser mínimo y deben estar orientados a la solución del problema.

#### **b) *Identificar los criterios***

Consiste en identificar y seleccionar los criterios que se utilizarán de acuerdo al objetivo de la investigación y determinar cuáles de ellos son más importantes para el análisis en la toma de decisión. Un *criterio* brinda la base para una decisión que puede medirse y evaluarse. Puede ser de 2 tipos: factores y restricciones.

- 1. *Factores*:** Son criterios o variables que influyen (enriquecen o devalúan) la viabilidad del objetivo en estudio. Hay varias maneras de seleccionar los factores para un análisis multicriterio. Se pueden seleccionar basados en la cartografía existente, o bien, se pueden definir por el investigador o por un grupo de expertos en el tema.
- 2. *Restricciones*:** Son criterios que limitan las alternativas en consideración.

Los factores son criterios en imágenes que frecuentemente están en diferentes escalas y unidades, por lo que hay que reestructurarlos debido a que pueden ser tanto de carácter cualitativo o cuantitativo. Son criterios con valores discretos o continuos. Se transforman todos los factores a una escala en común, ya sea de tipo real (0 a 1) o escala byte (0 a 255).

Las restricciones son criterios representados en imágenes booleanas; es decir, definidos como “sí” o “no” mediante 1 ó 0 respectivamente.

Si los factores continuos son en realidad grupos difusos, fácilmente se puede asumir esto como una de varias funciones posibles de pertenencia de grupos.

### c) *Reescalar los factores*

En IDRISI TerrSet, el módulo FUZZY (difuso) está integrado en la interfaz SDM. El módulo realiza el reescalado de cada uno de los factores usando funciones de pertenencia de grupos difusos y puede hacerlo ya sea con una escala de número real de 0-1 o una escala byte de 0-255.<sup>11</sup> El valor más alto del reescalamiento en la imagen resultante debe representar el caso de mayor posibilidad de pertinencia al grupo de decisiones.

FUZZY ofrece cuatro tipos de función de pertenencia (Eastman, 2016; Esquivel, 2015). Se debe elegir la que mejor asigne la prioridad de cada pixel de la imagen, según el modelo de asignación de prioridad a los valores del factor que se requiera (Figura 2.4).

1. ***Función sigmoideal (sigmoide)***: Es la más usada en la lógica difusa, corresponde a la función coseno. Con esta función, el cambio en el valor del atributo ubicado entre dos puntos de control provoca el más pequeño cambio en la conveniencia de ese atributo para la consecución del objetivo. Esta función fue la empleada en esta investigación.
2. ***Función en forma de J***: Es también bastante común. Se aproxima de manera indefinida a cero, hasta que el eje de abscisas constituye una asíntota horizontal de la función.
3. ***Función lineal***: Es la más sencilla, donde un cambio en el valor de factor produce un cambio en la conveniencia o ese atributo para la consecución del objetivo.
4. ***Función de usuario***: Adecuada en el caso de que la relación entre el grupo de la pertenencia difusa y el criterio no siga ninguna de las funciones anteriores. La normalización mediante esta función debe realizarse de forma separada en el modelo FUZZY.

---

<sup>11</sup> Lo recomendable es la segunda opción por eficiencia informática de cálculo.

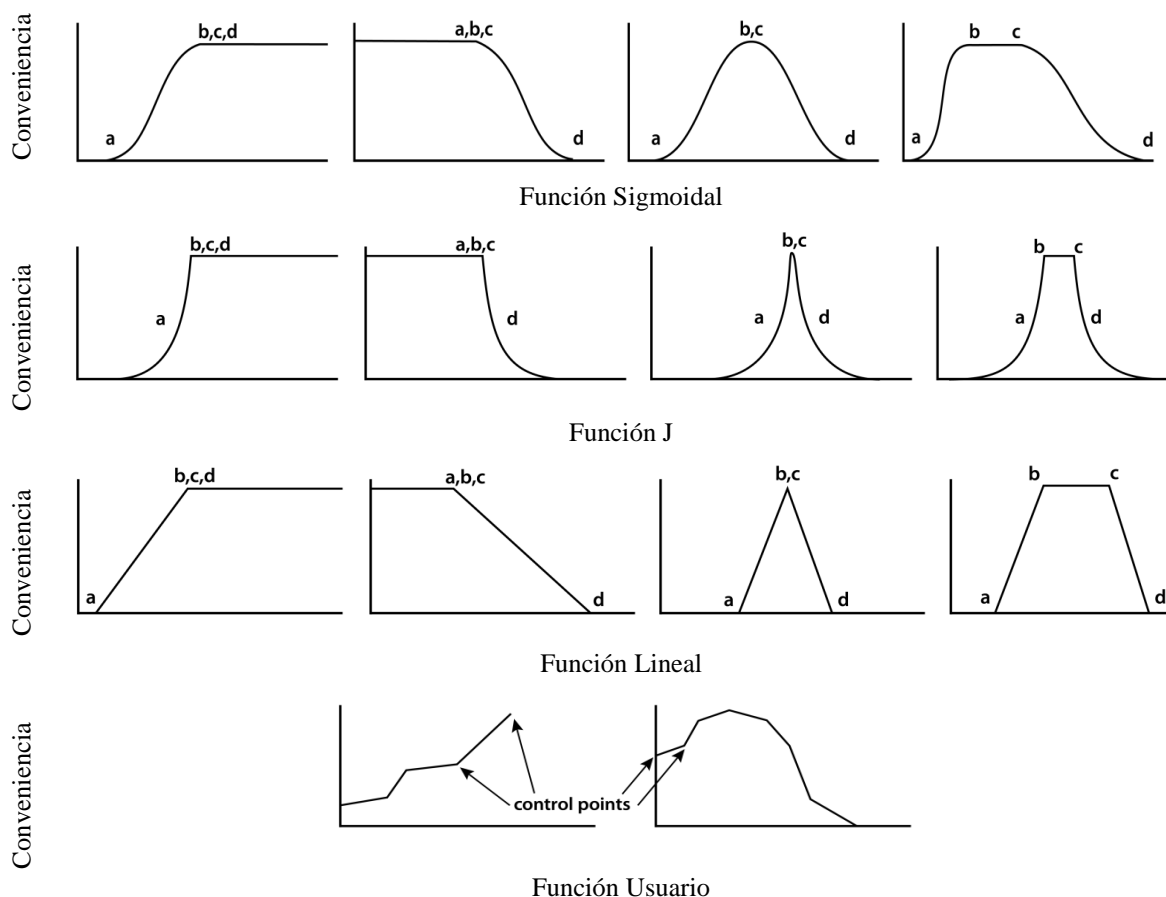


Figura 2.4. Funciones de pertenencia difusa para reescalar factores (Eastman, 2016).

La función elegida confiere la adecuación en función del objetivo de cada valor del factor (entre 0 y 1 o 0 y 255) de acuerdo con su relación directa o inversa con la priorización de manantiales a proteger para el caso de este trabajo. Por lo tanto, debe elegirse la forma de la función que mejor describa la relación, pudiendo ser alguna de las siguientes:

1. **Monótonicamente creciente:** Los valores mínimos no son convenientes para el logro del objetivo, pero al ir aumentando van resultando más convenientes hasta un valor en el que todos tienen la misma prioridad para la protección. La posibilidad de la adecuación se eleva de 0 a 1 y nunca disminuye.
2. **Monótonicamente decreciente:** El valor mínimo tiene la misma prioridad y los valores mayores son gradualmente menos convenientes para cumplir el objetivo, hasta un valor que resulta inconveniente, por lo tanto, tiene la menor prioridad de protección. La máxima adecuación comienza en 1, luego disminuye y permanece en 0.

3. **Simétrica:** Indica que el valor mínimo es poco conveniente para el logro del objetivo. Conforme va aumentando este valor, los valores llegan a un intervalo de valores que resulta conveniente y valores mayores resultan ser menos convenientes hasta no serlo. Es decir, la posibilidad de adecuación al objetivo crece, se mantiene constante en un intervalo y posteriormente decrece.

Una vez elegida la forma de la función, se requiere asignar los valores correspondientes a los puntos de inflexión que gobiernan la forma de la curva, los llamados puntos de control. Esta asignación se fundamenta en la decisión de cuáles valores resultan convenientes y cuáles no. Los puntos de control están detonados por las letras que indican la probabilidad de pertenencia:

a = Cuando la adecuación aumenta por encima de 0.

b = Cuando la adecuación se acerca a 1.

c = Cuando la adecuación disminuye por debajo de 1.

d = Cuando la adecuación finalmente se acerca a 0.

Las funciones que crecen o decrecen monótonicamente solo requieren 2 puntos de control: “a” y “b” o “c” y “d”, en cambio las funciones simétricas requieren 3 o 4, y dada la importancia de los puntos de control, debe considerarse cuidadosamente el significado inherente de los puntos elegidos.

#### **d) Ponderar los pesos de los factores**

La ponderación de pesos (*weight*) de los factores radica en asignar el peso de cada uno de los factores según la importancia que estos tienen para lograr el objetivo. Cuanto mayor sea el peso, más importante es el criterio de la utilidad general (Drobne & Lisec, 2009).

La asignación de los pesos de los criterios se logra dividiendo 1.0 entre los factores, de tal forma que la suma de los pesos ( $w$ ) de los factores (1,2,3...n) debe ser igual a 1.0 (Ecuación 2.1):

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n)$$

$$\sum w_j = 1.$$

La ponderación depende del conocimiento que se tenga sobre la influencia de cada criterio en la problemática y de su importancia relativa para determinar la adecuación al objetivo planteado. Al aplicar el MCE dentro del SDM (IDRISI), permite optar por una de las tres siguientes formas de ponderación:

1. Pesos iguales
2. Pesos definidos por el usuario
3. Proceso Jerárquico Analítico AHP (Analytical Hierarchy Process)

El AHP (elaborado por Saaty en 1980) es un procedimiento que consiste en una comparación por pares de factores de una manera automatizada, para de este modo obtener el peso que tiene cada uno de ellos. Este procedimiento se realiza a través de la Matriz Saaty, utilizando una escala ordinal de comparación que se mueve entre valores de 1/9 a 9 de acuerdo con la intensidad de importancia. Las fracciones indican menos importancia, los enteros más importancia (Tabla 2.1).

El procedimiento de comparación por pares se hará asignando un peso de acuerdo a la importancia del factor de la columna, respecto al factor de la fila de la matriz, llenando las celdas en blanco con fracciones o enteros, dependiendo de la importancia. Los números 1 son asignados automáticamente por el sistema. Al finalizar la comparación el radio de consistencia “CR” debe ser menor a 0.1 para que sea considerado aceptable y sea una evaluación coherente.

Tabla 2.1. Matriz Saaty para la comparación por pares

| 1/9              | 1/7      | 1/5  | 1/3      | 1     | 3              | 5    | 7        | 9       |
|------------------|----------|------|----------|-------|----------------|------|----------|---------|
| extremo          | muy alto | alto | moderado | igual | moderado       | alto | muy alto | extremo |
| menos importante |          |      |          |       | más importante |      |          |         |

| Factor | a | b | c | d | e | n... |
|--------|---|---|---|---|---|------|
| a      | 1 |   |   |   |   |      |
| b      |   | 1 |   |   |   |      |
| c      |   |   | 1 |   |   |      |
| d      |   |   |   | 1 |   |      |
| e      |   |   |   |   | 1 |      |
| n...   |   |   |   |   |   | 1    |



### e) *Agregación de factores*

Este paso combina la información de factores reescalados y sus pesos con la restricción. El proceso de evaluación del riesgo se desarrolla a través de tres lógicas (Figura 2.5).

1. ***Intersección booleana (And lógico)***. Es un método para imágenes booleanas, es decir aquellas imágenes cuyos atributos para todos los píxeles son 1 o 0, de tal forma que los sitios que cumplen una condición (AND u OR) están representados con el valor 1 y aquellos que no cumplen con el valor 0. Este tipo de evaluación implica una multiplicación de imágenes.
2. ***Combinación lineal ponderada (WLC)***. El método multiplica a cada uno de los factores, cuyos valores han sido previamente ajustados a una escala común (estandarizado), por el peso relativo asignado al factor (cada celda dentro de cada mapa tiene el mismo peso del factor), y luego suma los resultados.
3. ***Promedio ponderado ordenado (OWA)***. Además de los pesos de los factores, los pesos asociados al orden permiten controlar la manera en que los factores son agregados y puede diferir en cada píxel de una misma imagen.

En el OWA, el orden de pesos no es aplicado a las imágenes de los factores en su conjunto. Más bien, se aplican el pixel por pixel con el orden de las puntuaciones de idoneidad. El efecto del orden de los pesos se entiende más fácilmente en términos de niveles de riesgo y desventaja. Las posibilidades describen el espacio de decisión triangular.



Figura 2.5. Estrategia de decisión triangular (Eastman, 2016).

Este método ofrece una gama completa de estrategias de decisión a lo largo de las dimensiones principales del grado de equilibrio involucrado y el grado de riesgo en la solución. En el módulo Spatial Decision Modeler de (IDRISI TerrSet) el MCE ofrece cuatro opciones de riesgo y compensación (tradeoff), con el mínimo, medio y máximo riesgo, y con o sin compensación.

## **2.9. Estimación del balance hídrico para la delimitación de zonas de protección de manantiales**

Para la delimitación de zonas de protección de manantiales, en algunos casos se ha utilizado como criterio de análisis el tiempo de tránsito, entendiéndose éste como el tiempo que un contaminante tarda en llegar a la fuente de agua a proteger; para ello, se han utilizado distintas técnicas; sin embargo, la estimación del balance hídrico puede ser una variable que considerar para estimar las zonas de protección e identificar cuál es la zona que soporta el caudal anual del manantial.

El balance hídrico del suelo se basa en el principio de la conservación del agua, donde toda el agua que entra al suelo debe ser igual a la cantidad de agua que se almacena más el agua que sale de él. Las entradas al sistema son debidas a la precipitación que se infiltra del agua hacia el suelo y las salidas se deben a la evapotranspiración y la descarga hacia los acuíferos (Fetter, 2001). Los factores que influyen en el balance hídrico del suelo son parámetros meteorológicos (precipitación, temperatura, horas de sol, etc.), geográficas (uso del suelo y pendiente) y geológicas (textura del suelo, velocidad de infiltración) (Alvarado & Barahona, 2017)

Para determinar el balance hídrico se necesitan conocer el cálculo de diferentes procesos del ciclo hidrológico como la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía superficial, y la infiltración.

Para cuantificar los distintos componentes del balance hídrico en el suelo se suele hacer el cálculo mediante el método empírico de Thornthwaite (Ecuación 2.2):

$$P = Es + ET + I$$

Donde:

- *P*: Precipitación (mm/unidad de tiempo, habitualmente año o mes).
- *Es*: Esgurrimiento superficial (mm/t)
- *ET*: Evapotranspiración real (mm/t)
- *I*: Infiltración en el terreno (mm/t)

### **a) Precipitación**

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre (Aparicio, 2005) es también uno de los factores más importantes que definen las características climatológicas dentro de una zona. La precipitación es una variable de tipo discontinuo, distribuida en espacio y tiempo, donde el espacio es la atmósfera cercana a la superficie del terreno.

La precipitación es uno de los pocos componentes del balance hídrico que puede ser medida de forma fácil y sencilla a través de instrumentos de medida (pluviómetros o pluviógrafos) en estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio y, recientemente, a través de imágenes satelitales o por radar, donde se utilizan principalmente datos de precipitación media. Su unidad de medida más usual es en mm/m<sup>2</sup> o l/m<sup>2</sup>.

### **b) Esgurrimiento superficial**

En el estudio de los procesos superficiales, la concepción más conocida de la propuesta por Horton (1933) citado en González (2006) señala que el esgurrimiento se genera cuando la intensidad de la lluvia sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo. A este proceso, conocido como esgurrimiento por excedencia de infiltración, se le asocian otros dos procesos: esgurrimiento por saturación, que da origen al esgurrimiento una vez que se satura el suelo, y el esgurrimiento originado por exfiltración en manantiales, zonas hidromorfas, etc.

Por otra parte, en el estudio de los procesos subterráneos, el esgurrimiento hipodérmico se ha investigado ampliamente, tanto en condiciones saturadas, como no saturadas; este esgurrimiento se puede acelerar o amplificar según el tamaño de los macroporos que conforman la matriz del suelo. La principal diferencia entre ambos procesos, superficial y subterráneo, es la velocidad con la que se desplaza el agua, pudiéndose presentar, de manera simultánea o sucesiva, al

combinarse una serie de condiciones y factores que son variables en espacio y en tiempo (González, 2006).

En general la mayor parte del escurrimiento está en forma canalizada (ríos y arroyos) y se mide en estaciones de aforo construidas especialmente para ello en los cauces. El escurrimiento de una cuenca se estima mediante el volumen de agua escurrido en un año, éste se obtiene con la relación entre el volumen de agua que precipita en un año y el coeficiente de escurrimiento (Aparicio, 2005), que indica cuánto de esa lluvia puede escurrir. Para determinar el escurrimiento superficial se emplea la ecuación 2.3:

$$Q = P * Ce$$

Donde:

- $Q$  = Altura de la lámina de escurrimiento anual
- $P$  = Precipitación anual promedio en mm
- $Ce$  = Coeficiente adimensional de escurrimiento promedio

Si se desea obtener el volumen de escurrimiento, se debe multiplicar por el área de la zona de estudio.

El  $Ce$  se puede obtener por medio de dos metodologías principalmente: con base en Benítez, et al. (1980) y la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 (DOF, 2002).

El procedimiento de Benítez, et al. (1980) depende de tres características: a) tipo de suelo (textura), b) uso de suelo (cobertura) y c) pendiente. El  $Ce$  puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1 (Tabla 2.2).

- a) El tipo de textura del suelo se clasifica en fina, mediana y gruesa, y se asocia a su grado de permeabilidad en suelo: poco permeable, medianamente permeable y muy permeable.
- b) La cobertura del suelo puede ser de 5 tipos: sin vegetación, cultivos, pastos y vegetación ligera, hierba y bosques, y vegetación densa.
- c) La pendiente calculada en porcentaje se agrupa en 5 rangos que oscilan desde porcentajes de 0% a mayores de 50%.

Tabla 2.2. Coeficiente de escurrimiento según Benítez, et al. (1980).

| Cobertura                  | Tipo de suelo | Pendiente (%) |       |      |      |      |
|----------------------------|---------------|---------------|-------|------|------|------|
|                            |               | > 50          | 20-50 | 5-20 | 1-5  | 0-1  |
| Sin vegetación             | Impermeable   | 0.8           | 0.75  | 0.7  | 0.65 | 0.6  |
|                            | Semipermeable | 0.7           | 0.65  | 0.6  | 0.55 | 0.5  |
|                            | Permeable     | 0.5           | 0.45  | 0.4  | 0.35 | 0.3  |
| Cultivos                   | Impermeable   | 0.7           | 0.65  | 0.6  | 0.55 | 0.5  |
|                            | Semipermeable | 0.6           | 0.55  | 0.5  | 0.45 | 0.4  |
|                            | Permeable     | 0.4           | 0.35  | 0.3  | 0.25 | 0.2  |
| Pastos y vegetación ligera | Impermeable   | 0.65          | 0.6   | 0.55 | 0.5  | 0.45 |
|                            | Semipermeable | 0.55          | 0.5   | 0.45 | 0.4  | 0.35 |
|                            | Permeable     | 0.35          | 0.3   | 0.25 | 0.2  | 0.15 |
| Hierba                     | Impermeable   | 0.6           | 0.55  | 0.5  | 0.45 | 0.4  |
|                            | Semipermeable | 0.5           | 0.45  | 0.4  | 0.35 | 0.3  |
|                            | Permeable     | 0.3           | 0.25  | 0.2  | 0.15 | 0.1  |
| Bosques y vegetación densa | Impermeable   | 0.55          | 0.5   | 0.45 | 0.4  | 0.35 |
|                            | Semipermeable | 0.45          | 0.4   | 0.35 | 0.3  | 0.25 |
|                            | Permeable     | 0.25          | 0.2   | 0.15 | 0.1  | 0.05 |

Por otro lado, la metodología de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (DOF, 2002) sobre la Conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, señala que en el caso de que la cuenca bajo estudio no cuente con suficiente información, para obtener el  $C_e$  se puede aplicar el método indirecto a partir de tres características: a) la precipitación, b) el tipo de suelo (textura) y c) cobertura del suelo (uso de suelo).

- a) La precipitación anual es el volumen de lluvia que ocurre en un año. Se mide en milímetros (mm).
- b) El tipo de suelo (textura) se clasifica de acuerdo con su grado de permeabilidad, debido a que permite en mayor o menor medida el paso del agua, esto es suelo: permeable, medianamente permeable y casi impermeable (Tabla 2.3).
- c) El uso del suelo (cobertura) se clasifica en 14 coberturas agrupadas por: barbecho, áreas incultas y desnudas, cultivos, pastizal, bosque, zonas urbanas, caminos y pradera permanente.

Para calcular el  $C_e$ , se deben obtener primeramente los valores de  $K$ .  $K$  es una constante adimensional que depende del tipo de suelo y cobertura. Sus valores oscilan desde 0.07 a 0.33 (Tabla 2.4).

Una vez obtenido el valor de  $K$ , el  $C_e$  se calcula mediante las fórmulas siguientes dependiendo de las condicionantes. Las fórmulas se considerarán válidas para valores de precipitación anual entre 350 mm y 2150 mm.

a) Si  $K$  resulta menor o igual que 0.15, entonces (Ecuación 2.4):

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000}$$

b) Si  $K$  es mayor que 0.15, entonces (Ecuación 2.5):

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5}$$

Donde:

- $C_e$  = Coeficiente de escurrimiento anual, en mm
- $K$  = Parámetro que depende del tipo y uso de suelo
- $P$  = Precipitación anual, en mm

Para fines de la presente investigación se utilizó el método de CONAGUA (DOF, 2002), debido a que es el utilizado a nivel nacional.

Tabla 2.3. Tipo de textura del suelo

| Tipo de Suelo | Características   |
|---------------|---|
| A             | Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.  |
| B             | Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactados que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos. |
| C             | Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.   |

Tabla 2.4. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002).

| Uso del Suelo |   | Tipo de suelo |      |      |
|---------------|---|---------------|------|------|
|               |   | A             | B    | C    |
| 1             | Barbecho, áreas incultas y desnudas         | 0.26          | 0.28 | 0.3  |
|               | Cultivos:                                   |               |      |      |
| 2             | En Hileras                                  | 0.24          | 0.27 | 0.3  |
| 3             | Legumbres o rotación de pradera             | 0.24          | 0.27 | 0.3  |
| 4             | Granos pequeños                             | 0.24          | 0.27 | 0.3  |
|               | Pastizal (% del suelo cubierto o pastoreo): |               |      |      |
| 5             | Más del 75% - Excesivo                      | 0.14          | 0.2  | 0.28 |
| 6             | Del 50 al 75% - Regular                     | 0.2           | 0.24 | 0.3  |
| 7             | Menos del 50% - Poco                        | 0.24          | 0.28 | 0.3  |
|               | Bosque (% del suelo cubierto):              |               |      |      |
| 8             | Cubierto más del 75%                        | 0.07          | 0.16 | 0.24 |
| 9             | Cubierto del 50 al 75%                      | 0.12          | 0.22 | 0.26 |
| 10            | Cubierto del 25 al 50%                      | 0.17          | 0.26 | 0.28 |
| 11            | Cubierto menos del 25%                      | 0.22          | 0.28 | 0.3  |
| 12            | Zonas urbanas                               | 0.26          | 0.29 | 0.32 |
| 13            | Caminos                                     | 0.27          | 0.3  | 0.33 |
| 14            | Pradera permanente                          | 0.18          | 0.24 | 0.3  |

### c) Evapotranspiración

La Evapotranspiración (*ET*) es la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración. La evaporación es el fenómeno físico en el que el agua pasa de líquido a vapor (habría que añadir la sublimación –sólido a vapor– desde la nieve y el hielo). Se produce evaporación desde: a) la superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación; b) desde las superficies de agua (ríos, lagos, embalses); y c) desde el suelo, agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial del suelo, pudiendo tratarse de agua recién infiltrada o, en áreas de descarga, de agua que se acerca de nuevo a la superficie después de un largo recorrido en el subsuelo.

La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera. Toman agua del suelo a través de sus raíces y una pequeña parte para su crecimiento y el resto lo transpiran (Sánchez, 2010)

Como son difíciles de medir por separado, y además en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera sea del modo que sea, se consideran conjuntamente bajo el concepto mixto de *ET*.

Para el hidrólogo, el interés de la *ET* se centra en la cuantificación de los recursos hídricos de una zona: lo que llueve, menos lo que se evapotranspira será el volumen de agua disponible. La *ET* se estudia principalmente en el campo de las ciencias agronómicas, donde la *ET* se considera pensando en las necesidades hídricas de los cultivos para su correcto desarrollo. La evapotranspiración se mide mediante lisímetros y su unidad de medida es el mm. Fórmulas y métodos que se utilizan en hidrología provienen de ese campo de investigación. (Sánchez, 2010).

Existen dos tipos de *ET* principalmente: Evapotranspiración Potencial (*ET<sub>p</sub>*) y la Evapotranspiración Real (*ET<sub>r</sub>*). Thornthwaite (1948) denominó *ET<sub>p</sub>* a la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertera vegetal estuvieran en condiciones óptimas; es decir, la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación si en todo momento hay en el suelo agua suficiente para el crecimiento activo de las plantas (Manzano, 2008).

Por otro lado, la *ETR* es la que se produce realmente en las condiciones existentes en cada caso (Sánchez, 2010). Es la suma de la evaporación directa de agua desde la superficie del terreno y/o desde los poros y grietas de este, más la transpiración de las plantas. La máxima profundidad de alcance de las plantas es la longitud de las raíces, aunque éstas pueden obtener agua más profunda por succión (Manzano, 2008).

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina *ET<sub>o</sub>*, que ocurre sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. Debido a que en ocasiones se hace uso indistinto de los términos, la FAO no recomienda el uso de otras denominaciones como *ET<sub>p</sub>* para la evapotranspiración de referencia (*ET<sub>o</sub>*), debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición (Allen, et al., 2006).



De las numerosas fórmulas que permiten evaluar la  $ET_o$  (Tabla 2.5), Allen, et al. (2006) recomiendan el método FAO Penman-Monteith como único método estándar de cálculo, dado que tiene mejor comportamiento y consistencia en comparación con otros métodos, y debido a que existe una elevada probabilidad de que este método prediga correctamente los valores de  $ET_o$  en una amplia gama geográfica y climática; además, cuenta con previsiones para su uso en situaciones de falta de datos.

En este sentido, no se aconseja el uso de las antiguas ecuaciones de FAO o de otra ecuación para el cálculo de  $ET_o$ . Sin embargo, debido que en muchos casos no se tiene disponibilidad de datos meteorológicos como la humedad relativa, velocidad del viento, presión del vapor, entre otras, se recomienda usar el método de Hargreaves-Samani (1985), debido a que ha producido resultados razonables de  $ET_o$  con cierta validez global (Allen, et al., 2006; Falamarzi, et al., 2014).

Tabla 2.5. Fórmulas e insumos necesarios para evaluar la  $ET_p$  y  $ET_o$  (Sánchez, 2010).

| Autores de las fórmulas | Insumos   |
|-------------------------|---|
| Thornthwaite            | Temperatura   |
| Jensen-Heise            | Temperaturas (medias, máximas y mínimas del mes más cálido), altitud, radiación solar |
| Hargreaves-Samani       | Temperatura, radiación solar  |
| Blaney-Criddle Makkink  | Temperatura   |
| Turc                    | Temperatura, horas reales de sol  |
| Penman- Monteith        | Temperatura, horas reales de sol, velocidad del viento, humedad relativa              |

A continuación, se citan los métodos de Thornthwaite y el de Hargreaves-Samani, debido a que son los métodos más usados en hidrología y edafología, y porque emplean los datos mínimos requeridos.

### 1. *Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Thornthwaite*

Para el cálculo de la  $ET_p$  con la fórmula de Thornthwaite (1948) se requiere únicamente de los datos de temperatura. El método es muy usado, aunque al requerir de información climática mínima limita la obtención de resultados confiables (Ecuación 2.6):

$$ETP = 16 (10t/I)^a$$

Donde:

- $ETP$  = Evapotranspiración potencial media mensual en mm
- $t$  = Temperatura media mensual en °C
- $I$  = Índice calórico anual, constante para la región dada. Es la suma de los 12 índices de calor mensuales  $i$  del año, es función de la temperatura media normal mensual ( $t$ ) (Ecuación 2.7):

$$I = \sum_1^{12} i \quad i = (t/5)^{1.514}$$

- $a$  = Exponente empírico, función de  $I$  (Ecuación 2.8):

$$a = (675 \cdot 10^{-9}) I^3 - (771 \cdot 10^{-7}) I^2 + (179 \cdot 10^{-4}) I + 0.49239$$

## 2. Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia mediante la fórmula de Hargreaves

La fórmula de Hargreaves y Samani (1985) requiere de los datos de temperatura y de radiación solar, específicamente de temperatura media ( $T_{med}$  en °C), máxima ( $T_{máx}$  en °C) y mínima ( $T_{mín}$  en °C), así como de radiación solar extraterrestre ( $R_a$  en mm/día). La ecuación general es la siguiente (Ecuación 2.9):

$$ET_o = 0.135(t_{med} + 17.78)R_s$$

Donde:

- $ET_o$  = Evapotranspiración de referencia diaria en mm/día
- $T_{med}$  = Temperatura media diaria en °C
- $R_s$  = Radiación solar incidente en mm/día

La radiación solar incidente  $R_s$  se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera);

ésta última aparece según los autores como  $R_o$  ó  $R_a$ , y se lee en tablas en función de la latitud del lugar y del mes. En este documento se referiere a ella como  $R_a$ .

Para la obtención de la  $R_s$  Samani (2000) propone la siguiente fórmula (Ecuación 2.10):

$$R_s = R_a * KT * (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5}$$

Donde:

- $R_s$  = Radiación solar incidente en mm/día
- $R_a$  = Radiación solar extraterrestre en mm/día
- $KT$  = Coeficiente
- $T_{m\acute{a}x}$  = Temperatura diaria máxima en °C
- $T_{m\acute{i}n}$  = Temperatura diaria mínima en °C

Puesto que los valores de  $R_a$  están tabulados y las temperaturas máximas y mínimas son datos empíricos relativamente fáciles de obtener, la dificultad para aplicar esta sencilla expresión la encontramos en el coeficiente  $KT$ .

El coeficiente  $KT$  es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica. Hargreaves (citado en Samani, 2000) recomienda  $KT = 0.162$  para regiones del interior y  $KT = 0.19$  para regiones costeras.

Para evaluar la Radiación Solar Extraterrestre  $R_a$  existen los valores obtenidos de varias tablas, todas ellas en función de la latitud y del mes, por ejemplo, existe la tabla de  $R_a$  de Allen, et al. (1998) en mm/día de agua evaporada.

A pesar de que la  $ET_0$  se puede obtener por medio de estas ecuaciones, la *expresión simplificada* utilizada más comúnmente es (Ecuación 2.11):

$$ET_0 = 0.0023 (T_{med} + 17.78) (T_{m\acute{a}x} - T_{min})^{0.5} R_a$$

Donde:

- $ET_0$  = Evapotranspiración de referencia diaria en mm/día

- $T_{med}$  = Temperatura media diaria en °C
- $R_a$  = Radiación solar extraterrestre en mm/día.
- $T_{máx}$  = Temperatura diaria máxima en °C
- $T_{mín}$  = Temperatura diaria mínima en °C

#### d) Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la Tierra, y queda retenida por ella o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen de agua acumulado anteriormente. Superada la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad. Este último proceso recibe el nombre de percolación, infiltración eficaz o infiltración profunda. El término de infiltración se aplica solamente en materiales no saturados, diferenciándose de la percolación que es el tipo de movimiento que predomina en los materiales saturados (Schulz y García, 2015).

La infiltración del agua en el suelo juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico. Dependiendo de las condiciones geológicas, puede permanecer en el suelo en forma de humedad; escurrir como flujo subsuperficial y aflorar como un manantial; o recargar el acuífero, entre otros (Alvarado & Barahona, 2017).

Para el cálculo de la infiltración se tienen diversas metodologías, una de ellas es la adaptada por SEMARNAT (2005) para estimar la generación de líquidos percolados, basada en el método de balance de agua desarrollado por C. W. Thornthwaite (1948). Esta metodología, establece una relación entre la hidrología básica de superficie con la hidrología subterránea, a través de la cual las variaciones en la cantidad de agua en el suelo vienen determinadas por la diferencia entre las entradas y salidas de todas las fuentes posibles con injerencia en el balance.

Como entradas se consideran fundamentalmente las precipitaciones pluviales mensuales promedio. Así mismo, como salidas, se incluyen las evapotranspiraciones mensuales obtenidas sobre todo a partir de las temperaturas promedio mensuales, y la capacidad que el suelo tiene para retener humedad antes de lixiviarla (capacidad de campo del suelo). Además, la fracción de la precipitación pluvial que se pierde por escurrimiento sobre el suelo es también considerada como pérdida o salida.

Para estimar la infiltración real ( $I_r$ ) ó eficaz ( $I_e$ ) se requiere la Ecuación 2.12:

$$I_{r_j} = I_{p_j} - ET_{o_j}$$

Donde:

- $I_{r_j}$  = Infiltración real mensual en mm.
- $I_{p_j}$  = Infiltración potencial mensual en mm.
- $ET_o$  = Evapotranspiración de referencia mensual en mm.
- $j$  = Indicador del mes considerado

La infiltración potencial ( $I_p$ ) es calculada a través de la Ecuación 2.13:

$$I_{p_j} = P_j - (P_j * C_{e_j})$$

Donde:

- $I_{p_j}$  = Infiltración potencial mensual, en mm.
- $P_j$  = Precipitación mensual promedio, en mm.
- $C_{e_j}$  = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional (también llamado  $K_{e_j}$ ).
- $j$  = Indicador del mes considerado.

## 2.10. Proyección de escenarios para la protección de manantiales

La conservación de los recursos hídricos implica no sólo llevar a cabo estrategias en el presente sino prever las que han de ejecutarse en el futuro. Requiere la adopción de una perspectiva de largo plazo que permita observar el desarrollo de los procesos hidrológicos. Es en esta circunstancia donde los escenarios se tornan indispensables para la conservación de los recursos hídricos.

Los escenarios se pueden definir como herramientas de planeación, cuyo fin es visualizar múltiples futuros (De León & Sánchez, 2017). Esta visualización del futuro permite definir acciones de protección para el largo plazo, que evitarán llegar a situaciones complejas y críticas en relación con los recursos hídricos.

De los tipos de escenarios existentes, se pueden citar dos: escenarios de cambio de uso del suelo y escenarios de la variabilidad climática (De León & Sánchez, 2017; Oviedo, 2010; Fernández, et al., 2014; Armenta, et al., 2015). En los primeros se pueden ver reflejados los cambios de las coberturas del uso del suelo, sobre todo por el incremento de la población y la concentración de ésta en zonas urbanas; mientras en los segundos se pueden notar los cambios de variables climáticas.

Los escenarios futuros resultan ser un elemento de importancia para poder hacer un diagnóstico de la posible variabilidad futura de los aspectos a considerar en las estrategias de protección de manantiales.

### **2.10.1. Escenarios de cambios del uso de suelo**

Los cambios en los usos del suelo juegan un papel fundamental en el desarrollo económico y social a escala local y regional, así como en la sostenibilidad regional. El estudio de su evolución permite el análisis de procesos medioambientales y sus problemas generados, tal como es el impacto del desarrollo urbanístico que puede contribuir al deterioro de la calidad ambiental (Gallardo, 2014).

El análisis del cambio de uso de suelo se puede realizar con la aplicación del Modelador de Cambios en el Terreno para el Sustento Ecológico llamada Land Change Modeler (LCM) (Eastman, 2016).

LCM es una aplicación vertical dentro del software de TerrSet orientada a problemas de presión del acelerado cambio de uso del suelo y a las necesidades específicas de la conservación de la biodiversidad. Esta aplicación proporciona un conjunto de herramientas para el análisis de cambios y la creación de planes y escenarios viables para el futuro. La interfaz LCM se organizan secuencialmente en torno a varias tareas principales:

1. Análisis de Cambios (Change Analysis): Analiza los cambios pasados de la superficie.
2. Potenciales de Transición (Transition Potentials): Modela el potencial para las transiciones de las cubiertas del suelo.

3. Predicción de Cambios (Change Prediction): Predice el curso de los cambios en el futuro.
4. Planificación (Planning): Evalúa la intervención de planificación para mantener la sostenibilidad ecológica (opcional).
5. Proyecto REDD (REDD Project): Estima las emisiones GHG de los proyectos REDD (Reducción de Emisiones de la Deforestación y la Degradación de los Bosques) (opcional).
6. Armonizar (Harmonize): Formatea los mapas de superficie para utilizarlos posteriormente en LCM (la pestaña sólo se abre cuando los mapas de la cobertura terrestre están mal formateados y no coinciden en sus características) (opcional).

Las tareas se presentan como una serie de paneles desplegable que se organizan en torno a un conjunto secuencial de operaciones. Algunas no son necesarias, son opcionales, por lo que prácticamente la predicción del cambio del uso del suelo en LCM se basa en tres tareas principalmente, pues estas cumplen con el objetivo de crear mapas de proyección para el futuro. Las tres tareas que se describen a continuación son: a) Análisis de Cambios, b) Modelación Potencial de Transición, y c) Predicción de Cambio.

### **1. Análisis de cambios (change analysis)**

En el análisis de cambio, se evalúan los mapas de cobertura del uso del suelo correspondientes a los dos años que se desea comparar. Los cambios que se identifican son transiciones de un estado de cobertura a otro y es importante identificar las transiciones dominantes que puedan agruparse en un submodelo. Cada grupo o submodelo de transiciones se puede modelar por separado, pero finalmente cada submodelo se combinará con todos los submodelos en la predicción de cambios final.

Los procesos de esta etapa se realizan a través de diferentes paneles:

- a) Parámetros del Proyecto o Sesión (Session Parameters),
- b) Análisis de Cambios (Change Analysis),
- c) Mapas de Cambios (Change Maps) y
- d) Tendencia Espacial del Cambio (Spatial Trend of Change)

**a) Parámetros del proyecto o sesión (session parameters)**

En este paso se crea el nuevo proyecto o sesión y se especifican los dos archivos de entrada correspondientes a los dos mapas de usos del suelo de los años a comparar. Los dos mapas se utilizan como base para comprender la naturaleza del cambio y como medio para establecer muestras de transiciones que deban ser modeladas. Los dos mapas deben tener fondos (backgrounds), leyendas (con categorías secuenciales, comenzando con 1) y características espaciales iguales (con la misma resolución y coordenadas). Si no se cumplen estos requisitos, se abrirá la pestaña Armonizar (Harmonize) para resolver esta situación.

En este panel existe la opción para especificar los parámetros del proyecto REDD para el modelado REDD. Esta opción permite la especificación de las fechas de inicio y final del proyecto, incluido el intervalo reportado. Establecer estos parámetros dictará la configuración para el proceso de predicción de cambio y los escenarios futuros para la etapa de modelado de REDD. Así mismo, existe la opción de ingresar un MDE y una capa de carreteras de base utilizadas en el desarrollo dinámicos de carretas (opcionales).

**b) Análisis de cambios (change analysis)**

Este panel proporciona tres opciones que permiten generar la evaluación rápida del cambio de cobertura del suelo entre los dos periodos a través de tres tipos de gráficas:

- a) Ganancias y pérdidas por categoría.
- b) Cambios netos por categoría.
- c) Persistencia o contribución al cambio neto experimentado de la transición de una categoría específica.

Los gráficos correspondientes se presentan en diferentes unidades: celdas, hectáreas, kilómetros cuadrados, acres, millas cuadradas, porcentaje de cambio y porcentaje del área.



### **c) Mapas de cambios (change maps)**

Este panel proporciona la capacidad de crear una variedad de mapas de cambios, incluyendo mapas de persistencia, de ganancias y pérdidas por categoría, y de transiciones e intercambios de mapas por categoría., estos se presentan en diferentes unidades.

### **d) Tendencia espacial del cambio (spatial trend of change)**

En paisajes dominados por la intervención humana, los patrones de cambio pueden ser complejos y, por lo tanto, difíciles de descifrar. Este panel proporciona la capacidad de mapear la superficie de tendencia polinómica que mejor se ajusta al patrón de cambios. Las tendencias pueden calcularse hasta el orden número 9. Este proceso es opcional y no es requisito para la etapa siguiente.

## **2. Modelador del potencial de transición (transition potential modeling)**

El segundo paso en el proceso de Predicción de Cambios es el Modelador del Potencial de Transición donde se identifica el potencial de la superficie para la transición. En esta etapa, se crean mapas de potencial de transición que, en esencia, son mapas de adecuación para cada transición.

En LCM, se organiza una colección de mapas de potencial de transición dentro de un submodelo de transición evaluado empíricamente y que tiene las mismas variables explicativas subyacentes. Un submodelo de transición puede consistir en una sola transición de cobertura de suelo o en un grupo de transiciones que tienen las mismas variables explicativas subyacentes. Estas variables explicativas se utilizan para modelar el proceso de cambios históricos. Por ejemplo, si se está modelando la deforestación en la agricultura, las variables a considerar serían las pendientes, la proximidad a las carreteras o la proximidad a áreas previamente deforestadas. Todos los submodelos de transición seleccionados deben modelarse antes de que se pueda realizar la predicción de cambio.

Las transiciones se modelan utilizando una de las siguientes funciones: una red neuronal de perceptrones multicapa (MLP), regresión logística o una herramienta de aprendizaje automático

basada en instancias de similitud medida (SimWeight). Una vez calibrado, el modelo es utilizado para predecir escenarios futuros. Esta etapa se realiza en diferentes tareas:

- a) Submodelos de transición: estado (Transition Sub-Models: Status).
- b) Utilidad de Transformación Variable (Variable Transformation Utility).
- c) Prueba y selección de variables de sitio y explicativas (Test and Selection of Site and Driver Variables).
- d) Estructura del submodelo de transición (Transition Sub-Model Structure).
- e) Activación del Sub-Modelo de Transición (Run Transition Sub-Model).

**a) Submodelos de transición: estado (transition sub-models: status)**

Dentro de LCM este panel muestra una tabla que incluye todas las transiciones que existen entre los dos mapas de cobertura del suelo (from y to) (excepto aquellas filtradas en el panel Change Analysis). Se especifican sólo aquellas transiciones que se usarán para evaluar los potenciales de transición (activando la opción Si-Yes). Esta tabla contiene tanto transiciones como submodelos, y se pueden agrupar ciertas transiciones asignando un nuevo nombre al submodelo que será evaluado (Sub-Model Name), en donde dichas transiciones agrupadas comparten los mismos determinantes explicativos subyacentes para la predicción. Esto dará como resultado un mapa potencial de transición para cada transición.

**b) Utilidad para la transformación de variables (variable transformation utility).**

El panel de utilidad de transformación variable es opcional y provee una selección de transformaciones utilizadas comúnmente. Las transformaciones disponibles incluyen varias opciones: probabilidad de evidencia (evidence likelihood), logaritmo natural (natural log), exponencial (exponential), logística (logit), raíz cuadrada (square root) y poder (power). Estos son particularmente fundamentales si se elige la opción de modelado por Regresión Logística (Logistic Regression), ya que requiere que las variables estén linealmente relacionadas con el potencial de transición.

En este trabajo se utilizó la opción de probabilidad de evidencia (evidence likelihood). La transformación de probabilidad de evidencia es un medio muy efectivo para incorporar variables

categorías al análisis. Para todos los tipos de modelos Regresión Logística, MLP y SimWeight las variables categóricas deben convertirse en un conjunto de variables booleanas (falsas) o transformarse utilizando la transformación de probabilidad de evidencia.

**c) Prueba y selección del sitio y variables explicativas (test and selection of site and driver variables)**

Este es un panel opcional que proporciona una prueba rápida del poder explicativo potencial de una variable. Esta es una prueba muy difícil y no reconoce los efectos de interacción. Si está utilizando la herramienta de Modelado Perceptron Multicapa (MLP), existe un procedimiento de evaluación mucho más sólido que se ha incorporado al proceso de desarrollo del modelo.

Una vez elegidos los submódulos de transición (en el panel Transition Sub-Models: Status) se hace una selección de variables explicativas. Para cada uno de los cambios de uso de suelo que se quieren simular, deben seleccionarse un número de variables cuyo patrón espacial manifieste algún tipo de comportamiento que puede tener relación con el patrón de localización de cada uno de los cambios de usos de suelo. Generalmente se recomienda tener entre 6 y 15 variables cuidadosamente elegidas por su capacidad potencial de explicar la ubicación de los cambios de usos de suelo. Estas variables se pueden denominar aptitud, o *suitability* y suelen consistir en variables biofísicas (pendiente, temperatura media anual, precipitación media anual) o socioeconómicas (proximidad a carreteras principales, proximidad a áreas residenciales, precio del suelo, proximidad entre los mismos usos de suelo).

La influencia de las variables puede evaluarse y medirse por la V de Cramer (Cramer's V). En general, las variables que tienen un valor V de Cramer de 0.15 o más se consideran como útiles, mientras que aquellas con valores superiores a 0.4 se consideran como buenas, ambas para ser agregadas al modelo. Esta evaluación muestra una tabla con las categorías de las coberturas (Cover Class), la V Cramer y el valor de P (P Value).

Un valor alto del test de la V de Cramer de todas las categorías en general indica que el potencial explicativo de la variable es bueno, pero no garantiza un buen rendimiento ya que no puede explicar los requisitos matemáticos del enfoque de modelado utilizado y la complejidad de la

relación. Esta es una herramienta rápida pero imprecisa; sin embargo, es una buena indicación de que una variable puede descartarse si el valor de V de Cramer es muy bajo (Eastman 2012).

Por su parte, el valor de P (P Value) expresa la probabilidad de que la V de Cramer no sea significativamente diferente de 0. Dado el gran tamaño de muestra que a menudo está involucrado, el valor de P es comúnmente 0 (hasta 4 lugares decimales). Esto supone que todos los píxeles se muestrean independientemente y no tienen dependencia espacial en sus valores. Por lo tanto, un valor bajo de P no es un buen indicador del valor de una variable, pero un valor alto es una señal segura de que puede rechazarse.

#### **d) estructura del submodelo de transición (transition sub-model structure)**

Dicho panel proporciona una tabla que especifica las variables explicativas que se han agregado (previamente en el Test and Selection of Site and Driver Variables) al submodelo de transición. Generalmente se recomienda tener entre 6 y 15 variables elegidas en función de su capacidad potencial explicativo, como se ha mencionado anteriormente.

Si se tiene más de un submodelo, se necesita identificar las variables explicativas para un submodelo y crear mapas de potencial de transición para cada uno. La tabla muestra las variables (Variable), el rol (Role), el tipo de capa base (Basis layer type) y la operación (Operation). Las variables pueden ser estáticas o dinámicas (Role). Las variables estáticas son variables de sitio que expresan aspectos de idoneidad básica para la transición bajo consideración, y no cambian con el tiempo. Las variables dinámicas son cambiantes en el tiempo, tales como la proximidad a desarrollos urbanos o infraestructura existente (carreteras) y se recalculan a lo largo del tiempo durante el transcurso de una predicción. En este trabajo, las variables utilizadas fueron estáticas (Role: Static, las columnas restantes Basis layer type y Operation quedan ausentes de datos). Una vez agregadas las variables al modelo, cada transición se modela en el panel siguiente.

#### **e) Activación del sub-modelo de transición (run transition sub-model)**

El panel para ejecutar el Submodelo de Transición es donde se implementa el modelado real de los submodelos. Se proporcionan tres metodologías para modelar: un Perceptrón Multicapa (MLP), un algoritmo del aprendizaje basado en instancias de similitud medida (SimWeight) y

Regresión Logística. En general, los procedimientos MLP y SimWeight funcionan mejor en las transiciones de modelado y, por lo tanto, son las más recomendamos. El MLP puede modelar múltiples transiciones al mismo tiempo, hasta 9 transiciones por submodelo, mientras que SimWeight y Regresión Logística sólo pueden ejecutar una a la vez. En esta investigación se utilizó el MLP.

Al calcular los potenciales de transición, el MLP empieza su proceso de entrenamiento con las muestras otorgadas de los píxeles que han experimentado o no la transición modelada. En esta instancia, MLP funciona en un modo especial de entrenamiento automático, el cual toma sus propias decisiones acerca de los parámetros a utilizar y cómo deberán ser cambiados para modelar mejor los datos. Este modo automático monitorea y modifica las tasas de aprendizaje inicial y final de un procedimiento de aprendizaje dinámico (Eastman, 2016).

Dicho procedimiento aprendizaje utiliza los datos de entrenamiento de muestra. Este procedimiento comienza con las tasas de aprendizaje inicial y lo reduce progresivamente a lo largo de repeticiones hasta alcanzar la tasa de aprendizaje final cuando se llega al máximo número de repeticiones. Si se detectan oscilaciones significativas en el RMS dentro de las primeras 100 iteraciones, las tasas de aprendizaje (inicial y final) se reducen a la mitad y el proceso se reinicia.

Todos los demás parámetros del MLP son utilizados en sus valores predeterminados normales. Sin embargo, LCM aplica modificaciones especiales a la información de salidas. Dado que se están modelando transiciones específicas, LCM oculta los potenciales de transición en todos los casos que no coinciden con el caso desde una transición específica. Por ejemplo, si la transición modelada es "del bosque" a la agricultura, los valores de salida en los mapas de potencial de transición solo existirán en las áreas forestales iniciales.

### **3. Predicción de cambio (change prediction)**

El tercer y último paso es la predicción de cambio. Utilizando las tasas históricas de cambio y el Modelo de Potencial de Transición, LCM puede predecir un escenario futuro para una determinada fecha futura. En su forma más simple, el modelo determinará cómo las variables influyen en los cambios futuros, cuántos cambios tuvieron lugar entre el tiempo 1 y el tiempo

2, y luego calculará una cantidad relativa de transición a la fecha futura. Para que el modelo sea más robusto, LCM permite la incorporación de restricciones e incentivos, tales como mapas de zonificación y cambios de infraestructura planificados, así como nuevas carreteras o mejoras de la cubierta terrestre. Las variables explicativas también pueden ser de naturaleza dinámica, por lo que a intervalos regulares intermedios se pueden volver a calcular y volver a ingresar al modelo. Por ejemplo, una de las variables explicativas puede ser la distancia de las áreas previamente deforestadas. Esta variable podría ser recalculada a intervalos regulares como transiciones en que la superficie del suelo pasa de bosque a agrícola. Esta etapa del proceso de LCM se ejecuta en 4 tareas:

- a) Modelador de la Demanda de Cambios (Change Demand Modeling).
- b) Desarrollo Dinámico de Carreteras (Dynamic Road Development).
- c) Distribución de Cambios (Change Allocation).
- d) Validación (Validation).

**a) Modelador de la demanda de cambios (change demand modeling)**

Este panel permite determinar la cantidad de cambio que ocurrirá en algún momento en el futuro usando el proceso de predicción de una Cadena Markov (Markov Chain) o en su caso, un modelo especificado por el usuario.

El procedimiento predeterminado, Cadena Markov, determina la cantidad de cambio utilizando los mapas de cobertura terrestre anterior y posterior junto con una fecha específica. El procedimiento determina la cantidad de superficie que se espera que transite a la fecha de predicción, basada en una proyección de los potenciales de transición hacia el futuro; además, crea un archivo de probabilidad de transición. El archivo de probabilidades de transición es una matriz que registra la probabilidad de que cada categoría de cubierta terrestre cambie a cada otra categoría. Alternativamente, puede especificar un archivo de probabilidad de transición desarrollado a partir de un modelo externo.

### **b) Desarrollo dinámico de carreteras (dynamic road development)**

Este panel establece los parámetros para el desarrollo dinámico de carreteras. El desarrollo dinámico de carreteras es un procedimiento que intenta predecir cómo se desarrollarán las carreteras en el futuro. El panel ofrece varias opciones, las cuales son Modo para el Desarrollo de Extremos (Mode of End-Point Generation) y Modo para el Desarrollo de Caminos (Mode of Route Generation).

### **c) Distribución de cambios (change allocation)**

En este panel se ejecutó el modelo (Run model) que predice los futuros escenarios con la fecha especificada anteriormente. Es opcional incluir el Desarrollo Dinámico de Carreteras (Dynamic Road Development), Cambio Dinámico de Infraestructura (Dynamic Infrastructure Changes) o agregar incentivos y restricciones en la predicción (constraints/Incentives). También se especifica el número de etapas de recálculo (Recalculation stages), es decir, esta opción controla qué cantidad de cambios debe ser distribuida a lo largo del proceso de predicción desde la última fecha de la imagen de cobertura del suelo hasta la fecha de predicción. Por defecto, una etapa de recálculo de 1 asignará totalidad de los cambios a la fecha de predicción. Al aumentar las etapas de recálculo, la cantidad de cambios será dividida linealmente en cada etapa durante el proceso de distribución. También se ofrece la opción de crear un video AVI (Create AVI video) especificando la tasa de velocidad y la opción de establecer el tipo de agrupación para la predicción blanda (Create soft prediction).

### **d) Validación (validation)**

Finalmente, la última tarea de esta tercera etapa Predicción de Cambios es la de Validación. Este panel permite determinar la calidad de la predicción de mapas de la cobertura del suelo en relación a un mapa de cambios.

## **2.10.2. Escenarios de la variabilidad climática**

Los escenarios de cambio climático son una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basados en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construyen para ser utilizados de forma explícita en la investigación de las consecuencias

potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirven a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos (INECC, 2017).

Los escenarios no representan pronósticos climáticos, sino que son una alternativa de cómo se puede comportar el clima futuro.

De acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC<sup>12</sup>), creado con la finalidad de evaluar la información científica, técnica y socioeconómica pertinente para la comprensión del riesgo de cambio climático inducido por los seres humanos, los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras (gases de efecto invernadero), y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero son el producto de muy complejos sistemas dinámicos, determinando por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico (IPCC, 2000).

Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación.

Entre 2013 y 2014 el IPCC (2014) se publicó el Quinto Informe de evaluación sobre escenarios de emisión (por sus siglas en inglés SRES), el cual, a diferencia del resto, hace más hincapié en la evaluación de los aspectos socioeconómicos del cambio climático y sus consecuencias para el desarrollo sostenible, los aspectos regionales, la gestión del riesgo y la elaboración de una respuesta mediante la adaptación y la mitigación.

En el Quinto Informe IPCC del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, se definió un nuevo conjunto de escenarios: las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés)

---

<sup>12</sup> El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Desde su creación, el IPCC ha producido una serie de completos Informes de Evaluación sobre el estado de nuestros conocimientos acerca de las causas del cambio climático, sus efectos potenciales, y las opciones en cuanto a estrategias de respuesta (IPCC, 2000).



Éstas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5W/m<sup>2</sup> (IPCC, 2013).

Las cuatro RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6), dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero GEI (RCP 8.5) (IPCC, 2013b) (Tabla 2.6).

El forzamiento radiativo es un proceso de alteración en el balance energético del sistema climático global, cada una de estas trayectorias cumpliría con diferentes concentraciones de carbono (CO<sub>2</sub>), debido a la cantidad de forzamiento radiativo contenido en cada uno de los escenarios.

Los escenarios climáticos estiman el forzamiento radiativo total calculado a partir del año de 1750 para diferentes escalas de tiempo hasta llegar al año 2100. En todas las RCP, las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> son más elevadas en 2100 respecto a la actualidad, como resultado de un mayor aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> acumuladas en la atmósfera durante el siglo XXI.

Unas emisiones iguales o superiores a las actuales inducirán cambios en todos los componentes del sistema climático, algunos de ellos sin precedentes en cientos o miles de años. La limitación del cambio climático requerirá reducciones sustanciales y sostenidas de las emisiones de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013).

Tabla 2.6. Características de los escenarios climáticos (IPCC, 2013b).

| Escenario climático | Forzamiento radiativo total (FR) | Tendencia del FR           | CO <sub>2</sub> en el año 2100 |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| RCP 2.6             | 2.6 W/m <sup>2</sup>             | Decreciente en el año 2100 | 421 ppm                        |
| RCP 4.5             | 4.5 W/m <sup>2</sup>             | Estable en el año 2100     | 538 ppm                        |
| RCP 6.0             | 6.0 W/m <sup>2</sup>             | Creciente                  | 670 ppm                        |
| RCP 8.5             | 8.5 W/m <sup>2</sup>             | Creciente                  | 936 ppm                        |

---

## CAPÍTULO 3.

# METODOLOGÍA

No existe un método estándar que indique los criterios a considerar para determinar la importancia de los manantiales a proteger, que además de los aspectos físicos naturales, contemple otros aspectos de tipo social que puedan influir y determinar la protección de una fuente de abastecimiento. Tampoco existe una recopilación sistemática de las estrategias ni métodos de protección que considere las características particulares de cada uno de los manantiales.

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados, se aplicó una serie de recursos metodológicos que consta de seis pasos (Figura 3.1). El manejo de la información se realizó mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizando los softwares ArcGis 10.3 e IDRISI TerrSet, de acuerdo al tipo de información, manejo y análisis.

### **3.1. Búsqueda, análisis y síntesis de la información bibliográfica y cartográfica**

Se llevó a cabo una búsqueda, análisis y síntesis de la información disponible sobre el tema de estudio. Las principales fuentes para la obtención de información fueron: revistas indexadas, libros, organismos públicos, tesis e informes, documentación en instituciones gubernamentales, y sitios web para la recopilación de información cartográfica.

Las instituciones consultadas han sido: Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México (SMA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la biodiversidad (CONABIO), Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM), Instituto Nacional de Estadística y Geografía

(INEGI), Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y United States Geological Survey (USGS), Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

La información cartográfica se obtuvo en distintos formatos: tabular, vectorial y raster (Tabla 3.1). Para la obtención de información cartográfica, la información base se convirtió de datos tabulares a vectoriales y/o raster según el uso; y se transformó del sistema de coordenadas geográficas NAD 1927, ITRF 1992 y WGS 1984 a coordenadas geográficas al sistema Universal Transversal de Mercator (UTM por sus siglas en inglés) UTM WGS 1984 Zona 14 Norte.

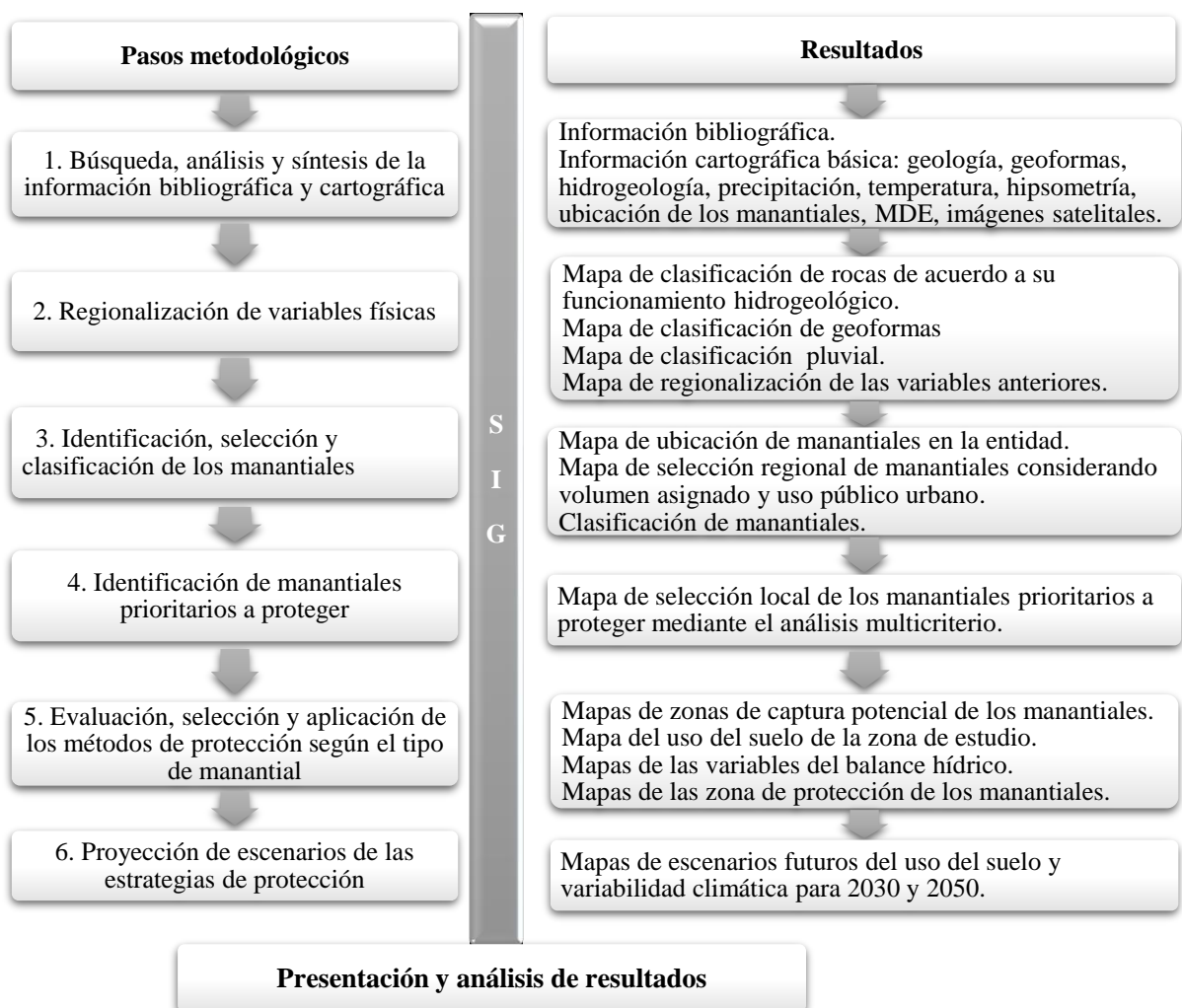


Figura 3.1. Secuencia del proceso metodológico

Tabla 3.1. Información cartográfica utilizada: tabular, vectorial y ráster.

| Tabular                                      | Vectorial  | Ráster   |
|--|--|--|
| a) Base de datos de manantiales.             | a) Provincias fisiográficas.                                 | a) Modelo digital de elevación (MDE).                        |
| b) Límites administrativos de los acuíferos. | b) Geología.   | b) Imágenes satelitales LANDSAT 8.                           |
| c) Censos de población                       | c) Límites político-administrativos estatales y municipales. | c) Temperaturas y precipitación mensual actual y escenarios. |
|  | d) Polígonos de localidades urbanas y de manzanas.           | d) Radiación solar mensual                                   |
|  | e) Tipo de suelo (textura)                                   |  |

Se utilizaron los SIG para la captura de información, el manejo y análisis de la misma, y la obtención de resultados mediante los softwares ArcGis 10.3 e IDRISI TerrSet.

La información tabular convertida a cartográfica fue:

- a) La ubicación de los manantiales se obtuvo de la base de datos del REPDA (2015) de aguas superficiales del Estado de México.
- b) Los límites administrativos de los acuíferos se consultaron en los estudios de disponibilidad de agua subterránea publicados en el Diario Oficial de la Federación (CONAGUA, 2015), con base en las coordenadas de los vértices de los límites administrativos.
- c) Los datos de población se obtuvieron de los censos y conteos de población nacional de INEGI (2016).

Los datos vectoriales obtenidos desde el punto de vista físico fueron:

- a) Provincias fisiográficas utilizadas a partir del mapa de provincias hidrogeológicas (INEGI, 2009).
- b) La geología obtenida a partir de datos vectoriales escala 1:250,000 (IFOMEGEM, 2014).

Los datos vectoriales desde el punto de vista sociopolítico fueron:

- a) Los límites político-administrativos estatales y municipales obtenidos de INEGI (2015).
- b) Polígonos de localidades urbanas y de manzanas obtenidos de INEGI (2015).
- c) El tipo de suelo obtenido de CONABIO (2009).

La información ráster fue:

- a) El MDE para representar el relieve topográfico.
- b) El mapa de pendientes obtenido a partir del MDE para definir las geoformas.
- c) Las imágenes de temperatura y precipitación mensual y promedio anual se obtuvieron de la base de datos generada por Ordoñez (2015) con datos de CLICOM (Clima Computarizado) de 1980 a 2010 (SMN, 2015).
- d) Las imágenes satelitales LANDSAT 5 y 8 con una resolución espacial de 30 metros, fueron obtenidas de la página web de Earth Explorer (USGS, 2016).
- e) Las imágenes de escenarios de temperaturas y precipitación mensual fueron obtenidas del CCAFS (2014).
- f) La radiación solar utilizada para el cálculo de evapotranspiración fue obtenida de CGIAR-CSI (2016).

### 3.2. Regionalización física del área de estudio

La regionalización con las variables físicas implicó la división del territorio estatal en áreas con características comunes que permitieron asociarlas a grupos de manantiales, para de este modo aplicar las metodologías que cumplieran con el objetivo (Figura 3.2).

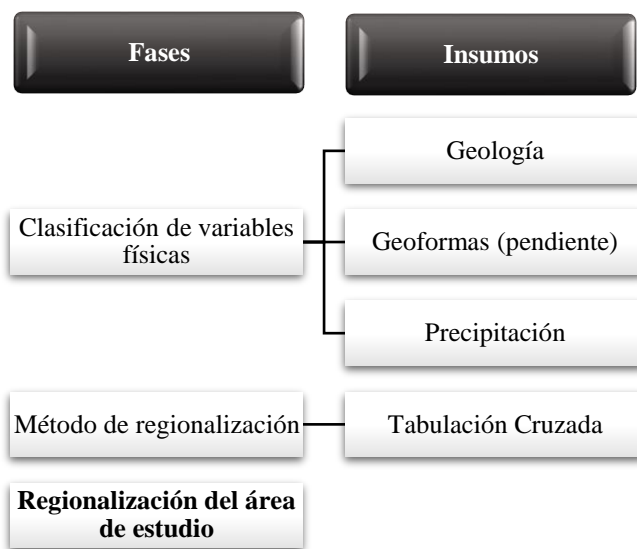


Figura 3.2. Proceso metodológico de la regionalización del área de estudio.

### 3.2.1. Variables utilizadas para la regionalización

Se regionalizó el área del Estado de México considerando principalmente sus características geológicas (tipo de roca de acuerdo con su funcionamiento hidrogeológico), geoformas (con relación a la pendiente del terreno) y precipitación, lo que permitió asociar conjuntos de manantiales a regiones con características similares. La información obtenida fue a partir de datos de IFOMEGEM (2014), del MDE, y Ordoñez (2015)-SMN (2015). La información resultante tipo vector fue convertida a ráster para el análisis.

#### 3.2.1.1. Geología

La información básica en este análisis fue la Carta Geológica del Estado de México escala 1:250,000. Se pudieron identificar los distintos tipos de roca: ígnea extrusiva (volcánica), ígnea intrusiva, sedimentaria y metamórfica e híbrida.<sup>13</sup>

Con base en estos tipos de rocas se determinaron las clases que mejor se adecuaron a los objetivos. Desde el punto de vista hidrogeológico se consideraron las principales características litológicas e hidrodinámicas de las rocas; de acuerdo a su permeabilidad se pudieron distinguir 4 tipos de medios: *fracturado*, *fracturado con posibilidad de carst*, *poroso sedimentario* y *poroso volcánico*.

- El medio *fracturado* corresponde a rocas volcánicas y metamórficas.
- El medio *fracturado con posibilidad de carst* corresponde a las rocas sedimentarias consolidadas (calizas).
- El medio *poroso sedimentario* corresponde a las rocas sedimentarias no consolidadas o también llamadas detríticas.
- El medio *poroso volcánico* corresponde a las rocas volcánicas granulares.

#### 3.2.1.2. Geoformas (pendiente del terreno)

Existen diversas fuentes de información para la clasificación de formas del terreno; varios estudios lo han hecho a partir de un MDE, empleando variables geomorfométricas tales como:

---

<sup>13</sup> Las rocas híbridas son consideradas en su mayoría como rocas metamórficas.

aspecto, pendiente, curvatura, rugosidad, índice de posición topográfica (TPI), entre otros (Weiss, 2001; Jenness, 2006; Genchi et al., 2011; Navarro et al., 2012). Para este estudio, se hizo el cálculo de la pendiente del terreno asociándolas a distintas geoformas existentes.

La pendiente, definida como la tasa de cambio de cada celda respecto de sus vecinas, se calculó en grados mediante el empleo del módulo *surface* (superficie) opción *slope* (pendiente) en IDRISI TerrSet. El módulo *surface* calcula (entre otras opciones) la pendiente para una celda, basada en la resolución y los valores de las celdas vecinas inmediatas de la parte superior, inferior, izquierda y derecha de dicha celda (Eastman, 2016). La pendiente es calculada como el vector resultante de la pendiente en X y la pendiente en Y (Ecuación 3.1):

$$\tan\_slope = \sqrt{\left(\frac{right - left}{res * 2}\right)^2 + \left(\frac{top - bottom}{res * 2}\right)^2}$$

Donde *tan slope* es el tangente del ángulo que tiene la máxima pendiente; izquierda, derecha, arriba y abajo son los atributos de las celdas vecinas; y *res* es la resolución de la celda. *Tan\_slope* multiplicado por 100 da un resultado de salida en % del gradiente y *Arctan (Tan\_slope)* da un resultado de salida en grados.

Una vez obtenidas las pendientes se hizo una clasificación asociada a la terminología de las geoformas empleada en la propuesta de Navarro et al. (2012). Esta clasificación se utilizó debido a que fue la que mejor se adaptó a esta investigación, de tal modo que se definieron los tipos de geoformas agrupando a los rangos de pendiente en tres clases básicas: *planicie* ( $0^{\circ}$ - $5^{\circ}$ ), *pedemonte* ( $5^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ) y *sierras* ( $>15^{\circ}$ ) (Tabla 3.2).

Las tres clases de pendientes se asociaron a las geoformas correspondientes, debido a que generalmente marcan una diferenciación en el funcionamiento hidrogeológico, pues la surgencia de un manantial se puede asociadas a las diferentes pendientes del terreno, tal como a zonas planas y pequeños lomeríos, piedemontes y zonas de montañas.

Tabla 3.2. Clasificación de geoformas considerando la pendiente en términos de su funcionamiento hidrogeológico. Modificación de Demek (1972) en Navarro et al. (2012).

| Categoría | Terminología de pendiente | Terminología de la geoforma   | Terminología de la geoforma propuesta |
|-----------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 0 - 2°    | Plano (planicie)          | Planicie                      | Planicie                              |
| 2° - 5°   | Ligeramente inclinado     | Planicie inclinada (lomeríos) |                                       |
| 5° - 15°  | Fuertemente inclinado     | Piedemonte                    | Piedemonte                            |
| 15° - 35° | Muy inclinado             | Ladera de montaña             | Relieve abrupto, Sierra               |
| 35° - 55° | Precipitoso               | Relieve abrupto               |                                       |
| 55° - 90° | Vertical                  | -                             |                                       |

### 3.2.1.3. Precipitación

Con base en los datos de precipitación se hizo un análisis de la precipitación anual, con la finalidad de analizar espacialmente la variabilidad pluvial. La imagen de precipitación promedio anual se obtuvo de la base de datos generada por Ordoñez (2015). Cabe mencionar que el proceso de generación de las imágenes de superficie de precipitación realizado por el autor se llevó a cabo a partir de las bases de datos de CLICOM (Clima Computarizado) proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2015) en donde se seleccionaron 1723 estaciones climatológicas en la zona de influencia de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago para el periodo que transcurre de 1960 a 2010 a nivel mensual y se interpoló la información con el método Spline, a través del software ANUSPLIN (Ordoñez, 2015).

A partir de esa información, y para fines de la presente investigación, se generó una imagen de precipitación promedio anual para el periodo de 1980 a 2010 y se recortó a la zona de estudio del Estado de México.

Con base en la propuesta de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Zuñiga, 2011) la cantidad de lluvia que cae anualmente se puede categorizar en varios rangos. Para fines de la regionalización en el área de estudio se pudieron identificar tres zonas con diferentes patrones de lluvia: *lluvias abundantes, suficientes y escasas* (Tabla 3.3).



Tabla 3.3. Clasificación de la precipitación anual de acuerdo con la OMM.

| Precipitación (mm/año) | Clasificación de lluvias |
|------------------------|--------------------------|
| 0 - 200                | Insuficiente             |
| 200 - 500              | Escasa                   |
| 500 - 1000             | Suficiente               |
| 1000 - 2000            | Abundante                |
| > 2000                 | Excesiva                 |

Fuente: (Zuñiga, 2011)

Con estas variables se procedió a la regionalización del área de estudio, lo que permitió establecer regiones lo más homogéneas posibles para determinar más adelante los manantiales más representativos de cada región y dar prioridad a los que más protección requieren.

### 3.2.2. Método de regionalización

La regionalización se llevó a cabo mediante el método de Análisis de Tabulación Cruzada para conocer la información contenida en cada grupo, realizado con el módulo *CrossTab* en el software IDRISI TerrSet.

El módulo CROSSTAB realiza una tabulación cruzada en donde se comparan las imágenes que contienen variables categóricas. Esta técnica es un proceso estadístico que se utiliza frecuentemente para obtener información sobre los cambios que ocurren en distintas fechas en un determinado sitio, de las cubiertas forestales y vegetales, por ejemplo (Castro & Castillo, 2004); en este caso fue utilizado para la sobreposición de las variables categóricas (Figura 3.3).

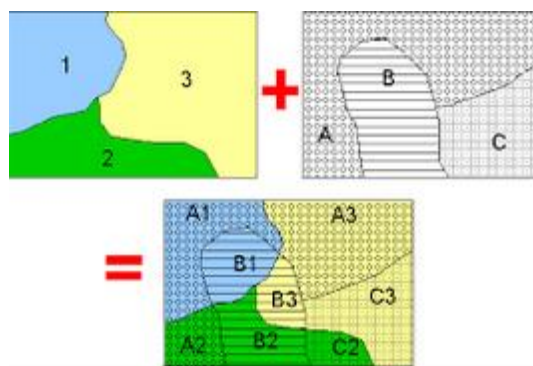


Figura 3.3. Esquema del proceso del método de Análisis de Tabulación Cruzada.

En la tabulación cruzada (CROSSTAB) se asignó un número a cada una de las categorías de cada variable para la obtención de la regionalización, dando como resultado una imagen en la que cada píxel muestra la combinación de las categorías de las imágenes que se comparan: es decir, un mapa donde se señalan nuevas unidades, como resultado de todas las combinaciones posibles entre el número total de clases de las variables (geología, geoformas, precipitación).

### 3.3. Identificación, selección regional y clasificación de los tipos de manantiales

Esta etapa metodológica constó de 3 fases. La finalidad de esta etapa fue identificar y asociar grupos de manantiales a las regiones previamente realizadas; a partir de estas, seleccionar los manantiales más representativos por región, considerando el uso de agua para consumo humano y su volumen de agua asignado; y finalmente clasificarlos de acuerdo a sus características físicas (Figura 3.4)

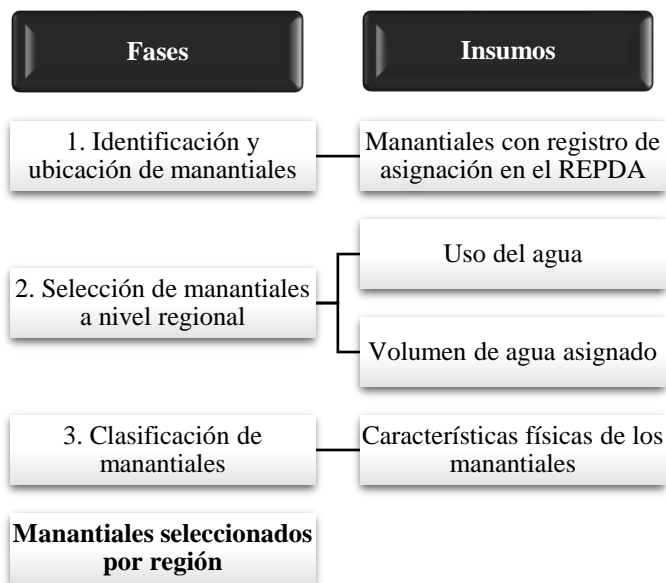


Figura 3.4. Secuencia metodológica para la selección regional de manantiales.

### 3.3.1. Identificación y ubicación de manantiales

Los manantiales del Estado de México fueron identificados y ubicados en un mapa a partir de la base de datos de concesiones del REPDA (2015),<sup>14</sup> además de que se sistematizó la información.

Se contempló trabajar con la base de datos del REPDA (2015) la cual contiene información de los manantiales con títulos de asignación de 68 municipios del Estado, para que una vez regionalizado el territorio estatal se procediera a elegir los manantiales que tienen mayor necesidad de protección. La información obtenida en esta base de datos fue la siguiente:

- a) Titular (usuario)
- b) Título de concesión
- c) Uso
- d) Fecha de registro
- e) Anexo (número de aprovechamientos concesionados)
- f) Volumen de asignación de agua (m<sup>3</sup>/año)
- g) Municipio
- h) Región hidrológica
- i) Cuenca
- j) Fuente
- k) Afluente
- l) Coordenadas geográficas

### 3.3.2. Selección de manantiales a nivel regional

Una vez ubicados los manantiales, se vincularon con la regionalización previa, para de este modo asociar sus características a regiones específicas.

Se dio prioridad a los manantiales del uso público urbano debido a su importancia como fuentes de abastecimiento de agua potable (tanto de localidades urbanas como rurales); además se

---

<sup>14</sup> Los títulos de asignación de agua subterránea tienen fecha de registro de 1994 al 2014.

consideraron los de mayor volumen de asignación porque tiene una relación directa con la cantidad de población abastecida.

Esta fase, además de contar con el trabajo de gabinete contó con trabajo de campo para verificar las características de los manantiales. Esta contó tres tareas:

**a) Planificación de la visita a los manantiales seleccionados**

El trabajo de campo es considerado un proceso, una secuencia de acciones, de comportamientos y de acontecimientos, no todos controlados por el investigador. El trabajo de campo suele referirse al periodo y el modo que la investigación cualitativa dedica a la generación y registro de información (Monistrol, 2007).

Hay diferentes fases de la investigación en relación con el trabajo de campo, distinguiendo cuáles son previas, cuáles se realizan durante el trabajo de campo y las tareas del investigador después del campo; en este sentido, para conocer las características de los manantiales seleccionados a nivel regional se realizó lo siguiente:

- Se buscó información relacionada con la ubicación de los manantiales para la elaboración de un itinerario, planeación de rutas y conocimiento de las distancias.
- Se programaron las visitas a los manantiales con los Ayuntamientos y Organismos Operadores de agua potable (asignatarios de agua del uso público-urbano).

**b) Caracterización de los manantiales visitados en campo**

Para conocer las características físico-sociales de los manantiales se realizaron dos campañas de trabajo de campo para reconocimiento y muestreo de los manantiales: la primera llevada a cabo en los meses de abril, julio y agosto de 2016 (etapa de selección regional) y la segunda en los meses de abril, julio y noviembre de 2017 (etapa de selección de manantiales prioritarios para su protección). Para dicho reconocimiento:

- Se elaboró una ficha de las características de los manantiales para la generación de información, basada en la modificación de la ficha descriptiva oficial de CONAGUA citada en Silva, et al. (2016) (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Ficha descriptiva en términos de operación y conservación de manantiales. Modificado de la ficha oficial de la CONAGUA.

| <b>Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización</b>   |  |  |   |
|---|--|--|---|
| <b>1. Localización</b><br>Nombre del manantial:<br>Municipio:<br>Localidad o paraje:<br>Coordenadas    Latitud N                      Longitud W<br>Altitud<br>Nombre del río/arroyo que origina (si procede):  |  | En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:   |   |
| <b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br><br>Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea:<br><br>Naturaleza de las rocas por donde se supone circula el agua subterránea:<br>Rocas ígneas<br>Rocas sedimentarias<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Depósitos aluviales<br>Depósitos lacustres<br>Otros _____ | <b>3. Tipo de surgencia</b><br>Manantial<br>Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br>Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br>Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br>Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br>NS/NC | <b>6. Uso del agua</b><br>Abastecimiento urbano<br>Abastecimiento industrial<br>Riego (indicar) _____<br>Rural ganadero<br>Sin uso<br>Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br>NS/NC _____  | <b>7. Comportamiento del caudal</b><br>No se agotan nunca<br>Se agota excepcionalmente<br>Se agota con frecuencia<br>Prácticamente siempre agotado<br>NS/NC _____   |
| <b>4. Descripción</b><br>(Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)   | <b>5. Instalaciones asociadas</b><br>Fuente urbana<br>Fuente rural<br>Lavadero<br>Abrevadero<br>Tanque de regulación<br>Área recreativa (albercas)<br>Planta de envasado<br>Balneario<br>Ninguna<br>Otras (indicar) _____<br>NS/NC   | <b>8. Acceso</b><br>Sin restricciones, ni dificultad<br>Sin restricciones, pero complicado<br>Con restricciones<br>Con autorización y permiso  | <b>9. Estado de conservación del manantial</b><br>Deficiente<br>Aceptable<br>Bueno<br>Muy bueno<br>NS /NC   |
| <b>12. Uso del suelo circundante</b><br>Urbano<br>Industrial<br>Rural<br>Riego (indicar) _____<br>Bosque<br>Sin uso<br>Otros (indicar) _____<br>NS/NC   | <b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br>Pozos (indicar) _____<br>Manantiales (indicar) _____   | <b>10. Valores sectoriales</b><br>(marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br>Científico / didáctico<br>Medicinal<br>Paisajístico / pintoresco<br>Medio ambiente<br>Recreativo / turístico / uso público<br>Histórico / sociocultural<br>Económico<br>Arraigo / aprecio popular<br>Otro (indicar) | <b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br>Ninguna<br>Contaminación (indicar tipo)<br>_____<br>Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br>Abandono, suciedad y vertidos<br>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br>Usos inadecuados y/o desordenados (indicar)<br>Otros (indicar)<br>NS/NC |
|   |  | <b>14. Tipo de manantial</b>   | <b>Parámetros fisicoquímicos</b>  |

- Se verificó la ubicación de los manantiales y se observaron las características del contexto geográfico y económico social.

- Se hizo la medición de parámetros fisicoquímicos tales como la temperatura del agua, pH, Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Totales Disueltos (STD), Salinidad y Potencial Redox (ORP).
- Se sistematizó la información para proceder a su análisis e interpretación de resultados preliminares y corroborarla con la información generada en gabinete.
- Se tomaron muestras de rocas de los sitios de los manantiales, las cuales fueron llevadas al Laboratorio de Geología de la Facultad de Geografía de la UAEM para su análisis y definir el medio rocoso que caracteriza la surgencia de dichos manantiales.

### c) Equipos y materiales utilizados en el trabajo de campo

Para medición de parámetros fisicoquímicos in situ se empleó un equipo multiparamétrico OrionStar A329 con electrodos de pH (potencial de Hidrógeno), Conductividad Eléctrica y ORP (Potencial Redox). Cada uno de los electrodos fue calibrado en campo con estándares preestablecidos. En el caso del electrodo de la conductividad eléctrica, la calibración se efectuó con soluciones estándar (NaCl) de 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 12.9  $\text{mS}/\text{cm}$ ; el electrodo del pH fue calibrado con soluciones buffer de pH 4.01, 7.01 y 10.01 (a 20 °C). Cada uno de los electrodos midió distintos parámetros (Tabla 3.5).

La precisión en las medidas de temperatura es de  $\pm 0.5$  °C, en la conductividad eléctrica es de  $\pm 1$  % del fondo de escala (a 25°C) y en el pH de  $\pm 0.01$  unidades de pH.

Tabla 3.5. Parámetros medidos por los electrodos de pH, Conductividad Eléctrica y ORP.

| Electrodo de pH                | Electrodo de conductividad eléctrica   | Electrodo de ORP                           |
|--------------------------------|--|--|
| a) pH (potencial de Hidrógeno) | a) Conductividad Eléctrica en microsiemens/cm (C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).<br>b) Temperatura del agua en grados centígrados (°C).<br>c) Sólidos Totales Disueltos en partes por millón (S.T.D. en ppm).<br>d) Salinidad en unidades prácticas de salinidad (psu) | a) Potencial Redox en milivoltios (ORP mV) |

### **3.3.3. Clasificación de los manantiales**

Una vez verificadas en campo las características de los manantiales, estos se clasificaron unificando las clasificaciones propuestas por varios autores (Kreye et al., 1996; Kresic, 2010b, Gil, 2015, OPS, 2004). La clasificación contempló la carga hidráulica (manantiales de gravedad o descendentes y artesianos o ascendentes), geología (manantiales en abanico aluvial, cársticos y volcánicos), funcionamiento hidrogeológico y tipo de descarga (medios fracturados, porosos y cársticos), caudal (permanente, intermitente), temperatura y calidad del agua (manantiales calientes, termales y no termales). De esta manera se pudieron identificar las diferencias y semejanzas entre las características de los manantiales asociadas a las regiones.

### **3.4. Selección de manantiales prioritarios con la aplicación del MCE**

Una vez verificadas las características de los manantiales, para seleccionar aquellos manantiales con mayor necesidad de protección a nivel local se aplicó el análisis multicriterio (MCE).

El análisis multicriterio establece un procedimiento sistemático que ayuda a elegir la alternativa más conveniente y satisfactoria en una investigación de acuerdo al objetivo abordado (Weng, 2005).

La aplicación del MCE para el Estado de México implicó la generación de varios mapas de los criterios definidos de acuerdo con la información disponible. Este proceso fue realizado en la versión IDRISI TerrSet con el módulo Spatial Decision Modeler (SDM) en el cual se ingresan los módulos correspondientes a la ejecución del MCE. Los pasos de la aplicación de este método fueron cinco ( Figura 3.5).

#### **3.4.1. Definición del objetivo**

El objetivo fue identificar los manantiales que sirven como fuente de abastecimiento para el uso público con mayor prioridad de protección frente a la calidad y cantidad de agua, considerando tanto su contexto físico como social en el Estado de México.

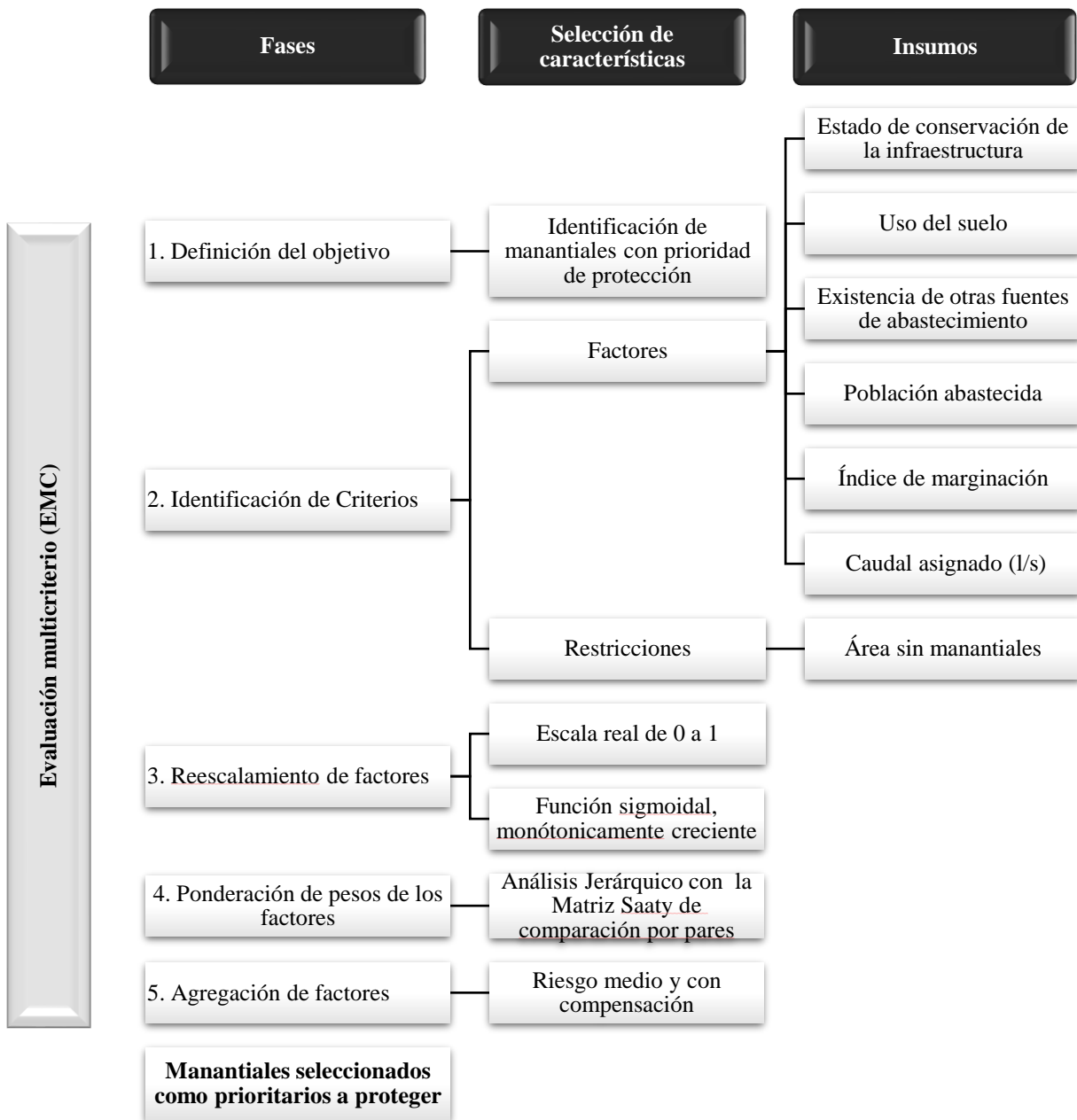


Figura 3.5. Secuencia metodológica para la selección de manantiales prioritarios para su protección utilizando el EMC.

### 3.4.2. Identificación de criterios

A partir de la información disponible de los manantiales seleccionados regionalmente, se identificaron los criterios para definir la prioridad de protección.



Como se mencionó anteriormente, son dos los tipos de criterios en el análisis multicriterio: los factores y las restricciones.

Los *factores* intentan reflejar la presión de la población sobre el recurso hídrico subterráneo, involucra las situaciones en las que el hombre puede afectar su calidad y cantidad, por tal razón se identificaron criterios que fueron valorados y finalmente se eligieron lo que tuvieron mayor influencia sobre el objetivo; dichos criterios fueron seis:

1. Estado de conservación de la infraestructura del manantial
2. Uso del suelo
3. Existencia de otras fuentes de abastecimiento
4. Población abastecida
5. Índice de marginación
6. Caudal asignado de agua (l/s)

Por otro lado, la *restricción* fue el criterio que excluye áreas del análisis, en esta investigación fue aquella área que no correspondió a los manantiales.

### **1. Estado de conservación de la infraestructura del manantial**

El estado de conservación de la infraestructura del manantial (para abastecimiento público urbano) tiene que ver con el estado en que se encuentra el manantial y/o la infraestructura en la que se capta y protege el agua.

Los manantiales son susceptibles de contaminación necesitando cuidado para mantenerlos en condiciones sanitarias. Con este fin se deberán tomar en cuenta dos elementos básicos para la conservación del manantial: a) la caja de captación y, b) el cercado o límite perimetral (figura 3.3; figura 3.4; tabla 3.7).

- a) La caja de captación, o llamada también tanque de captación, es una estructura de concreto que sirve para proteger al manantial y recolectar el agua para abastecer a la población. Debe cumplir con las especificaciones de estructuras apoyadas de concreto para almacenamientos de líquidos en lo referente a ubicación, encofrados y concretos (OPS, 2004).

Sedimentos, hojas, animales muertos y otras cosas pueden acumularse en los tubos y en la caja de captación, y pueden bloquear los tubos o contaminar el agua, para lo cual debe examinarse constantemente la infraestructura. Además, cuando el manantial está a cielo abierto también puede presentar maleza, yerbas, piedras, basura u otros objetos que pueden contaminar el agua o impedir la circulación del agua hacia los tubos de conducción (Conant & Fadem, 2011).

- b) El cercado es un límite (perímetro) alrededor de la caja de captación que debe ser preservada como protección a la contaminación (OPS, 2004). Es un área de acceso restringido, donde se permiten únicamente actividades relacionadas con la extracción y aprovechamiento del agua y donde no se permite construcción de ningún tipo, y se busca evitar la entrada de animales y vehículos que pueden producir roturas en la infraestructura, así como contaminación. El cercado puede ser tanto de cemento (bardeado) como de malla. Esta zona es llamada área de máxima protección (García, 2011).

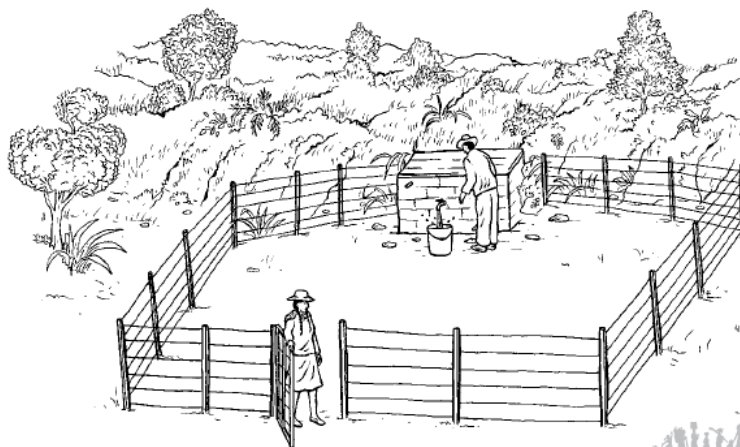


Figura 3.6. Captación de manantial de ladera concentrado con caja de captación y cercado (Conant & Fadem, 2011).

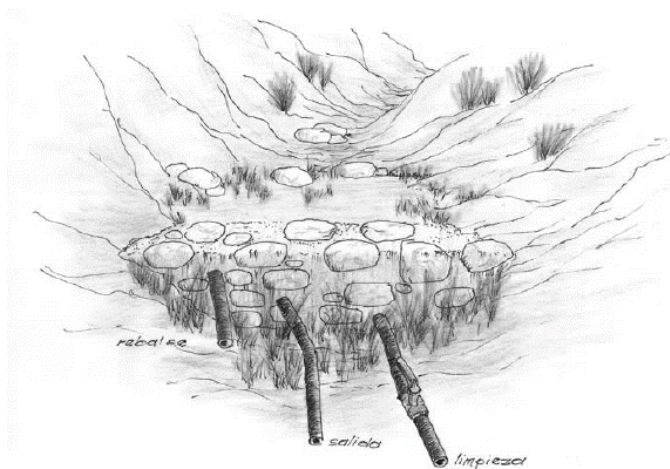


Figura 3.7 Captación de manantial de ladera concentrado descubierto (García, 2011).

Tabla 3.6. Estado de conservación del manantial de la infraestructura.

| Estado de conservación | Descripción   |
|------------------------|---|
| 1. Muy bueno           | Con cercado; con caja de captación tapada; sin presencia de cuerpos sólidos, maleza o basura.   |
| 2. Bueno               | Sin cercado; con caja de captación tapada; sin presencia de cuerpos sólidos maleza o basura.<br>Se pueden considerar aquellos manantiales que están cercados y que no están tapados, pero no presentan basura, cuerpos sólidos o maleza.                                  |
| 3. Aceptable           | Con o sin cercado; con caja de captación tapada o destapada; con presencia de cuerpos sólidos, basura o maleza.<br>Un cercado frágil y/o una caja de captación destapada puede permitir fácilmente la entrada de cuerpos sólidos, basura o maleza a la captación de agua. |
| 4. Deficiente          | Sin o con cercado frágil e insuficiente; sin caja de captación, a cielo abierto; con presencia de cuerpos sólidos y basura o maleza. El cercado frágil permite fácilmente la entrada de cuerpos sólidos y/o basura.   |

## 2. Uso del suelo

A las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal se les conoce como uso del suelo (INECC, 2012).

En los lugares donde no ha habido modificación o ésta ha sido ligera, el suelo sigue cubierto por la vegetación natural y se le considera como primaria; en contraste, si ha ocurrido alguna perturbación considerable y se ha removido parcial o totalmente la cubierta vegetal primaria, la vegetación que se recupera en esos sitios se conoce como secundaria y puede ser estructural y funcionalmente muy diferente a la original. El caso extremo de transformación es cuando se

elimina por completo la cubierta vegetal para dedicar el terreno a actividades agrícolas, pecuarias o zonas urbanas; éstas se conocen como coberturas antrópicas (INECC, 2012).

Conocer el uso del suelo en el área donde se ubica el manantial, permite identificar, clasificar y categorizar las fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas aguas arriba, en donde se deberán considerar diferentes niveles de protección (Tabla 3.7).

El impacto del uso de suelo sobre el recurso y fuentes de agua no es el mismo, sobre todo de aquellos que han sido producto de actividades antrópicas. Generalmente el uso agrícola es el de mayor impacto contaminante por la cantidad de productos tóxicos como los fertilizantes.

De los dos tipos de contaminación (difusa y puntual), el uso agrícola está considerado como un tipo de contaminación difusa, ya que puede tardar desde días hasta meses para llegar a los niveles freáticos dependiendo la capacidad de autodepuración del suelo, así como también pueden transitar en la dirección del flujo del agua desde la zona de contaminación hasta varios kilómetros en donde se tengan fuentes de agua, dependiendo del producto utilizado. De este modo, la renovación natural de la calidad del agua subterránea será a mediano o largo plazo y la población abastecida se verá afectada.

Tabla 3.7. Uso del suelo.

| Uso del suelo | Descripción   |
|---------------|---|
| 1. Bosque     | Representa las áreas en donde prevalece una alta densidad de vegetación y donde prácticamente no se ha dado la intervención de actividades agrícolas y urbanas. Incluye también las áreas temporáneamente desprovistas de árboles debido a talas realizadas como parte de prácticas de ordenación forestal o por causas naturales, las cuales se espera se regeneren en años posteriores (Arellano, et al., 2009; FAO, 2012). |
| 2. Urbano     | Corresponde a aquellas zonas en donde se han establecido núcleos de población y en donde la densidad de la misma es relativamente importante. Implica la distribución espacial de la tierra para fines específicos urbanos, habitacional, cívico, comercial, industrial, administrativo, recreativo, para equipamiento urbano (Arellano, et al., 2009).   |
| 3. Agrícola   | Son áreas en donde se ha presentado cultivo extensivo de plantaciones y un uso intensivo del suelo cuyo propósito son fines comerciales. Se incluyen formaciones de árboles en sistemas de producción agrícola, tales como plantaciones de árboles frutales y sistemas agroforestales con cultivos bajo una cubierta forestal (Arellano, et al., 2009; FAO, 2012).  |
| 4. Pastizal   | Se trata de vegetación con predominio de especies pioneras, con algunos árboles remanentes de las actividades anteriores o del bosque original. En su lugar la vegetación existente se refiere a pequeños arbustos, maleza y pasto, con una elevada cantidad de agua. Estas áreas no son explotadas en relación a algún tipo de cultivo (Arellano, et al., 2009).   |

El tipo de contaminación puntual es producto de las zonas urbanas, generada por las fosas sépticas y fugas de drenaje, en donde el suelo permite o no la contaminación hacia el acuífero. Por su parte los bosques, contribuyen a ser zonas de recarga que favorecen a la alimentación de los acuíferos y los pastizales a que se mantenga el estado natural del medio.

### **3. Existencia de fuentes alternas de abastecimiento**

Una fuente de agua subterránea puede ser un manantial aprovechado, un pozo de bombeo, u otro tipo de punto de extracción de agua subterránea para los distintos usos de agua (Goldscheider, 2010).

El uso para abastecimiento público incluye la totalidad del agua distribuida a través de las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a las diversas industrias y servicios conectados a dichas redes (CONAGUA, 2007).

Las diferentes fuentes de agua constituyen el elemento primordial en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable. Pueden ser una o varias captaciones, entre pozos y manantiales, para que en conjunto se obtenga la cantidad de agua necesaria destinada a la demanda de una comunidad.

La insuficiencia y mala gestión de las fuentes de agua puede limitar el suministro de agua potable. De ser afectada tanto la cantidad como la calidad del agua, la población a la cual se abastece se verá también perjudicada en sus actividades y en el consumo de agua, ya que no se puede dotar de agua si no hay caudales suficientes y si no se cumplen con la calidad para agua potable. Por ejemplo, en caso de cortarse el suministro de agua (por alguna causa técnica) o de contaminarse, la población no podrá dotarse de agua suficiente, afectando tanto la salud humana como sus actividades.

De este modo, dependiendo del número de fuentes que abastecen a una población será el grado de prioridad para la protección. Las poblaciones que tienen como única fuente un manantial tendrán mayor prioridad de protección sobre aquellas poblaciones que tienen dos o más fuentes de agua (ya sea otro manantial o algún pozo) que puedan alternar el suministro y satisfacer la demanda de agua requerida (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Existencia de fuentes alternas de abastecimiento.

| Fuentes alternas | Descripción  |
|------------------|--|
| Si               | La población a la que abastece el manantial cuenta con otras fuentes de agua, ya sean pozos u otros manantiales o alguna otra captación de agua superficial. |
| No               | La población a la que abastece el manantial son únicas fuentes de abastecimiento (no cuenta con ninguna otra fuente de agua).                                |

#### 4. Población abastecida

La población abastecida es aquella a la que se le suministra agua potable en la cantidad y calidad necesaria para su uso y consumo. Este indicador se refiere al número de habitantes.

El proceso de concentración de la población en las localidades urbanas es resultado de su acelerado crecimiento, lo que implica fuertes presiones sobre el medio ambiente y las instituciones, derivadas de la demanda incrementada de servicios, razón por la cual una mayor cantidad de población abastecida tendrá mayor prioridad de protección por la demanda de agua (CONAGUA, 2012).

Esto no deslinda el hecho de que una población con menor número de habitantes no tenga importancia a la hora de proteger la fuente, sino que sería menos prioritaria.

Sin embargo, en este trabajo, para elegir los manantiales con mayor prioridad de protección se le dio mayor peso a aquellos manantiales que dotan de agua a las poblaciones con mayor número de habitantes, en el supuesto ya sostenido: a mayor población, mayor demanda de agua.

#### 5. Índice de marginación de la población abastecida

El índice de marginación es una medida-resumen que permite diferenciar unidades territoriales a diferentes escalas, según el impacto global de las carencias que padece la población, como resultado de la falta de acceso a la educación, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios insuficientes y las relacionadas con la residencia en localidades pequeñas (CONAPO, 2006)

El índice de marginación es una medida de las condiciones socioeconómicas que permiten medir formas de exclusión social. En este sentido, los valores numéricos de los índices de marginación

se traducen en niveles de calificación conocidos como grados de marginación: muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo (Tabla 3.9). Éstas pueden estar vinculados a los grados de vulnerabilidad ante situaciones de riesgo natural o antropogénico de la población, sus pertenencias o sus actividades económicas.

Si se asume que, a mejor condición socioeconómica de la población, menor vulnerabilidad ante un peligro o amenaza y mayor capacidad de respuesta, entonces el índice o el grado de marginación puede convertirse en un buen indicador de vulnerabilidad socioeconómica de la población.

El grado de marginación tiene una relación con el acceso de agua potable, cultura del agua, y la gestión para tener agua en cantidad y calidad necesaria. Por ejemplo, un mayor índice de marginación puede repercutir en la ausencia de agua entubada que perjudica la salud y potencia la presencia de enfermedades gastrointestinales, dérmicas y respiratorias; y además dificulta las labores domésticas; así mismo, la necesidad de allegarse del recurso desde grandes distancias puede consumir grandes cantidades de trabajo familiar o energía para la conducción de agua (suministro por bombeo).

En el caso de la residencia en localidades pequeñas (menos de 5000 habitantes), que en muchos casos se encuentran dispersas y aisladas, se asocia a la carencia de servicios básicos como disponibilidad de agua, drenaje, servicio sanitario, electricidad y a la inaccesibilidad a servicios educativos, lo cual repercute en los ingresos percibidos por la población y en consecuencia en su bienestar (CONAPO, 2006)

Tabla 3.9. Índice y grado de marginación.

| Índices de marginalidad | Grado de marginación |
|-------------------------|----------------------|
| 0.73866, 2.25073        | 1. Muy alta          |
| -0.01738, 0.73866       | 2. Alta              |
| -0.39539, -0.01738      | 3. Media             |
| -1.15143, -0.39539      | 4. Baja              |
| -1.52944, -1.15143      | 5. Muy baja          |

## 6. Caudal asignado de agua (l/s)

La explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales se puede realizar a través de los títulos otorgados por el Estado para la concesión o asignación de agua. La concesión es otorgada a las personas físicas o morales de carácter público y privado para todos los usos de agua, excepto para la prestación de los usos de carácter público urbano o doméstico. En este último caso la asignación es otorgada a los municipios, a los estados o al Distrito Federal, destinadas a los servicios de agua con carácter público urbano o doméstico. Ambas con registro en el REPDA (LAN, 2014).

Si bien se sabe que los manantiales son surgencias de agua subterránea, la CONAGUA los considera como fuentes de agua superficial debido que una vez que el agua tiene contacto con la superficie deja de ser parte del subsuelo; por esta razón, el Estado a través de la CONAGUA otorga títulos de asignación para la extracción y aprovechamiento de aguas superficiales.

Poniendo de lado esta consideración legal, se ha considerado que la extracción de agua de los manantiales es referida al volumen medio anual de agua subterránea extraído de una unidad hidrogeológica. El volumen de asignación anual es considerado como una medida indirecta de la población abastecida.

La extracción de agua refleja la intensidad de las actividades económicas, el tamaño de la población abastecida a la que alimenta cada fuente de agua, así como la distribución geográfica (CONAGUA, 2007).

Por su parte, el caudal de agua asignado es la cantidad de agua que se extrae en unidad de tiempo, en litros por segundo (l/s) y es diferente al caudal natural del manantial. Un mayor caudal será el centro de atención a la hora de implementar medidas para la protección de manantiales.

Los manantiales se pueden clasificar de acuerdo con su descarga de agua por medio del método de Meinzer (1933), que distribuye los manantiales en ocho categorías. Desde un primer grupo de grandes caudales hasta el octavo grupo de caudales pequeños. Para efectos prácticos, en el presente trabajo se homogeneizaron las unidades de medida de la descarga (Tabla 3.10).



Tabla 3.10. Clasificación de manantiales según descarga. Modificación de Meinzer (1923).

| Categoría | Descarga<br>(litros/segundo) | Categoría<br>propuesta |
|-----------|------------------------------|------------------------|
| Primera   | >2830                        | Excesivo               |
| Segunda   | 283-2830                     | Muy alto               |
| Tercera   | 28.3- 283                    | Alto                   |
| Cuarta    | 6.31 - 28.3                  | Medio                  |
| Quinta    | 0.631 - 6.31                 | Bajo                   |
| Sexta     | 0.0631 – 0.631               | Muy bajo               |
| Séptima   | 0.007 – 0.0631               | Escaso                 |
| Octava    | < 0.007                      | Casi nulo              |

La primera categoría se considera para manantiales con caudales superiores a 2830 l/s, mientras que la octava con caudales menores a 0.007 l/s (7.9 ml/s). Además, se propuso una categoría más a esta clasificación para definir en un sentido cualitativo el volumen del caudal, desde caudal casi nulo hasta excesivo

La fluctuación del caudal de un manantial depende de la recarga, la descarga, la variación de niveles y los parámetros hidrogeológicos del acuífero (FCIHS, 2016).

Los valores del caudal de los manantiales en acuíferos de pequeño volumen y gran transmisividad fluctúan mucho. La variación del caudal durante el día es indicativa de que el nivel freático probablemente está muy cerca de la superficie, de modo que la evapotranspiración provoca una salida de agua y por tanto un descenso por la noche del nivel freático y en consecuencia éste oscila entre un máximo y un mínimo en las horas de mayor evaporación.

En los acuíferos de gran extensión, el efecto de la recarga está amortiguado, y la variación de caudal de los manantiales presenta un retraso respecto a la recarga. El caudal de los manantiales no varía mucho a lo largo del año y no sigue las mismas fluctuaciones que la lluvia (FCIHS, 2016)

### 3.4.3. Reescalamiento de factores

Los factores tenían diferentes escalas, por lo cual, fueron reescalados a una escala común (escala real 0 a 1). Este reescalamiento tiene como objetivo facilitar las comparaciones entre los diversos factores.

Realizar este proceso resulta necesario para las imágenes de factores de carácter cualitativo en donde se cuenta con pocas categorías no ordenadas: el uso de suelo, fuentes alternas de abastecimiento e índice de marginación.

El reescalar cada una de las imágenes de los factores requirió conocer los valores mínimo y máximo de la escala original (imágenes ingresadas). Posteriormente, para atribuir los valores límite ajuste para la nueva escala de 0 a 1, fue necesario definir la función de pertinencia (para cada factor), basada en la teoría de grupos difusos o lógica difusa. De los cuatro tipos de función de pertenencia que ofrece el módulo FUZZY se eligió la Función sigmoideal (sigmoide) monótonicamente creciente y se asignaron los valores correspondientes a los puntos de control a y b.

#### **3.4.4. Ponderación de pesos de los factores**

La ponderación de factores consistió en asignar el peso relativo de cada factor, según la importancia o influencia que estos tienen para el logro del objetivo planteado.

En cualquier trabajo o investigación la descripción y análisis son necesarios para conocer de manera adecuada las particularidades del tema en estudio, no obstante, se hace preciso obtener alguna medida o magnitud resumen que permita ponderar la importancia relativa de cada una de las variables o indicadores que entran en juego en dicha descripción y análisis.

Es posible registrar varios factores de acuerdo con el objetivo considerado; sin embargo, no todos tienen la misma importancia relativa. De este modo es preciso considerar cuáles influyen en mayor o menor medida en el objetivo, definiendo el grado de importancia de los factores para la priorización de protección de manantiales del uso público urbano.

Para lograr este objetivo se empleó un método de ponderación, que permitió asignar pesos, jerarquías o ponderaciones a las distintas variables que influyeron en la priorización.

De las tres formas de ponderación que ofrece el MCE se eligió el análisis jerárquico AHP (Analytical Hierarchy Process) propuesto por Thomas Saaty (1983). Se trata de un procedimiento de comparación por pares de los criterios que parte de una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de criterios a ponderar.

Así se estableció una matriz de comparación entre pares de criterios, comparando la importancia de cada uno de ellos con los demás. Para ello se solicitó el apoyo de un panel de expertos de distintas áreas de investigación: hidrología subterránea, hidrología superficial y gestión del agua. Una vez llenada la matriz, se calculó la tasa de consistencia (CR) que fue menor a 0.1.

Una vez obtenidos los pesos relativos de los factores, el siguiente paso fue la agregación de los factores.

### **3.4.5. Agregación de factores**

En este paso se combinó la información de factores reescalados y sus respectivos pesos con la restricción.

En el módulo Spatial Decision Modeler (SDM), el MCE ofrece cuatro opciones de riesgo y compensación (tradeoff). Se eligió la opción de riesgo medio con compensación.

Con la secuencia de pasos realizados, se logró diferenciar la prioridad e identificar los manantiales con mayor necesidad de protección en el Estado de México. Estos fueron visitados nuevamente en una segunda campaña de muestreo en los meses de abril, julio y noviembre de 2017.

Con la selección de manantiales prioritarios a proteger, se aplicó la metodología para delimitar las zonas con distinto grado de protección.

### **3.5. Delimitación de las zonas de protección de manantiales**

Es imposible proteger una fuente particular sin proteger el recurso, por esta razón para alcanzar el objetivo, se delimitaron las zonas de protección de los manantiales a partir de tres etapas: a) se delimitó la zona de captura potencial de cada manantial, b) se estimó la recarga anual dentro de las zonas de captura, la cual es capaz de alimentar el caudal del manantial, y c) finalmente se delimitaron espacialmente las zonas de protección de los manantiales una vez estimada la recarga anual (Figura 3.8).

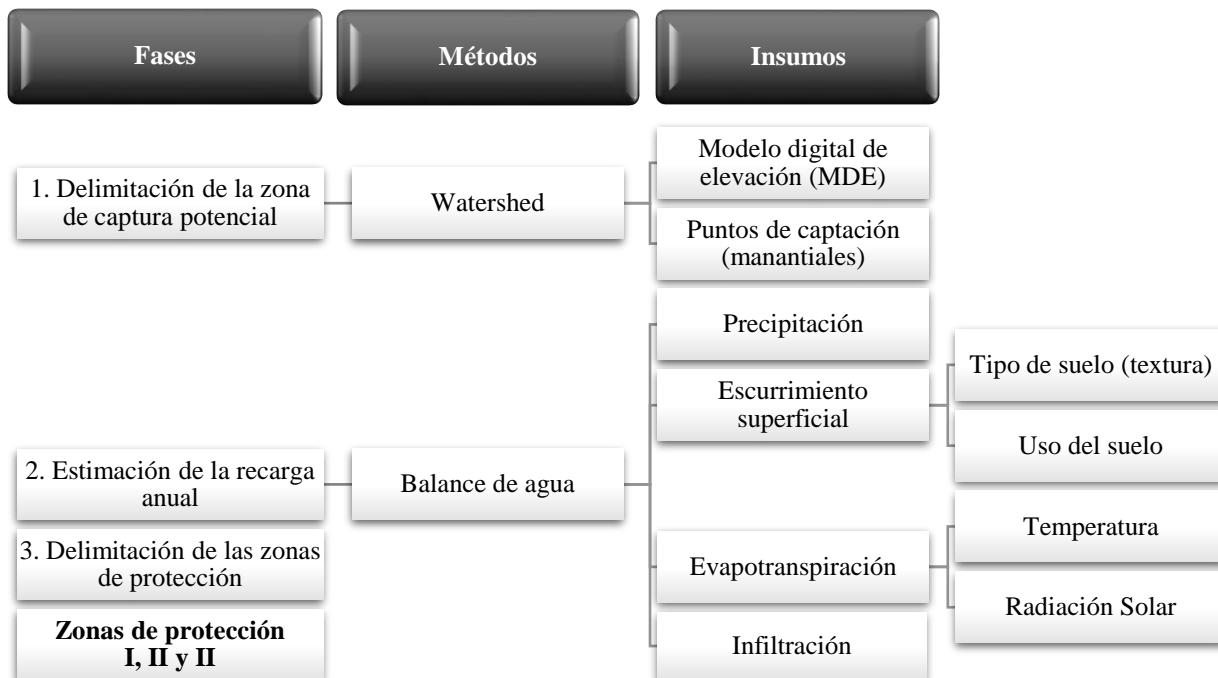


Figura 3.8. Secuencia metodológica para la delimitación de zonas de protección de manantiales.

### 3.5.1. Delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales

Para llevar a cabo la delimitación de las zonas de protección de manantiales, primero se delimitó las zonas de captura potencial de los mismos.

La delimitación de las zonas de captura requirió de una combinación de consideraciones técnicas. La variabilidad hidrológica se consideró para la delimitación de las zonas de captura potencial del manantial y, por consiguiente, para la zonificación de protección de fuentes de agua subterránea.

El proceso de delimitación de las áreas de captura potencial se hizo en el software IDRISI TerrSet, utilizando los módulos *Runoff*, *Watershed* y en algunos casos el *Surface deepening* (módulo de profundización creado por el Centro de Recursos IDRISI en México).

Para procesar la información se requirió del MDE de la zona de estudio y de los datos puntuales en formato ráster de los seis manantiales seleccionados con prioridad de protección.

A partir del conocimiento geográfico y considerando la topografía del área de estudio se realizó un análisis hidrogeológico del medio, lo que permitió la delimitación de la zona de captura potencial.

Primero se corroboró la ubicación de cada uno de los manantiales respecto a la red de drenaje mediante el módulo *Runoff*. Dicho módulo calcula la acumulación de unidades de lluvia por píxel en base a una imagen de elevación (MDE). Un simple análisis *Runoff* acumula lluvia en una base por píxel como si una unidad de lluvia cayera en cada lugar. También hay opciones para introducir imágenes de alteración de la tasa de precipitación, la tasa de infiltración, la duración de la precipitación y la infiltración, y las cantidades de absorción inicial. En este trabajo sólo se ingresó el MDE (en algunos casos se profundizó como en los siguientes párrafos se menciona) y se aplicó la opción de *perform pit removal*, sin introducir ninguna imagen de alteración.

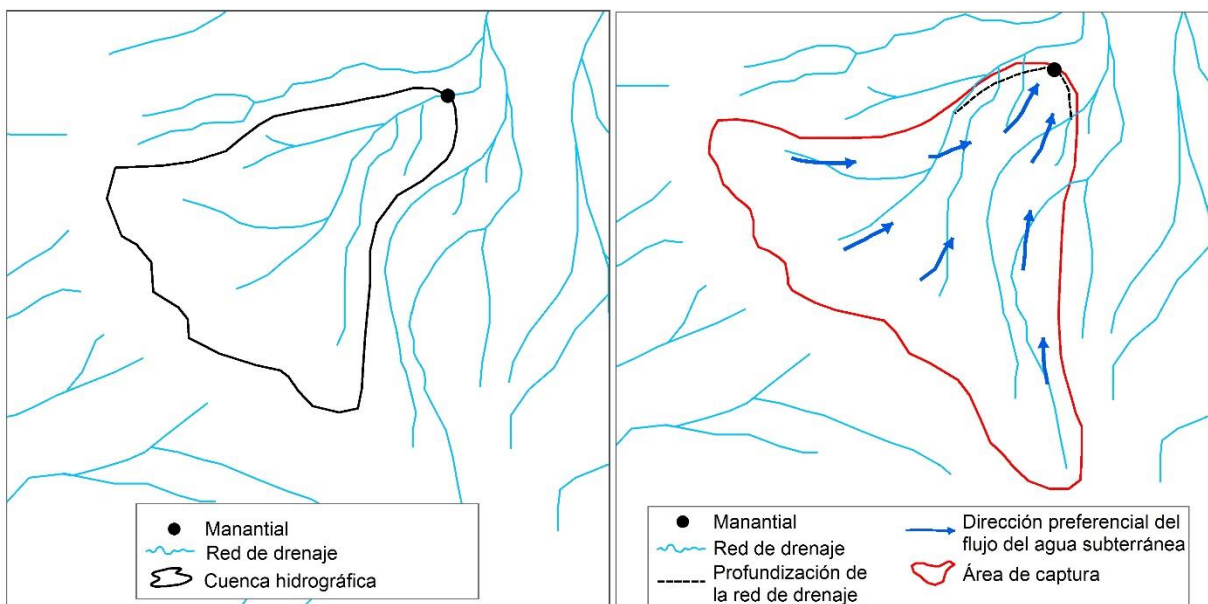
Fue necesario hacer análisis específico para cada manantial, y se definió en qué casos se requirió de un proceso previo a la aplicación del *runoff* y en cuáles no en función de la ubicación del manantial respecto a las corrientes superficiales y su altitud. Debido a que en algunos casos el régimen del flujo del agua subterránea no coincide con la dirección del flujo del agua superficial, la delimitación de las zonas de captura de manantiales se realizó en función de sus características hidrogeológicas locales y regionales. De esta manera, las zonas de captura potencial de manantiales (aguas subterráneas) no coincidieron con los límites de las zonas atribuidas a las cuencas hidrográficas (aguas superficiales).

El proceso previo mencionado fue la aplicación del módulo de *Surface deepening*, cuyo objetivo fue alterar el MDE. El módulo profundiza la altitud mediante el ingreso de una imagen de elevación (MDE) y la imagen de datos vectoriales donde se requiere hacer la profundización, además de especificar el ancho y la profundidad que se desea. Se introdujo el MDE original y como datos vectoriales se ingresaron líneas correspondientes a la modificación o agregación de corrientes superficiales próximas al manantial para el logro del objetivo. Se dio un ancho de 300 metros y una profundidad de 100.

Para delimitar el área de captación se utilizó el módulo *Watershed*. El módulo identifica las cuencas hidrográficas a partir de una imagen de superficie raster, generalmente de un modelo

de elevación digital (MDE), ya sea automáticamente para toda la zona de estudio o para una imagen característica de un punto definido por el usuario. Tiene la opción de realizar un *perform pit removal*, un proceso de extracción en el que las depresiones (pits) de los datos de entrada se detectan y se eliminan automáticamente antes de delinear las cuencas hidrográficas. Si el MDE de entrada está libre de pit, entonces no es necesario realizar este proceso. En este caso se ingresó el MDE de las zonas de estudio, la imagen del manantial y se aplicó la opción de *perform pit removal*.

En el inciso “a” de la Figura 3.9 se muestra la delimitación de una cuenca hidrográfica correspondientes a la red de drenaje superficial (mediante el parteaguas). Se observa que el manantial está próximo a una corriente principal, pero no está ubicado exactamente en dicha corriente, por lo tanto, no forma parte del flujo de agua subterránea que llega al manantial; por otro lado, en el inciso “b” se muestra la delimitación del área de captura potencial del manantial tomando como base la dirección preferencial del flujo de agua subterránea, que no necesariamente obedece la dirección del flujo de agua superficial.



a) Delimitación de la cuenca de la red de drenaje

b) Delimitación del área de captura del manantial

Figura 3.9. Delimitación de una cuenca hidrográfica y una cuenca hidrogeológica.

A los manantiales Las Fuentes Yeche y Real de Arriba se aplicó el módulo directamente ya que su ubicación coincidió con la dirección de la red de drenaje superficial, por lo que se delimitó la cuenca hidrográfica que se consideró como zona de captura potencial.

En los cuatro manantiales restantes: El Capulín, Ojo de Agua, Chichotla y Los Fresnos, se aplicó el proceso previo de profundización, para que al introducir el nuevo MDE en el módulo *Watershed*, se pudieran delimitar las zonas de captura potencial.

De este modo se pudieron delimitar las áreas de captura potencial de los manantiales, unas que coincidieron con los límites de las cuencas hidrográficas y otras que obedecen más a la dirección preferencial del flujo de agua subterránea y la altitud.

### **3.5.2. Estimación del balance hídrico**

Una vez delimitadas las zonas de captura potencial, se estimó la infiltración anual para delimitar espacialmente las zonas de protección de los manantiales.

Para estimar la infiltración de las zonas de captura se requirió hacer el cálculo de los procesos involucrados en el balance hídrico: precipitación, escorrentía y evapotranspiración, mediante la preparación de información base, tanto fisiográfica como climática del área de estudio. Toda la información fue procesada con ayuda del módulo *Macro Modeler* en el software IDRISI TerrSet

#### **3.5.2.1. Precipitación**

Se hizo un análisis de la precipitación mensual con la finalidad de analizar espacial y temporalmente la variabilidad pluvial. Los datos de precipitación mensual fueron obtenidos de la base de datos generada por Ordoñez (2015) con datos de CLICOM (Clima Computarizado) de 1980 a 2010 (SMN, 2015). El proceso de generación de las imágenes de superficie de precipitación realizado por el autor se ha mencionado anteriormente (apartado 3.2.1. Variables utilizadas para la regionalización).

### 3.5.2.2. Escurrimiento superficial

Para estimar el escurrimiento superficial de la zona de estudio se empleó la ecuación 2.2:

$$Q = P * Ce$$

Donde:

- $Q$  = Altura de la lámina de escurrimiento anual en mm
- $P$  = Precipitación anual promedio en mm
- $Ce$  = Coeficiente adimensional de escurrimiento promedio

El  $Ce$  se calculó según la Norma Oficial Mexicana, NOM-011-CONAGUA-2000 (DOF, 2002). Se requirió de la precipitación, el tipo y uso de suelo de la zona de estudio. Con las dos últimas variables se calcularon los valores de  $K$ .

#### *a) Tipo de suelo (textura y permeabilidad)*

El tipo de suelo se clasificó de acuerdo con su grado de permeabilidad, debido a que permite en mayor o menor medida el paso del agua. Se utilizó la información edafológica de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2009)<sup>15</sup> a través de su base de datos, en donde el tipo de suelo fue clasificado de acuerdo con el tipo de textura: gruesa, mediana y fina, y se asoció a su grado de permeabilidad del suelo según el criterio de CONAGUA (DOF, 2002): suelos permeables, suelos medianamente permeables y suelos casi impermeable respectivamente.<sup>16</sup>

#### *b) Uso del suelo*

La clasificación de uso de suelo fue realizada mediante el tratamiento de imágenes satelitales LANDSAT 8, correspondientes al año 2016, en donde se emplearon cuatro escenas, las cuales fueron obtenidas de la página web de Earth Explorer (USGS, 2016).

---

<sup>15</sup> Esta información se encuentra a una escala de 1:250 000.

<sup>16</sup> El concepto permeabilidad puede recibir también acepciones de conductividad o transmisividad hidráulica.



Las imágenes satelitales LANDSAT 8 tienen una resolución espacial de 30 metros y cuentan con 11 bandas espectrales: 9 tomadas por el OLI y 2 por el TIRS (SADS, 2013). Las escenas empleadas fueron las de mejor calidad de los meses de enero, febrero y abril:

- a) LC80260462016021LGN00 (21 de enero de 2016)
- b) LC80260472016021LGN00 (21 de enero de 2016)
- c) LC80270462016044LGN00 (13 de febrero de 2016)
- d) LC80270472016044LGN00 (13 de abril de 2016)

Una vez obtenidas las imágenes satelitales, el procesamiento y análisis de la información se llevó a cabo en 4 pasos a través de los módulos correspondientes:

- a) Composición en falso color RGB (*composite*)
- b) Segmentación (*segmentation*)
- c) Identificación de los sitios de entrenamiento (*segtrain*)
- d) Clasificación por máxima probabilidad (*maxlike*)
- e) Clasificación de regla de mayoría (*segclass*)

El módulo *composite* produce una imagen en falso color compuesta de tres bandas y 24 bits para la interpretación visual y análisis de las imágenes que se proyectan en formato RGB: el infrarrojo cercano es desplegado en el rojo (R-Red); la banda roja es proyectada en el verde (G-Green) y la banda verde es proyectada en el Azul (B-Blue). De este modo se hizo una composición RGB 754 con las bandas que mejor representaron las áreas a clasificar.

A partir de la composición RGB se realizó una segmentación con el uso del módulo *segmentation*. Este módulo crea una imagen de segmentos, agrupa los píxeles adyacentes en segmentos de imagen de acuerdo con su similitud espectral, con la finalidad de poder identificar los segmentos correspondientes a cada clase.

Para realizar dicha segmentación se especificó el número de bandas a emplear, además se definió una tolerancia de similitud 50 de acuerdo con las características de las escenas y que fueron las que mejor se adaptaron a la escala de trabajo.

Posteriormente se empleó el módulo *segtrain*. Este módulo desarrolla de forma interactiva los sitios de entrenamiento y las firmas basadas en los segmentos del módulo *segmentation*. Requiere del archivo vectorial derivado de dicha segmentación y de la imagen de la composición del módulo *composite*.

Se identificaron los diferentes tipos de uso de suelo, asignando nombres a cada clase e identificadores (ID) a los segmentos seleccionados de aquellos que mejor representaron a cada clase. Los usos de suelo identificados y los nombres asignados a sus clases fueron siete: urbano, agrícola (incluidos los invernaderos), bosque, bosque poco denso, cuerpos de agua, pastizal/matorral y suelo desnudo.

Una vez obtenidos los sitios o segmentos de entrenamiento se aplicó el módulo *maxlike*. Este módulo lleva a cabo una clasificación de máxima verosimilitud de datos de detección remota basados en información contenida en un conjunto de archivos de firma. Dicha clasificación se basa en la función de densidad de probabilidad asociada con una firma de sitio de entrenamiento. Los píxeles se asignan a la clase más probable basada en una comparación de la probabilidad posterior que pertenece a cada una de las firmas consideradas. Para ello, el módulo requiere de la firma de las clases de los sitios de entrenamiento resultantes del módulo *segtrain* y de la definición de probabilidad que para esta investigación fue la de utilizar las mismas probabilidades previas de dichas firmas.

En síntesis, el módulo *maxlike* asocia los identificadores de cada una de las clases (usos de suelo) al resto de los segmentos de la imagen, y de esta manera se obtiene como resultado una imagen clasificada en los usos de suelo previamente identificados.

Finalmente, se utilizó el módulo *segclass*, el cual es un clasificador de regla de mayoría basado en la clase mayoritaria dentro de cada segmento. Este módulo requiere de una imagen de segmentación y de una imagen ya clasificada, derivadas de los módulos *segmentation* y *maxlike* respectivamente.

El módulo *segclass* puede mejorar la precisión de una clasificación basada en píxeles y producir una clasificación suavizada (más parecida a un mapa temático) ya que preserva los límites de la segmentación.

Después de identificar las siete clases del uso del suelo, éstas agruparon a las 14 coberturas definidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 (DOF, 2002) quedando finalmente seis usos: suelo desnudo, agrícola, pastizal/matorral, bosque denso, bosque poco denso y uso urbano

**c) Valores de K en función del tipo y uso del suelo**

Una vez agrupadas las clases se asignaron valores de  $K$  en función de la relación del tipo y uso de suelo, y dependiendo del porcentaje de cobertura del pastizal y bosque (Tabla 3.11).

Como los valores de precipitación anual estuvieron dentro del rango de 350 a 2150 mm anuales y los valores de  $K$  resultaron mayores de 0.15, el  $C_e$  se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$C_e = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5}$$

Tabla 3.11. Valores de K en función del tipo y uso de suelo con base en CONAGUA (DOF, 2002).

| Usos del suelo con base en la NOM -011-CONAGUA-2000 |   | Tipo de suelo |      |      | Uso del suelo, elaboración propia con base en imágenes LANDSAT 8 |
|---|---|---------------|------|------|--|
|   |   | A             | B    | C    |  |
| 1   | Barbecho, áreas incultas y desnudas         | 0.26          | 0.28 | 0.3  | Suelo desnudo  |
|   | Cultivos:                                   |               |      |      | Agrícola   |
| 2   | En Hileras                                  | 0.24          | 0.27 | 0.3  |  |
| 3   | Legumbres o rotación de pradera             | 0.24          | 0.27 | 0.3  |  |
| 4   | Granos pequeños                             | 0.24          | 0.27 | 0.3  |  |
|   | Pastizal (% del suelo cubierto o pastoreo): |               |      |      | Pastizal/matorral  |
| 5   | Más del 75% - Excesivo                      | 0.14          | 0.2  | 0.28 |  |
| 6   | Del 50 al 75% - Regular                     | 0.2           | 0.24 | 0.3  |  |
| 7   | Menos del 50% - Poco                        | 0.24          | 0.28 | 0.3  |  |
|   | Bosque (% del suelo cubierto):              |               |      |      | Bosque denso y bosque poco denso                                 |
| 8   | Cubierto más del 75%                        | 0.07          | 0.16 | 0.24 |  |
| 9   | Cubierto del 50 al 75%                      | 0.12          | 0.22 | 0.26 |  |
| 10  | Cubierto del 25 al 50%                      | 0.17          | 0.26 | 0.28 |  |
| 11  | Cubierto menos del 25%                      | 0.22          | 0.28 | 0.3  |  |
| 12  | Zonas urbanas                               | 0.26          | 0.29 | 0.32 | Urbano   |
| 13  | Caminos                                     | 0.27          | 0.3  | 0.33 | Sin categoría  |
| 14  | Pradera permanente                          | 0.18          | 0.24 | 0.3  | Sin categoría  |

Donde:

- $C_e$  = Coeficiente de escurrimiento anual, en mm
- $K$  = Parámetro que depende del tipo y uso de suelo
- $P$  = Precipitación anual, en mm

Con el  $C_e$  y el resto de las variables involucradas se pudo calcular la infiltración.

### 3.5.2.3. Evapotranspiración

Se evaluaron dos métodos para el cálculo de la evapotranspiración: el Método de Thornthwaite que es muy usado en hidrología y edafología y el de Hargreaves que es el más recomendado (después del método *FAO Penman-Monteith*) debido a que ha producido resultados razonables de evapotranspiración.

#### a) Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Thornthwaite

Para calcular la  $ET$  mediante el método Thornthwaite se utilizaron datos de temperatura media que fueron obtenidos de la base de datos generada por Ordoñez (2015) con datos de CLICOM. La ecuación utilizada fue:

$$ETp = 16 (10t/I)^a$$

Donde:

- $ETP$  = evapotranspiración potencial media mensual en mm
- $t$  = temperatura media mensual en °C
- $I$  = índice calórico anual, constante para la región dada. Es la suma de los 12 índices de calor mensuales  $i$  del año, es función de la temperatura media normal mensual ( $t$ ):

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad \text{donde} \quad i = (t/5)^{1.514}$$

- $a$  = exponente empírico, función de  $I$ :

$$a = (675 \cdot 10^{-9}) I^3 - (771 \cdot 10^{-7}) I^2 + (179 \cdot 10^{-4}) I + 0.49239$$

La ecuación de la  $ETp$  de Thornthwaite se desarrolló mediante el uso del módulo *Macro Modeler* en el software IDRISI TerrSet, en donde fue posible obtener las 12 imágenes de la  $ETp$  correspondientes a los 12 meses del año. Para practicidad del uso de la ecuación, se calculó el índice de calor de cada mes ( $i$ ) y fueron sumaron para obtener el índice de calor del año ( $I$ ). También se calculó el exponente empírico  $a$  para finalmente sustituir cada uno de acuerdo con el orden de la ecuación. Cada una de las operaciones fueron calculadas de acuerdo con el orden de operación (Figura 3.10).

Para obtener la ETP en el *Macro Modeler*, se dividió la temperatura media mensual  $t$  ( $wTtmpMns$ ) entre índice de calor del año  $I$  ( $I\_C\_i$ ), el resultado ( $Tmp\_ICi$ ) se multiplicó por 10 ( $Tmp10Ici$ ) y se elevó por el exponente empírico  $a$  ( $a\_cm\_ici$ ); finalmente este resultado ( $Tia$ ) fue multiplicado por 16 ( $ETP\_mns$ ).

***b) Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia mediante la fórmula de Hargreaves***

Por otro lado, se utilizó la *fórmula simplificada* de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) para estimar la  $ET_0$ . Requirió de la temperatura media ( $T_{med}$  °C), máxima ( $T_{máx}$  °C) y mínima mensual ( $T_{mín}$  °C) y de la Radiación Solar diaria ( $R_a$ , mm/día). La ecuación simplificada para la estimación de la  $ET_0$  fue:

$$ET_0 = 0.0023 (T_{med} + 17.78) (T_{máx} - T_{mín})^{0.5} R_a$$

Donde:

- $ET_0$  = Evapotranspiración de referencia diaria en mm/día
- $T_{med}$  = Temperatura media diaria en °C
- $R_a$  = Radiación solar extraterrestre en mm/día.
- $T_{máx}$  = Temperatura diaria máxima en °C
- $T_{mín}$  = Temperatura diaria mínima en °C

La  $T_{máx}$ ,  $T_{med}$  y  $T_{mín}$  se obtuvieron de la base de datos generada por Ordoñez (2015) con datos de CLICOM de 1980 a 2010. La radiación solar extraterrestre  $R_a$  se obtuvo de los datos del Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI, 2016).

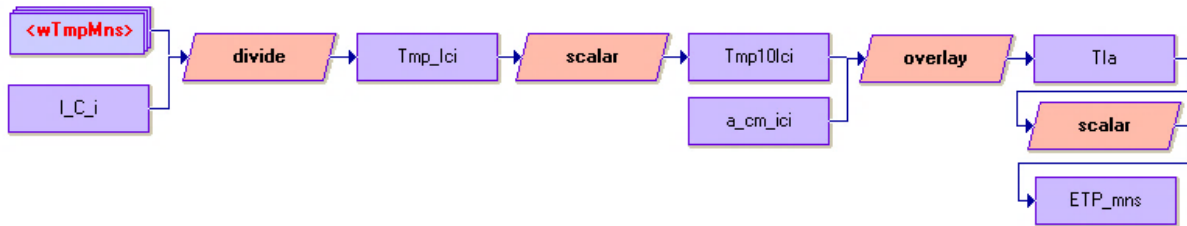


Figura 3.10. Proceso del cálculo de la  $ET_p$  mediante la fórmula de Thornthwaite.

El Consorcio de Información Espacial es una iniciativa del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), que vincula a las comunidades internacionales de ciencia, investigación y desarrollo, con científicos, socios nacionales e internacionales y otros que trabajan en la aplicación y avance de la ciencia geoespacial para el desarrollo sostenible, la conservación y la reducción de la pobreza en los países en desarrollo.

CGIAR-CSI brinda un conjunto de datos que se pueden descargar gratuitamente y están disponibles en su GeoPortal. Las imágenes de  $R_a$  tienen una resolución de 30 segundos de arco o - 1km en Ecuador de datos promedio mensuales de 1950 a 2000 a nivel mundial que fueron recortadas al área de estudio (CGIAR-CSI, 2009).

La ecuación de la  $ET_o$  de Hargreaves se desarrolló mediante el uso del *Macro Modeler* de IDRISI TerrSet. Para practicidad del uso de la ecuación se hicieron las operaciones por separado (Figura 3.11). Primero se multiplicó la  $R_a$  ( $radsol\_mns$ ) por 0.0023 ( $Ra\ 0023$ ); después a la  $T_{med}$  ( $wT_{mpMns}$ ) se le sumó 17.78 ( $T_{mp}\ 1778$ ); y se hizo la resta de la  $T_{máx}$  menos la  $T_{mín}$ , el resultado se elevó a la 0.5 ( $T_{max-Tmin}\ 05$ ). Finalmente se multiplicaron y obtener la  $ET_o$ . Ambos métodos fueron comparados y finalmente se optó por el de Hargreaves por el más acertado.

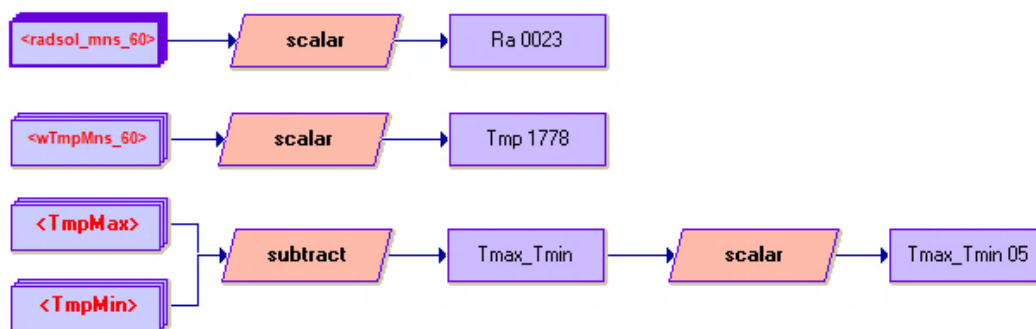


Figura 3.11. Proceso del cálculo de la  $ET_o$  mediante la fórmula de Hargreaves.

### 3.5.2.4. Infiltración

La infiltración Real ( $I_r$ ) o también llamada Eficaz ( $I_e$ ) se obtuvo a través de la metodología adaptada por la SEMARNAT (2005) basada en el método de balance de agua de Thornthwaite. Para llevarla a cabo primero se calculó la  $I_p$  una vez estimado el  $C_e$ . La ecuación para la estimación de la  $I_p$  fue:

$$I_{p_j} = P_j - (P_j * C_{e_j})$$

Donde:

- $I_{p_j}$  = Infiltración potencial mensual, en mm.
- $P_j$  = Precipitación mensual promedio, en mm.
- $C_{e_j}$  = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional (también llamado  $K_{e_j}$ ).
- $j$  = Indicador del mes considerado.

Una vez estimadas tanto la  $I_p$  como la  $ET_p$ , se llevó a cabo la operación de sustracción de las imágenes para obtener finalmente  $I_r$ :

$$I_{r_j} = I_{p_j} - ET_{p_j}$$

Donde:

- $I_{r_j}$  = Infiltración mensual real, en mm.
- $I_{p_j}$  = Infiltración potencial mensual en mm.
- $ET_p$  = Evapotranspiración potencial de referencia mensual, en mm.
- $j$  = Indicador del mes considerado

### 3.5.3. Delimitación de las zonas de protección de los manantiales

La delimitación de las zonas de protección de manantiales se realizó a partir de la adaptación de la metodología británica para la delimitación de zonas de protección de fuentes de agua (Environment Agency, 2009) de acuerdo a la disponibilidad de información del área de estudio. De este modo, en lugar de considerar los tiempos de tránsito de un contaminante se consideró

la recarga anual, para calcular el agua que potencialmente llegaría al manantial en un año. Además, para tener información más certera sobre la estimación de las zonas de protección, se hizo la medición de las caudales in situ de los manantiales mediante el método del flotador, debido a que los caudales con título de asignados en el REPDA son menores a los naturales.

De esta manera se logró delimitar dentro de las zonas de captura potencial las zonas de protección: interna, externa y de contribución potencial a largo plazo (Figura 3.12).

La primera, llamada zona de protección interna (ZP I), se definió inmediatamente adyacente al manantial, mediante un radio fijo, en donde el flujo de agua subterránea tarda en llegar en cuestión de días a la captación del manantial. La ZP I está definida en algunos casos por un límite perimetral de construcción.

La segunda, zona de protección externa (ZP II), fue calculada a partir de la estimación de la recarga media anual, debido a que aguas arriba de los manantiales no se cuenta con pozos que permitan medir los niveles de agua subterránea, ya que no existe una conexión con los acuíferos profundos de la zona, más bien están relacionados con acuíferos libres o colgados.

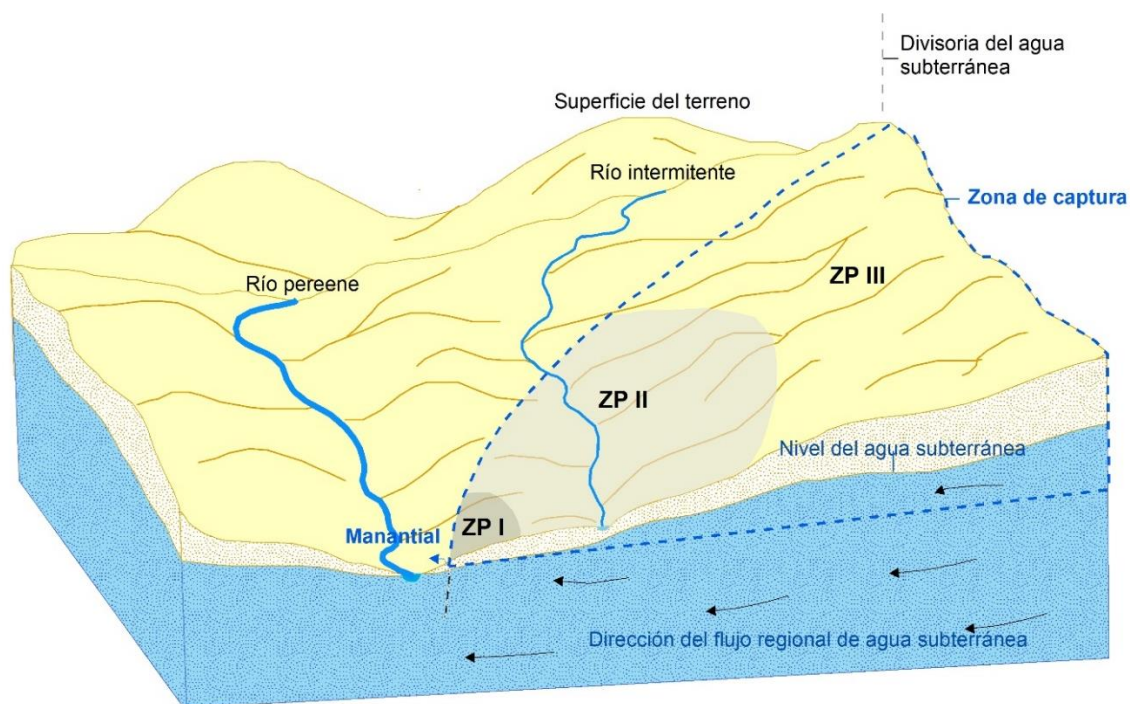


Figura 3.12. Delimitación del área de captura potencial de un manantial y de las zonas de protección I, II y II. Elaboración propia.



El área de la ZP II se estimó a partir del diagrama de Todd (1980) que muestra la relación entre la descarga media de los manantiales, la recarga media anual y el área de recarga (Figura 3.13), y con la modificación del método del radio fijo (Vargas, 2002; Martínez & García, 2003).

La modificación del método del radio fijo fue la siguiente (Ecuación 3.3):

$$A = Q/R$$

Donde:

- $A$  = Área de alimentación ( $m^2$ )
- $Q$  = Volumen anual ( $m^3$ )
- $R$  = Recarga anual (m)

El área de alimentación resultante es el área lo suficientemente capaz de soportar el caudal del manantial en un año.

La tercera zona de protección (ZP III) es el resto de la zona de captura potencial del manantial, en la que el agua puede potencialmente llegar en un largo plazo al manantial (más de un año)

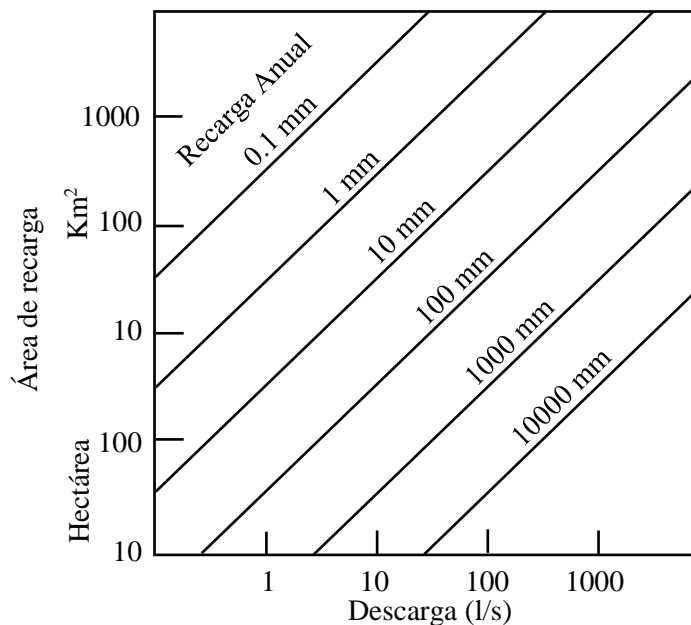


Figura 3.13. Diagrama de Todd, que muestra la relación de la descarga media del manantial, la recarga media anual y el área de recarga (Vargas, 2002).

### 3.6. Proyección de escenarios futuros de las estrategias de protección de manantiales

Con la finalidad de vislumbrar la posible variabilidad en el futuro de las estrategias de protección de los manantiales, se realizó la proyección escenarios de los cambios del uso del suelo y de la variabilidad climática.

#### 3.6.1. Proyecciones de los cambios en los usos del suelo

Conocer el uso del suelo en el área donde se ubica el manantial, permite identificar, clasificar y categorizar el grado de peligrosidad de las fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas (Barquín & Scarsbrook, 2008). Esta etapa constó de tres pasos esenciales que fueron ejecutados utilizando la aplicación *Land Change Modeler (LCM)* dentro del software Idrisi TerrSet (Figura 3.14).

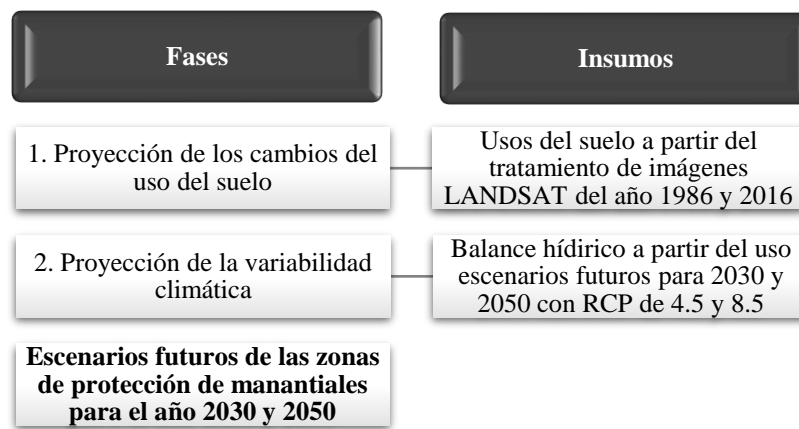


Figura 3.14. Secuencia metodológica para la proyección de escenarios de las estrategias de protección.

##### 3.6.1.1. Análisis de cambios de los usos del suelo

Se evaluó el cambio de los dos mapas de cobertura del uso del suelo para los dos periodos. En esta etapa se identificaron las transiciones dominantes para agruparlas posteriormente en submodelos. Los procesos de esta etapa fueron tres: a) asignar parámetros, b) analizar los cambios ocurridos entre los periodos abordados, y c) análisis de loa cambio en los mapas.

### **a) Asignación de parámetros para la creación del nuevo proyecto o sesión**

En esta etapa se creó un nuevo proyecto y se le dio un nombre, se especificaron los dos archivos de entrada asociados con el análisis del cambio de del uso del suelo del área de estudio. Los dos periodos de análisis del fueron de 1986 y 2016. La clasificación del uso de suelo de 2016 ya fue realizada en el apartado 3.5.2. Estimación del balance hídrico: escurrimiento superficial; mientras que la clasificación del uso de suelo de 1986 se realizó en este apartado.

En la clasificación del uso del suelo del año 1986 se utilizaron imágenes satelitales LANDSAT 5. Las imágenes LANDSAT 5 tienen una resolución espacial de 60 metros y cuentan con 4 bandas espectrales (SADS, 2013). Se emplearon cuatro escenas que cubrieron el área de estudio, obtenidas (de igual manera que las LANDSAT 8) de la página web de Earth Explorer (USGS, 2016). Las escenas seleccionadas fueron las de mejor calidad, con poca o nula nubosidad, correspondientes a los meses de marzo y mayo:

- a) LM50260461986130AAA03 (10 de mayo de 1986)
- b) LM50260471986082AAA03 (23 de marzo de 1986)
- c) LM50270461986073AAA03 (14 de marzo de 1986)
- d) LM50270471986073AAA03 (14 de marzo de 1986)

Una vez obtenidas las imágenes satelitales, el procesamiento y análisis de la información se llevó a cabo a través de los 4 módulos correspondientes (mencionados en el apartado 3.5.2. Estimación del balance hídrico - Esgurrimento superficial): a) composición RGB 421 (*composite*); b) segmentación con una tolerancia de similitud de 20 (*segmentation*); c) identificación de los sitios de entrenamiento (*segtrain*); d) clasificación por máxima probabilidad (*maxlike*) y d) clasificación de regla de mayoría (*segclass*).

### **b) Análisis de los cambios del uso del suelo por categoría**

Una vez obtenidos ambos mapas de clasificación del uso del suelo se procedió al análisis de cambios. Se evaluó el cambio de cobertura del suelo entre los dos mapas a través de gráficas de: a) ganancias y pérdidas por categoría, b) cambios netos por categoría y c) persistencia o

contribución al cambio neto experimentado de la transición de una categoría específicas. Los gráficos fueron presentados en hectáreas.

### **c) Elaboración de mapas de cambios del uso del suelo**

Se realizaron mapas de cambios, incluyendo mapas de persistencia, de ganancias y pérdidas por categoría, y de transiciones e intercambios de mapas por categoría.

La fase de tendencia espacial del cambio (spatial trend of change) no se realizó pues no es requisito para la etapa siguiente.

### **3.6.1.2. Modelación del potencial de transición**

En esta etapa se identificó el potencial de transición de las coberturas de usos del suelo. Las transiciones que tuvieron semejanza en sus variables explicativas fueron agrupadas en un submodelo de transición. Los submodelos de transición seleccionados se modelaron antes de realizar la predicción de cambio. Esta etapa se realiza en cinco tareas: a) selección de submodelos de transición: estado; b) determinación de la utilidad de transformación variable; c) prueba y selección del sitio y de variables explicativas; d) selección de la estructura del submodelo de transición; y e) activación del sub-modelo de transición.

#### **a) Selección de submodelos de transición**

En la tabla presentada dentro de este panel de LCM se seleccionaron las transiciones que se usaron para evaluar los potenciales de transición (activando la opción Si-Yes) las cuales fueron agrupadas en un submodelo llamado Alterado, debido a que compartieron los mismos determinantes explicativos para la predicción. Las transiciones agrupadas fueron cuatro:

- Agrícola a pastizal/matorral
- Agrícola a bosque
- Agrícola a urbano
- Suelo desnudo a urbano

### **b) Determinación de la utilidad para la transformación de variables**

En el panel de utilidad para la transformación de variables se utilizó la probabilidad de evidencia (evidence likelihood). Para este caso se definió la transición del uso de suelo urbano entre ambos periodos.

### **c) Prueba y selección del sitio y variables explicativas**

Se evaluaron 11 variables para observar su capacidad potencial de explicar la ubicación de los cambios de usos de suelo (Tabla 3.12). Estas variables fueron biofísicas, bioclimáticas y socioeconómicas. Las variables que tuvieron un valor V de Cramer menor a 0.15 y valores de P diferentes a 0 fueron descartadas del modelo, mientras que el resto fueron agregadas. Ocho variables fueron seleccionadas debido a que tuvieron cierta incidencia en la predicción del cambio del uso de suelo y porque tuvieron una V de Cramer mayor a 0.15.

Las variables biofísicas elegidas fueron: la elevación del terreno (MDE), pendiente del terreno, la temperatura media anual, la precipitación anual, la distancia a cuerpos de agua, así como los índices de vegetación verde (NDVI - índice de vegetación de diferencia normalizada). Mientras que las variables socioeconómicas seleccionadas fueron: la distancia a zonas urbanas, distancia a carreteras y la variable categórica urbana resultante de la probabilidad de evidencia.

Algunas de las variables explicativas (MDE, temperatura y precipitación) fueron obtenidas de distintas fuentes; mientras el resto fueron calculadas mediante los módulos del software IDRISI TerrSet.

La pendiente del terreno se calculó mediante el módulo *slope*, y la distancia a cuerpos de agua y zonas urbanas se calculó mediante el módulo *distance*. El módulo *distance* calcula la distancia de cada pixel en la imagen al pixel destino más cercano, es decir, calcula la distancia Euclidiana de cada celda hasta el conjunto de celdas objetivo más cercano. Las distancias son producidas en unidades de referencia especificadas en el archivo objetivo de documentación de las imágenes. La unidad de medida fue el metro (Eastman, 2012).

Tabla 3.12. Variables e insumos para determinar los cambios de uso del suelo.

| No. | Variable   | Insumos  | Fuente  |
|-----|--|--|---|
| 1   | Modelo digital de elevación (MDE)                                | Generado a partir de curvas de nivel.  | Elaboración propia con base en INEGI (2017).      |
| 2   | Pendiente  | Pendiente en grados, obtenido a partir del MDE.  | Elaboración propia con base en INEGI (2017).      |
| 3   | Precipitación anual  | Información climática recabada de la base de datos de CLICOM (Clima Computarizado) de 1980 a 2010.   | SMN, (2015) y Ordoñez (2015).                     |
| 4   | Temperatura promedio anual                                       | Información climática recabada de la base de datos de CLICOM (Clima Computarizado) de 1980 a 2010.   | SMN, (2015) y Ordoñez (2015).                     |
| 5   | Distancia a cuerpos de agua                                      | Distancia euclidiana obtenida a partir de la imagen de uso del suelo (generada a partir de imágenes LANDSAT del año 2016).                 | Elaboración propia con base en USGS (2016).       |
| 6   | Distancia a zona urbana  | Distancia euclidiana obtenida a partir de la imagen de uso del suelo (generada a partir de imágenes LANDSAT del año 2016).                 | Elaboración propia con base en USGS (2016).       |
| 7   | Probabilidad de evidencia (evidence likelihood) del suelo urbano | Obtenido a partir de dos imágenes: del mapa de cambios de coberturas de 1986 al 2016 y del mapa del uso de suelo de 1986.                  | Elaboración propia con base en USGS (1986 y 2016) |
| 8   | Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)            | Obtenido a partir de la combinación de las bandas visible roja e infrarroja cercana de las imágenes LANDSAT 2016.                          | Elaboración propia con base en USGS (2016)        |
| 9   | Distancia a carreteras   | Distancia euclidiana obtenida a partir de información vectorial del mapa topográfico.  | INEGI (2011).                                     |
| 10  | Distancia a localidades  | Distancia euclidiana obtenida a partir de información vectorial.   | CONABIO (2000)                                    |
| 11  | Variables bioclimáticas  | Información bioclimática que incluye 29 variables derivadas de los valores mensuales de temperatura y precipitación (19 fueron evaluadas). | WorldClim (2017)                                  |

Por otro lado, el NDVI se calculó mediante la siguiente expresión (Ecuación 3.4):

$$NDVI = (IRC - R) / (IRC + R)$$

Donde:

- $NDVI$  = Índice de vegetación de diferencia normalizada
- $IRC$  = Reflectividad en el infrarrojo cercano
- $R$  = Reflectividad en el rojo

En las imágenes LANDSAT 8, la banda 4 (0.630 – 0.680  $\mu\text{m}$ ) corresponde al rojo (R) y la banda 5 (0.845 – 0.885  $\mu\text{m}$ ) al infrarrojo (IRC). La imagen ráster resultante contiene valores que van desde -1 a 1. Los valores más cercanos a 1 corresponden a la vegetación más vigorosa.

El NDVI es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición (por medio de sensores remotos instalados comúnmente en una plataforma espacial) de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja. Son excelentes indicadores del estado del cultivo.

Se calculó el NDVI para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, con base en la medición de la intensidad de la radiación de dos bandas (IRC-infrarrojo cercano y R-rojo del Landsat 8) del espectro electromagnético que la vegetación emite.

Los valores resultantes cercanos a 1 correspondieron a una vegetación más vigorosa, contrariamente a lo que sucedió con los valores menores. El NDVI indica qué zonas son más posibles al cambio de uso de suelo.

#### **d) Selección de la estructura del submodelo de transición**

Las variables explicativas agregadas al submodelo de transición (en el test and selection of site and driver variables) finalmente fueron 8, las cuales se presentaron en esta etapa en una tabla. El rol de las variables implicadas fue estático.

#### **e) Activación del sub-modelo de transición de coberturas**

En el panel para ejecutar el submodelo de transición se optó por la Red Neuronal Perceptrón Multicapa (MLP), debido a su capacidad de aprendizaje y porque funciona mejor en las transiciones de modelado con una tasa de precisión del 100%.

### **3.6.1.3. Predicción de los cambios del uso del suelo**

El tercer y último paso fue la predicción de cambio de los usos del suelo para los años requeridos. En esta etapa del proceso de LCM se ejecutaron dos tareas: a) modelación de la demanda de cambios y b) distribución de cambios.

### **a) Modelación de la demanda de cambios de los usos del suelo**

Este panel se introdujo la fecha de predicción para determinar la cantidad de cambio que ocurrirá en el futuro, para lo cual se seleccionó Cadena Markov (Markov Chain). Las predicciones fueron para los años 2030 y 2050.

### **b) Distribución de cambios**

En el proceso de Distribución de Cambios (Change Allocation) ninguna de las opciones fue seleccionada; sin embargo, se aplicó 1 etapa de recalcu. En la tabla presentada por el panel de se pudieron visualizar las transiciones de los cambios. Finalmente se asignó un nombre al archivo de salida y se corrió el modelo para obtener el mapa de predicción final.

Se hace necesario emplear escenarios de los usos del suelo, tomando en consideración la relación existente entre los manantiales y el grado de afectación que ciertas actividades antrópicas pueden ejercer en el futuro sobre éstas.

### **3.6.2. Escenarios del cambio climático para la estimación del balance hídrico**

Para observar la variabilidad climática en un futuro se obtuvieron las capas superficiales de escenarios climáticos de las variables de precipitación mensual, temperatura media, máxima y mínima mensual. Los datos se obtuvieron del sitio web del Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

En sitio de la CCAFS (2014) se seleccionó el modelo correspondiente al Quinto Informe del IPCC: Delta Method IPCC AR5. De los cuatro escenarios de RCP existentes (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5) se utilizó el RCP 4.5 debido a que arroja escenarios de estabilización y el RCP 8.5 porque muestra escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Además, se seleccionó el modelo MPI-ESM-LR a nivel regional en formato ASCII Grid Format para el periodo de 2030 y 2050 de las variables de temperatura media, máxima y mínima, y de precipitación mensual a una resolución de 30” (CCAFS, 2014).



---

Las imágenes fueron importadas y proyectadas en la plataforma TerrSet para poder realizar el análisis del balance hídrico. El procedimiento fue el mismo que se llevó a cabo en el apartado 3.5.2 Estimación del balance hídrico. La estimación de los escenarios de precipitación, escurrimiento superficial, evapotranspiración e infiltración para los años al año 2030 y 2050 con ambos RCP, se ejecutó mediante el módulo *Macro Modeler*.

Se utilizó el año 2030 debido a los escenarios contemplados en los planes nacionales, como los mencionados en la Agenda del Agua 2030 que se creó como una forma de consolidar la política hídrica de sustentabilidad en nuestro país; mientras que el año 2050 se consideró derivado de los escenarios hidrológicos mundiales proyectados al 2050 (ONU, 2017).

Con la estimación del balance hídrico proyectado a 2030 y 2050 se pudo observar el comportamiento espacio temporal de las variables climáticas consideradas a corto y mediano plazo. La variabilidad de la infiltración anual en las zonas de captura potenciales de los manantiales ayudó a analizar la dinámica espacial de las zonas de protección, en particular de la ZP II y demostrar si esta última crece con el tiempo o se mantiene, y hacer hincapié en las medidas necesarias que han de realizarse para la conservación del caudal y calidad de agua de los manantiales.

---

## CAPÍTULO 4.

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo en este apartado es dar a conocer los resultados de la presente investigación, los cuales se llevaron a cabo en cinco apartados.

### **4.1. Regionalización física del área de estudio**

El objetivo en este apartado fue llevar a cabo la regionalización del territorio mexiquense de acuerdo a sus características geológicas, de geoformas y pluviales, lo que permitió asociar conjuntos de manantiales a regiones con características similares.

#### **4.1.1. Variables utilizadas para la regionalización**

##### **4.1.1.1. Geología**

Desde el punto de vista de la geología y considerando el proceso metodológico establecido, se tomó como referencia la génesis de las rocas y su relación con el funcionamiento hidrogeológico. Se pudieron diferenciar los tres tipos de roca en el área de estudio, tanto ígneas (también llamadas magmáticas), sedimentarias y metamórficas.

Se identificaron rocas ígneas: volcánicas (extrusivas) y plutónicas (intrusivas); rocas sedimentarias: consolidadas (no clásticas o no detríticas) y no consolidadas (clásticas o detríticas) y; rocas metamórficas (Figura 4.1). Estos tipos de rocas se agruparon de acuerdo al tipo de permeabilidad del medio acuífero en: rocas fracturadas o fisuradas, fracturadas con posibilidad de carst, rocas porosas sedimentarias y porosas volcánicas (Tabla 4.1 y Figura 4.2).

Las rocas volcánicas son caracterizadas usualmente por una alta permeabilidad debido a su grado de fracturamiento. Éstas ocupan la mayor parte del territorio estatal (62.8%). Las rocas ígneas plutónicas (intrusivas) generalmente pueden ser muy impermeables y no tener la

capacidad de almacenar agua; ocupan una porción mínima dentro de los límites del estado (0.5%).

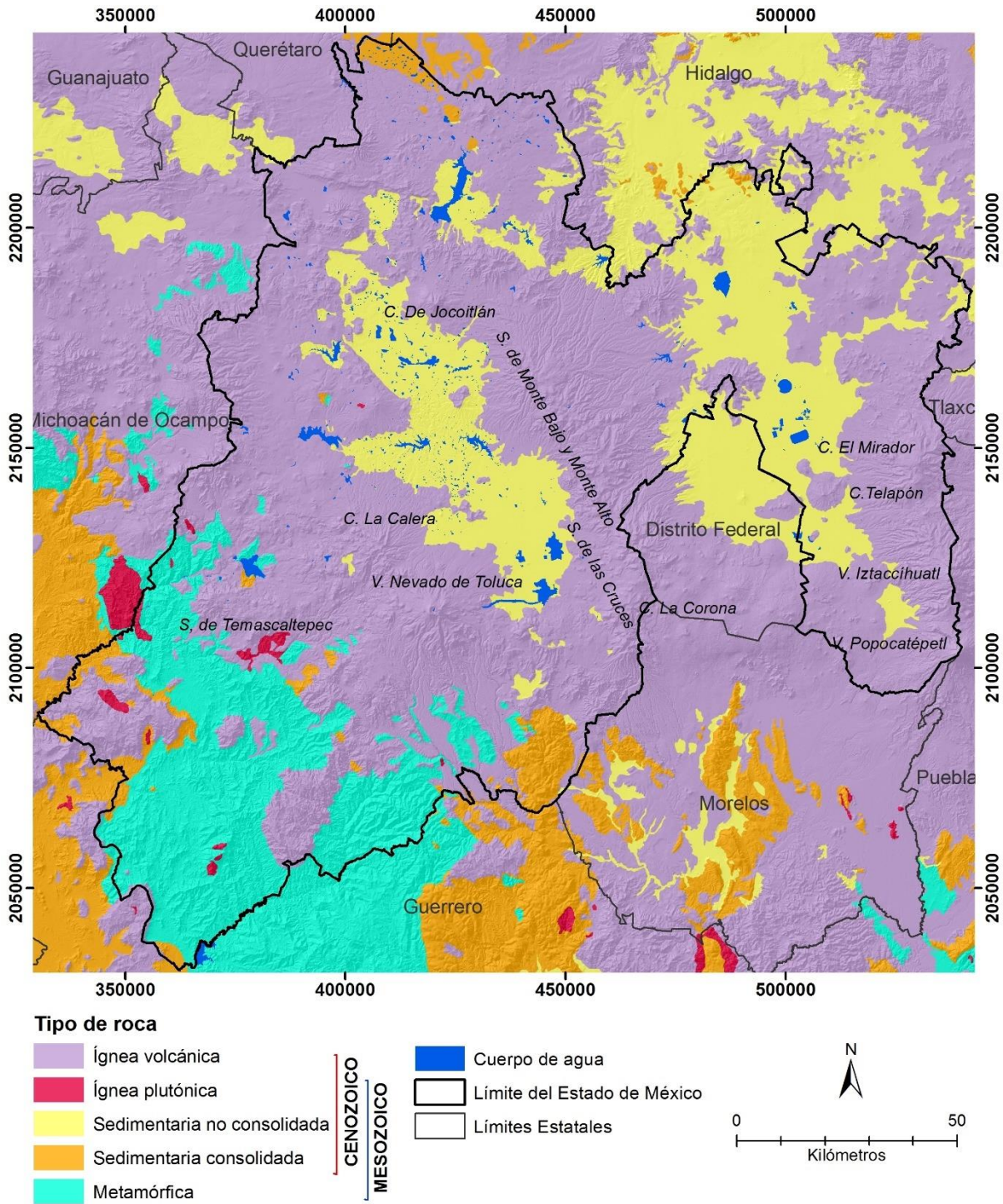


Figura 4.1. Mapa del tipo de roca de acuerdo con su génesis, con base a IFOMEGEM (2014).

Tabla 4.1. Clasificación del tipo de roca de acuerdo con su funcionamiento hidrogeológico.

| Permeabilidad                       | Tipo de roca                | Litología                             |                                  |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Fracturada                          | Volcánica                   | Andesita                              | Ignimbrita-Riolita               |
|                                     |                             | Andesita-Basalto                      | Riodacita                        |
|                                     |                             | Andesita-Brecha volcánica andesítica  | Riolita                          |
|                                     |                             | Andesita-Dacita                       | Riolita-Toba dacítica            |
|                                     |                             | Andesita-Toba andesítica              | Riolita-Toba riolítica           |
|                                     |                             | Basalto                               | Toba andesítica                  |
|                                     |                             | Basalto-Andesita                      | Toba andesítica-Andesita         |
|                                     |                             | Dacita                                | Toba dacítica-Riolita            |
|                                     |                             | Dacita-Andesita                       | Toba riolítica-Toba dacítica     |
|                                     |                             | Dacita-Riolita                        | Traquita                         |
| Plutónica                           | Diorita                     | Granodiorita-Diorita                  |                                  |
|                                     | Granito                     | Pórfido andesítico                    |                                  |
|                                     | Granito-Granodiorita        | Pórfido riolítico                     |                                  |
|                                     | Granodiorita                |                                       |                                  |
| Metamórfica                         | Esquisto-Pizarra            | Metacaliza-Metalutita                 |                                  |
|                                     | Meta-andesita-Meta-arenisca | Metagranito                           |                                  |
|                                     | Meta-arenisca-Metalutita    | Metavolcano-sedimentario              |                                  |
|                                     | Metacaliza                  | Meta-andesita-Arenisca                |                                  |
| Fracturada con posibilidad de carst | Sedimentaria consolidada    | Arenisca-Lutita                       | Conglomerado poligénico          |
|                                     |                             | Caliza                                | Conglomerado poligénico-Arenisca |
|                                     |                             | Caliza-Brecha sedimentaria monogénica | Conglomerado poligénico-Caliza   |
|                                     |                             | Caliza-Marga                          | Conglomerado poligénico-Limolita |
|                                     |                             | Conglomerado monogénico-Arenisca      | Lutita-Caliza                    |
| Porosa sedimentaria                 | Sedimentaria no consolidada | Aluvial                               | Lacustre                         |
| Porosa volcánica                    | Volcánica                   | Lahar<br>Lahar-Toba andesítica        | Piroclastos                      |

Las rocas sedimentarias consolidadas (no clásticas o no detríticas) con una permeabilidad que permite tener caudales generalmente elevados, ocupan una mínima porción en el sur del estado (7%) y son consideradas como rocas fracturadas con posibilidad de carst. Por otro lado, las rocas sedimentarias no consolidadas (detríticas o clásticas) se encuentran en el centro de la entidad estatal (18.9%), se presentan como aluviones y sedimentos lacustres, caracterizados como sedimentos muy permeables.

Finalmente, las rocas metamórficas están localizadas en la porción sur de la entidad (10.7%). Aunque en su mayoría se consideran poco permeables y de escasa capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas, debido a la porosidad secundaria originada por intemperismo se agruparon dentro de las rocas fracturadas.

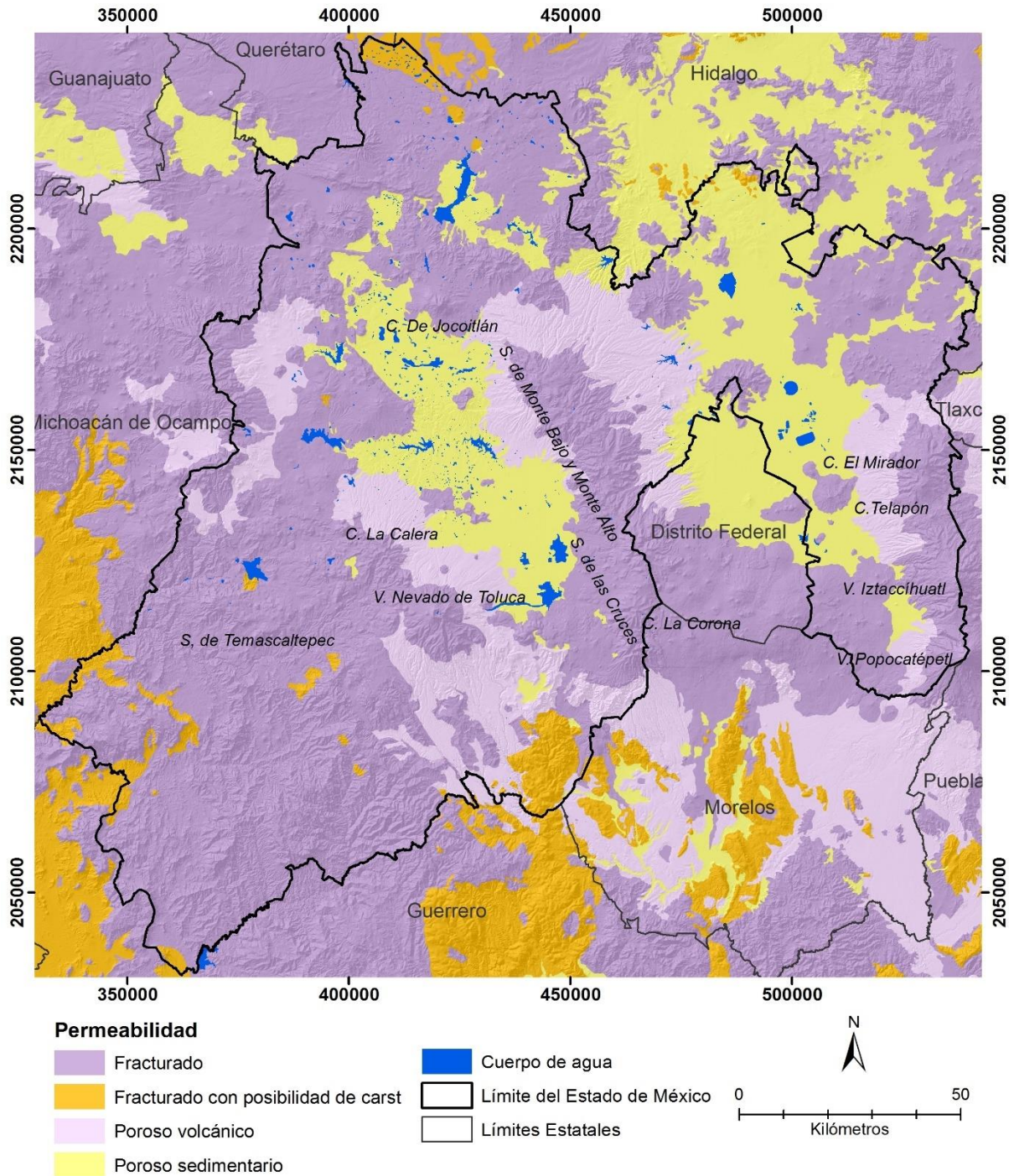


Figura 4.2. Mapa de clasificación de rocas de acuerdo a su funcionamiento hidrogeológico.

En síntesis, considerando sus características hidrogeológicas, las rocas fracturadas tanto de origen volcánico como metamórfico ocupan 61.7% del territorio estatal, sobre todo en las zonas de montaña. Las rocas fracturadas con posibilidad carst ocupan un 2.9%, y están localizadas en el sur del estado en zonas accidentadas. Las rocas volcánicas del medio poroso volcánico

conformadas por lahares, tobas y piroclastos ocupan 15.9% y las rocas sedimentarias porosas ocupan el 19.5% de la superficie total de la entidad.

#### 4.1.1.2. Geoformas

Los factores morfológicos considerados fueron: la pendiente del terreno que permitió distinguir tres geoformas principales, considerando la relación que guardan con sus características hidrogeológicas: *sierra*, *pedemonte* y *planicie* (Figura 4.3). Las zonas planas ocupan la mayor parte de la superficie estatal con un 37.25% del área total, el pedemonte 34.14% y las sierra 28.6%.

Las zonas planas se encuentran en el centro y noreste de la entidad, principalmente donde se encuentran los asentamientos urbanos; la zona de pedemonte en el borde de las zonas montañosas y; el relieve montañoso de mayor altitud en el centro y este del estado, y de menor altitud y más disectado al sur, más allá del Volcán Nevado de Toluca.

El sistema de montañas está compuesto tanto por rocas volcánicas como metamórficas a mayores y menores altitudes respectivamente en el área de estudio. Las montañas de la porción sur del estado forman un sistema de sierras disectadas que alojan a las principales rocas permeables y el mayor volumen de agua subterránea, lo cual (al igual que la sierra de rocas de tipo volcánico) permiten la surgencia de los manantiales.

El pedemonte constituye una transición entre los relieves montañosos, accidentados y las áreas bajas circundantes. Se forma en torno a las montañas y representa generalmente la zona donde comienza la ocupación del suelo y el asentamiento de una población. Estas zonas son elementos clave para la prioridad de protección de los manantiales.

Por otro lado, los terrenos de rocas duras presentan a menudo una topografía plana como consecuencia de su historial geológico de largos periodo de erosión.

De acuerdo al contexto geológicos y de las geoformas se puede determinar el tipo de manantial, pudiendo generar manantiales de gravedad donde el nivel de agua subterránea es interceptado por la superficie, o artesianos donde el agua brota por presión; o como manantiales hipodérmicos

donde el flujo de agua circula de manera rápida por vías cercanas a la superficie y que están situados sobre todo en los valles intermontanos.

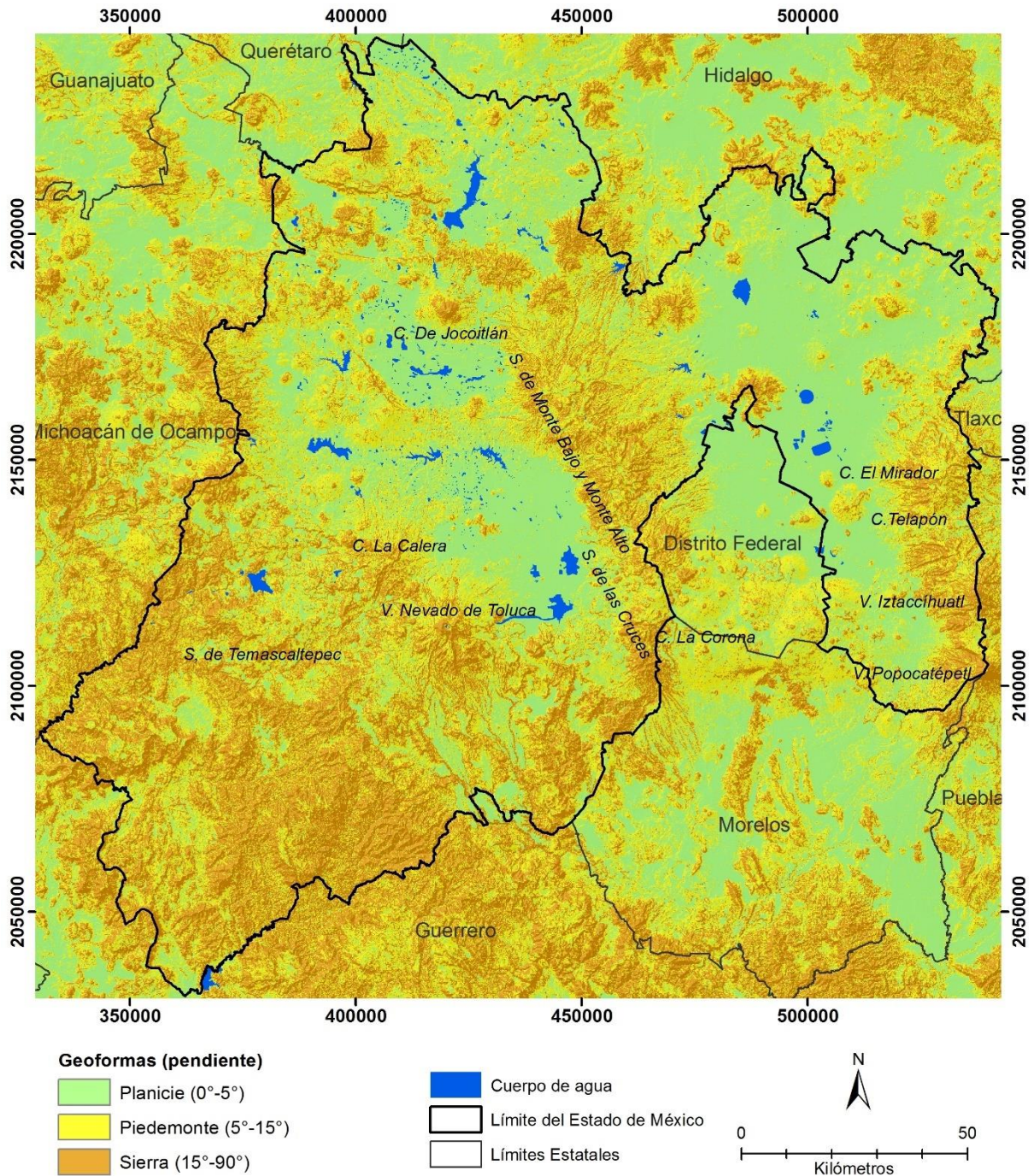


Figura 4.3. Mapa de clasificación de geofomas (con base en la pendiente del terreno) en relación a su funcionamiento hidrogeológico.

### 4.1.1.3. Precipitación

Con la precipitación promedio anual, se pudo clasificar la entidad en tres zonas que muestran la variabilidad pluvial: *lluvias abundantes, suficientes y escasas* (Figura 4.4).

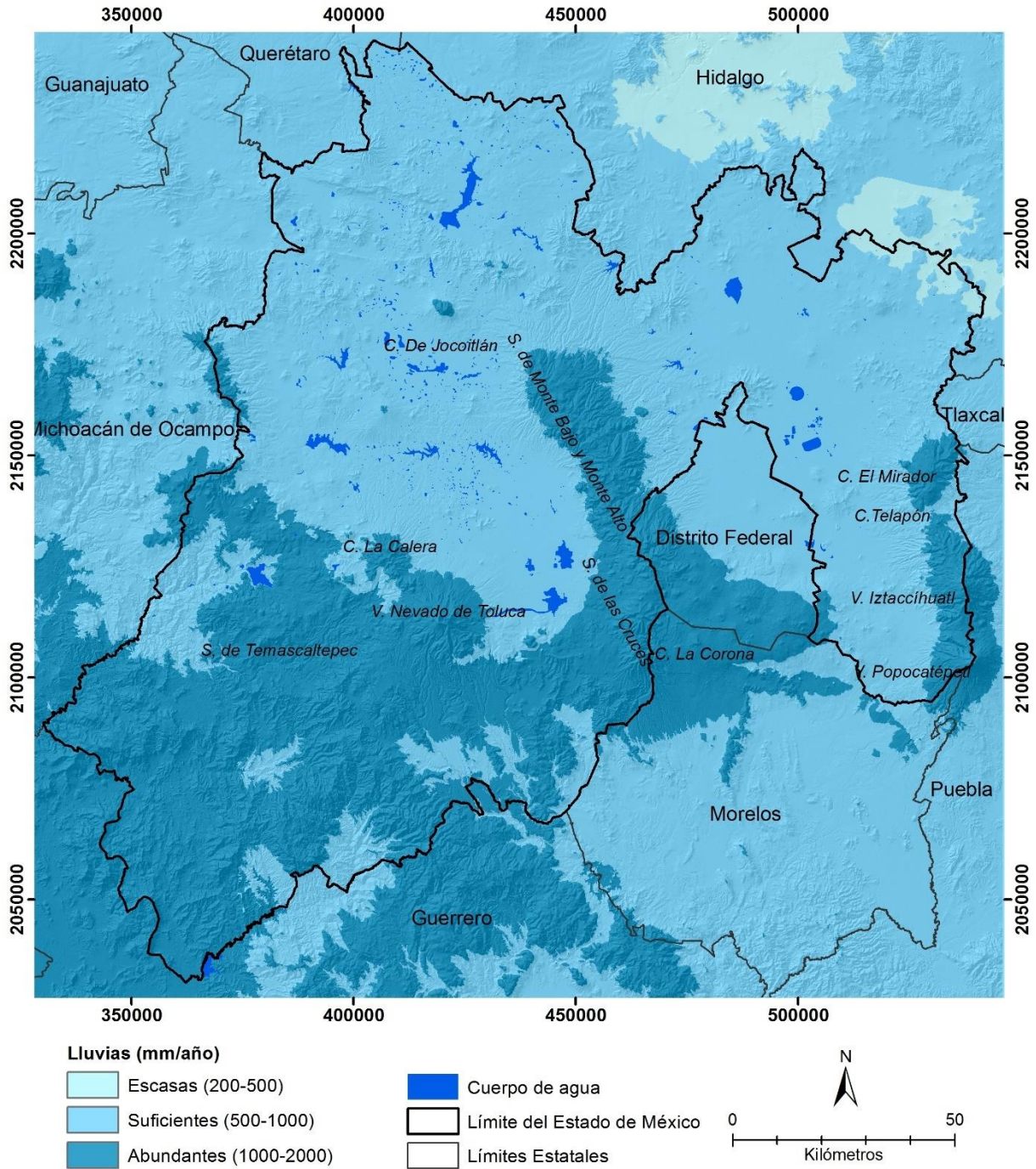


Figura 4.4. Mapa de clasificación de precipitación anual.



Las lluvias abundantes y suficientes predominan en el estado en un 36.7% y 62.7% respectivamente, y en el resto de la entidad son precipitaciones escasas (0.6%). Las mayores precipitaciones están asociadas a zonas montañosas disminuyendo de forma gradual hacia las zonas planas; además, determinan la estacionalidad y constancia del caudal de los manantiales.

La precipitación junto con las variables anteriores (tipo de roca y geoforma), juegan un papel importante en la caracterización de los manantiales. Por ejemplo, la precipitación influye en la estacionalidad y caudal del manantial, la topografía la manera en que el manantial emerge a la superficie y la geología e hidrogeología en la estructura y composición del medio rocoso, así como en la calidad y temperatura del agua.

Las geoformas, aunadas a la precipitación, ejercen una influencia fundamental en la hidrología de la zona por la pendiente del terreno; las variaciones altitudinales determinan que haya importantes gradientes meteorológicos y que la precipitación sea mayor o menor en ciertas zonas que otras; por ejemplo, los manantiales de tipo hipodérmicos en zonas montañosas tienen una estrecha relación con los patrones de precipitación, ya que tales flujos circulan de modo somero y rápido por ciertas formaciones permeables de escasa profundidad, que proceden de una rápida infiltración, una alta conductividad hidráulica y un retorno hacia la superficie, por lo que en zonas de menor altitud y pendientes este flujo no es relevante.

En síntesis, se pudieron distinguir varios ambientes: la presencia de rocas ígneas, volcánicas, metamórficas y sedimentarias consolidadas y no consolidadas, en ambientes hidrogeológicos diferentes tal como medio fracturado y poroso; terrenos de zonas planas, piedemonte y sierras; y zonas con distintos patrones de precipitación, con lluvias escasas a abundantes.

Dadas estas consideraciones, el tipo de roca, su condición hidrogeológica, geomorfológica y pluviométrica, se pueden estimar las características físicas, químicas e hidrodinámicas particulares de los manantiales, lo que brinda información de la composición y dinámica del subsuelo y la manera en que han de protegerse los manantiales.

La correlación de estas características es fundamental para la regionalización del área de estudio en la selección de manantiales y el tipo de protección a emplear.

### 4.1.2. Regionalización de las variables físicas

En la regionalización del área de estudio se asignó un número a cada una de las categorías de cada variable (permeabilidad de la roca, geoforma, y precipitación) para hacer una sobreposición de imágenes mediante el método empleado (Crosstab) (Tabla 4.2). El resultado fue la obtención de 30 regiones con las combinaciones de las clases de cada variable (Figura 4.5).

De las regiones resultantes, las cinco primeras ocuparon la mayor parte de la superficie de la entidad mexiquense; pero tomando en cuenta la heterogeneidad de sus características de permeabilidad, 8 resultaron de interés para el análisis: región 1, 2, 3, 4, 5, 6 7 y 14 (la 14 fue denominada como región 8 para fines prácticos hasta esta etapa) (Tabla 4.3).

Tabla 4.2. Clases por cada variable física (roca, geoforma, precipitación).

| Variable física   | Permeabilidad de la roca               | Geoforma      | Precipitación |
|-------------------|--|---------------|---------------|
| Clase (categoría) | 1. Fracturada                          | 1. Planicie   | 1. Abundante  |
|                   | 2. Fracturada con posibilidad de carst | 2. Piedemonte | 2. Suficiente |
|                   | 3. Porosa sedimentaria                 | 3. Sierra     | 3. Escasa     |
|                   | 4. Porosa volcánica                    |               |               |

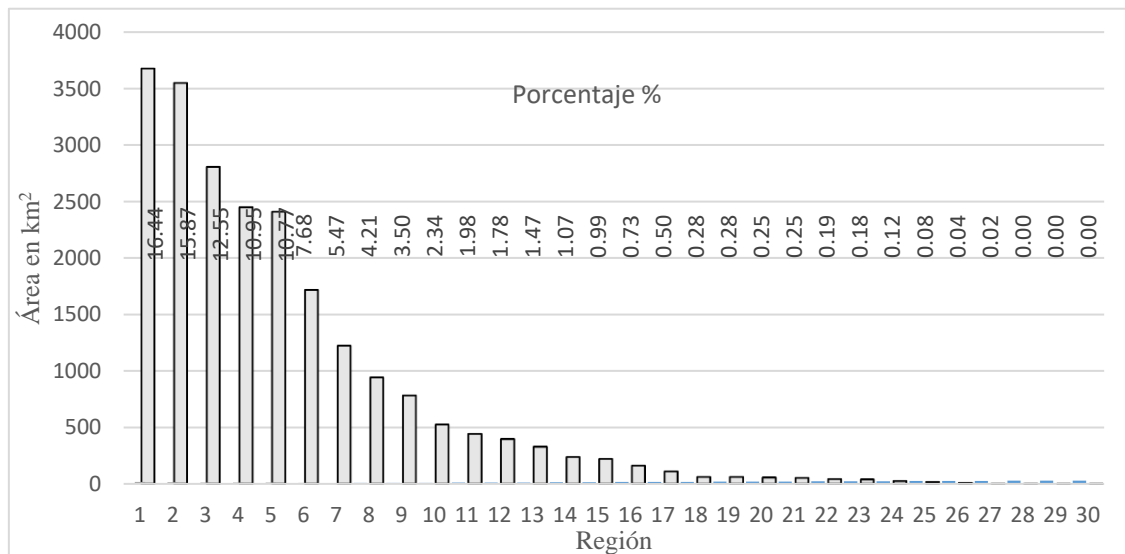


Figura 4.5. Extensión territorial por región en km<sup>2</sup>

Tabla 4.3. Clases de las regiones de interés

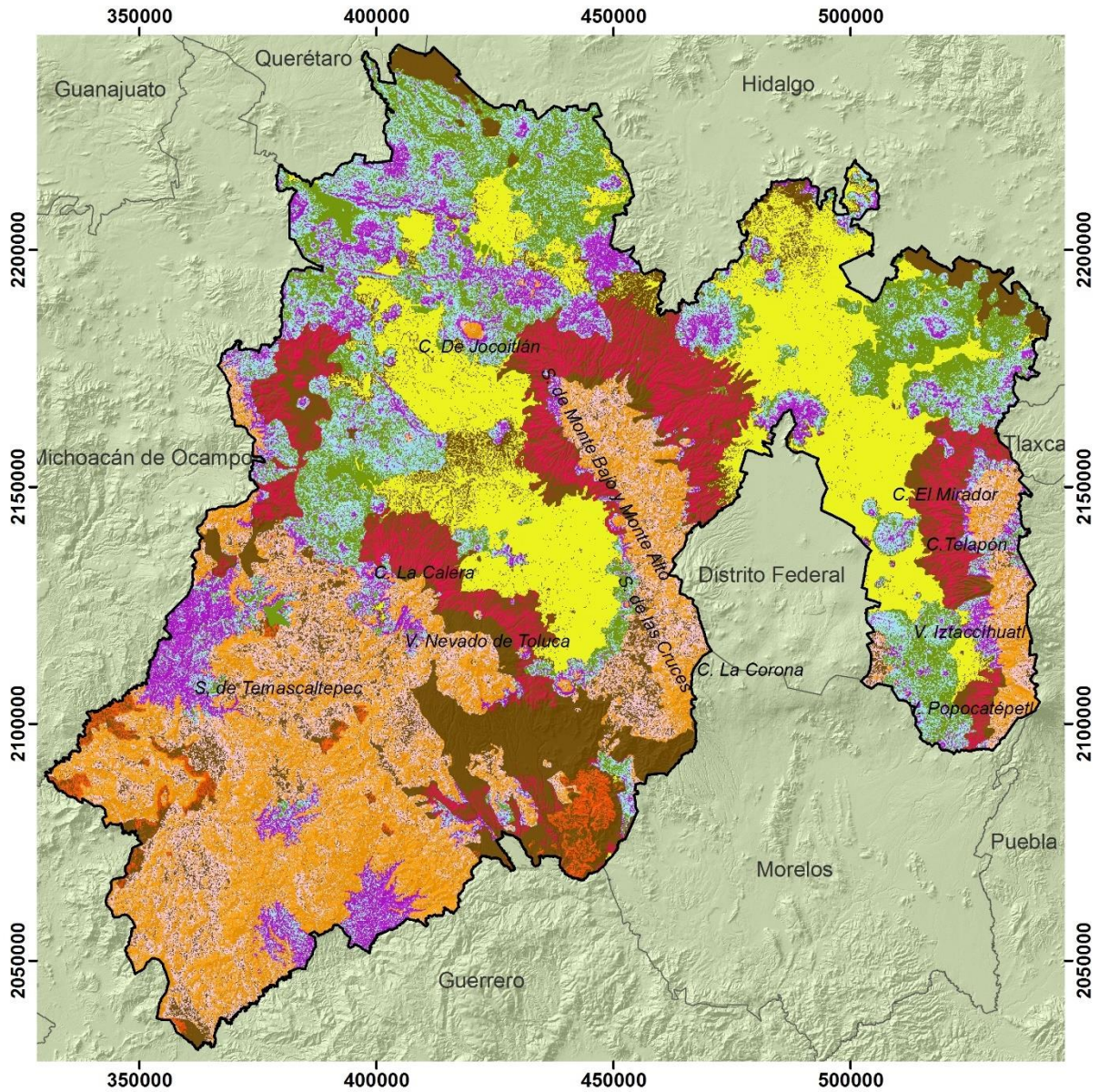
| Región | Km <sup>2</sup> | %     | Región    | Permeabilidad                       | Geoforma   | Precipitación |
|--------|-----------------|-------|-----------|-------------------------------------|------------|---------------|
| 1      | 3673.0          | 16.44 | 3   1   2 | Poroso sedimentario                 | Planicie   | Suficiente    |
| 2      | 3544.4          | 15.87 | 1   3   1 | Fracturado                          | Sierra     | Abundante     |
| 3      | 2804.0          | 12.55 | 1   2   2 | Fracturado                          | Piedemonte | Suficiente    |
| 4      | 2446.5          | 10.95 | 1   2   1 | Fracturado                          | Piedemonte | Abundante     |
| 5      | 2406.4          | 10.77 | 1   1   2 | Fracturado                          | Planicie   | Suficiente    |
| 6      | 1715.3          | 7.68  | 1   3   2 | Fracturado                          | Sierra     | Suficiente    |
| 7      | 1222.4          | 5.47  | 4   2   2 | Poroso volcánico                    | Piedemonte | Suficiente    |
| 8      | 239.0           | 1.07  | 2   3   1 | Fracturada con posibilidad de carst | Sierra     | Abundante     |
| Total  |                 | 81    |           |                                     |            |               |

De acuerdo al medio de la roca, las regiones de interés en su mayoría (57.8% aproximadamente) están compuestas por rocas fracturadas (volcánicas, metamórficas), regiones de rocas fracturadas con posibilidad de carst (sedimentarias consolidadas en 1.07%) que, a pesar de tener una extensión menor no son menos importantes, pues tienen relevancia por la diferenciación en su funcionamiento hidrogeológico (Figura 4.6).

Las rocas porosas se presentan en menor proporción, en rocas sedimentarias detríticas con 16.44% y volcánicas en 5.47% (lahares, tobas y piroclastos).

Las 8 regiones seleccionadas se encuentran tanto en zonas planas, piedemonte como en sierras, y con regímenes de lluvia suficientes y abundantes.

El motivo de seleccionar ciertas regiones fue para poder diferenciar y asociar sus características a los grupos de manantiales que se localizan en ellas.



**Regiones de interés**

| Región | Ext. % | Roca | Geof. | Prec. |
|--------|--------|------|-------|-------|
| 1      | 16.44  | PS   | PI    | S     |
| 2      | 15.87  | F    | Si    | A     |
| 3      | 12.55  | F    | P     | S     |
| 4      | 10.95  | F    | P     | A     |
| 5      | 10.77  | F    | PI    | S     |
| 6      | 7.68   | F    | Si    | S     |
| 7      | 5.47   | PV   | P     | S     |
| 8      | 1.07   | FK   | Si    | A     |

**Otras 19.19**

Ext % = Extensión  
 Geof. = Geoforma  
 Prec. = Precipitación  
 PS = Porosa sedimentaria  
 PV = Porosa volcánica  
 F = Fracturada  
 FK = Fracturado con posibilidad de karst  
 PI = Planicie  
 P = Piedemonte  
 Si = Sierra  
 S = Suficiente  
 A = Abundante

Límite del Estado de México  
 Límites Estatales

N  
 0 50  
 Kilómetros

Figura 4.6. Mapa de regionalización física del Estado de México.

## **4.2. Identificación, selección regional y clasificación de manantiales**

En este apartado se identificaron los manantiales existentes en el Estado de México, y se asociaron a las regiones previamente realizadas. Se seleccionaron los manantiales más representativos por región considerando el uso del agua y el volumen de agua asignado; y finalmente se clasificaron de acuerdo a sus características físicas.

### **4.2.1. Identificación y ubicación de manantiales**

La identificación de manantiales es el paso para asociar grupos de manantiales a regiones específicas y posteriormente llevar a cabo la protección de dichas fuentes. Se pudieron ubicar los manantiales en el Estado de México. Se contabilizaron 2937 manantiales que cuentan con títulos de concesión y asignación ante la CONAGUA (REPDA, 2015).

Los manantiales se presentan sobre todo en los bordes de las zonas más altas del estado: en las faldas del volcán Nevado de Toluca, sierra de Temascaltepec, Sierra de Monte Alto y Monte Bajo, sur del estado, así como en los límites con el estado de Michoacán, alejados de las zonas planas y urbanizadas (Figura 4.7). Corresponden sobre todo a lugares asociados con rocas fracturadas volcánicas y metamórficas en zonas de piedemonte y montañas con precipitaciones abundantes.

Es importante mencionar que en otras zonas del Estado de México hay más manantiales, como así lo reporta la SMA (2014) que ha contabilizado más de 10,000 manantiales en su inventario, sin mencionar aquellos que no tienen registro y que no tienen ningún uso.

### **4.2.2. Selección de manantiales a nivel regional**

En el Estado de México el agua de los manantiales es destinada a diferentes usos: público urbano (incluida generación de energía eléctrica), agrícola, acuacultura, múltiple, doméstico, servicios, industrial, pecuario y agroindustrial. Los tres primeros destinan los mayores volúmenes de agua a la población, con aproximadamente el 91% (Tabla 4.4 y Figura 4.8).

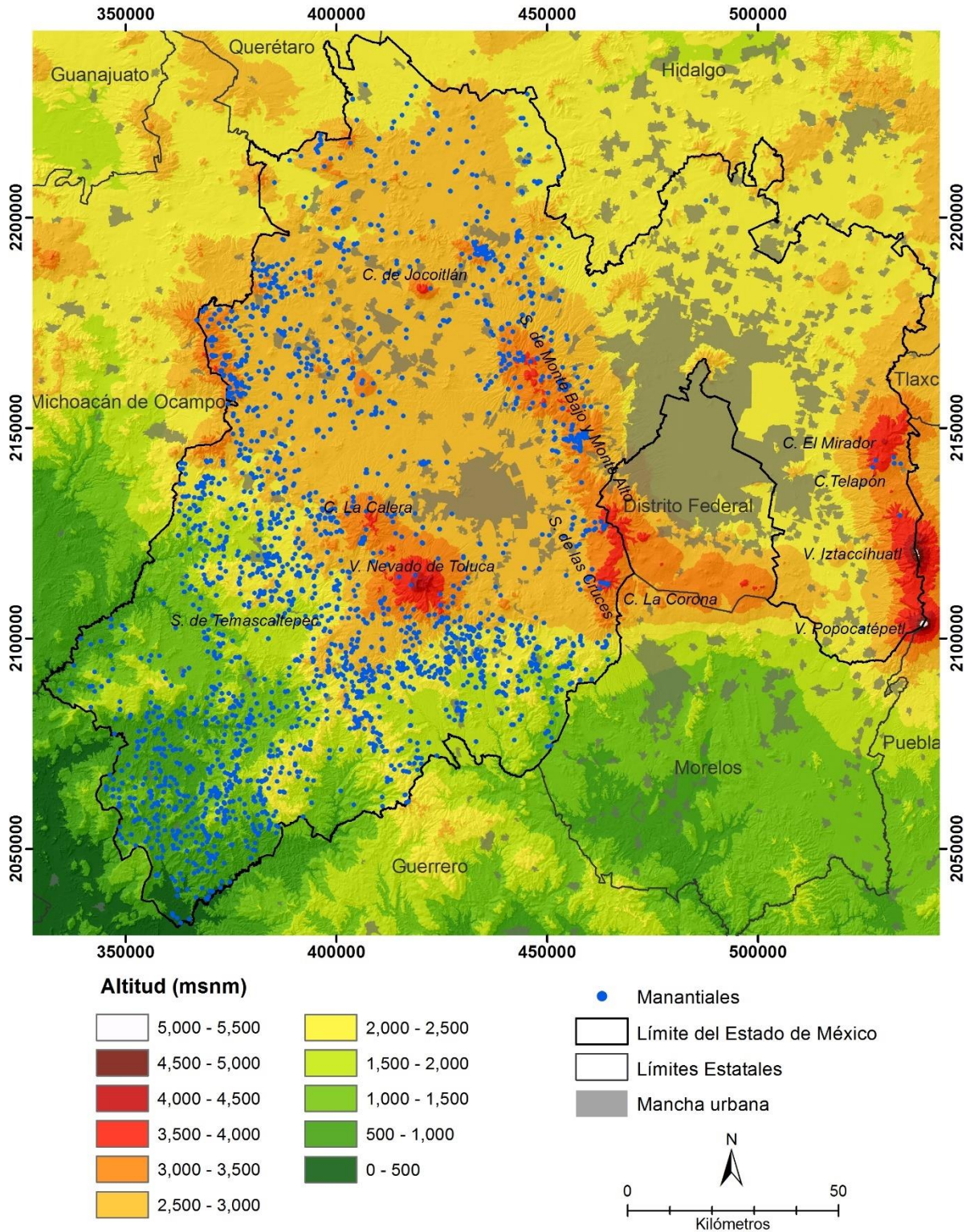


Figura 4.7. Mapa de ubicación de los manantiales con títulos de asignación, con base en REPDA (2015).

Tabla 4.4. Uso y volúmenes de agua de manantiales asignados, con base en REPDA (2015).

| Uso que ampara el título | No. de títulos | Volumen (m <sup>3</sup> /año) | % de uso del agua |
|--------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------|
| Público urbano           | 1997           | 94,869,976                    | 34.532            |
| Agrícola                 | 527            | 85,770,140                    | 31.220            |
| Acuacultura              | 97             | 68,916,431                    | 25.085            |
| Múltiple                 | 176            | 19,936,011                    | 7.257             |
| Doméstico                | 110            | 3,348,043                     | 1.219             |
| Servicios                | 7              | 1,648,593                     | 0.600             |
| Industrial               | 2              | 172,768                       | 0.063             |
| Pecuario                 | 20             | 55,386                        | 0.020             |
| Agroindustrial           | 1              | 12,614                        | 0.005             |
| Total                    | 2937           | 274,729,961                   | 100               |

El uso público urbano es el que tiene mayor número de manantiales con títulos de asignación (desde el año 1997) y por supuesto es el de mayor importancia, por esta razón se dio prioridad. Los usos agrícola y acuacultura, aunque tienen menos manantiales (527 y 97 respectivamente), tienen un volumen de asignación importante, pero no son objeto de este trabajo de investigación (REPDA, 2015).<sup>17</sup>

Como se ha mencionado, se optó por seleccionar los manantiales del uso público urbano, por su importancia como fuente de abastecimiento de agua potable por lo que tienen preferencia respecto a cualquier otro uso según la Ley de Aguas Nacionales (LAN, 2014). Por lo tanto, es indispensable establecer prioridades de acciones para el aprovechamiento de este tipo de manantiales y hacer énfasis en su protección.

El trabajo de gabinete fue una buena herramienta para generar información y se verificó con trabajo de campo para corroborar las características de los manantiales y establecer una relación de similitudes o de contrastes con la información a diferentes escalas de trabajo (escala regional de gabinete y local en campo).

En una primera fase (trabajo de gabinete), se eligieron los 5 manantiales más representativos por región de acuerdo al volumen asignado de agua para el uso público urbano. El resultado fue elegir un total de 40 manantiales (para las 8 regiones) (Tabla 4.5 y Figura 4.9). Una vez identificados los manantiales, la segunda fase consistió en corroborar sus características con

<sup>17</sup> Los títulos de asignación de agua subterránea tienen fecha de registro de 1994 al 2014.

trabajo de campo. Se realizó una campaña de reconocimiento de los manantiales seleccionados en los meses de abril, julio y agosto de 2016.

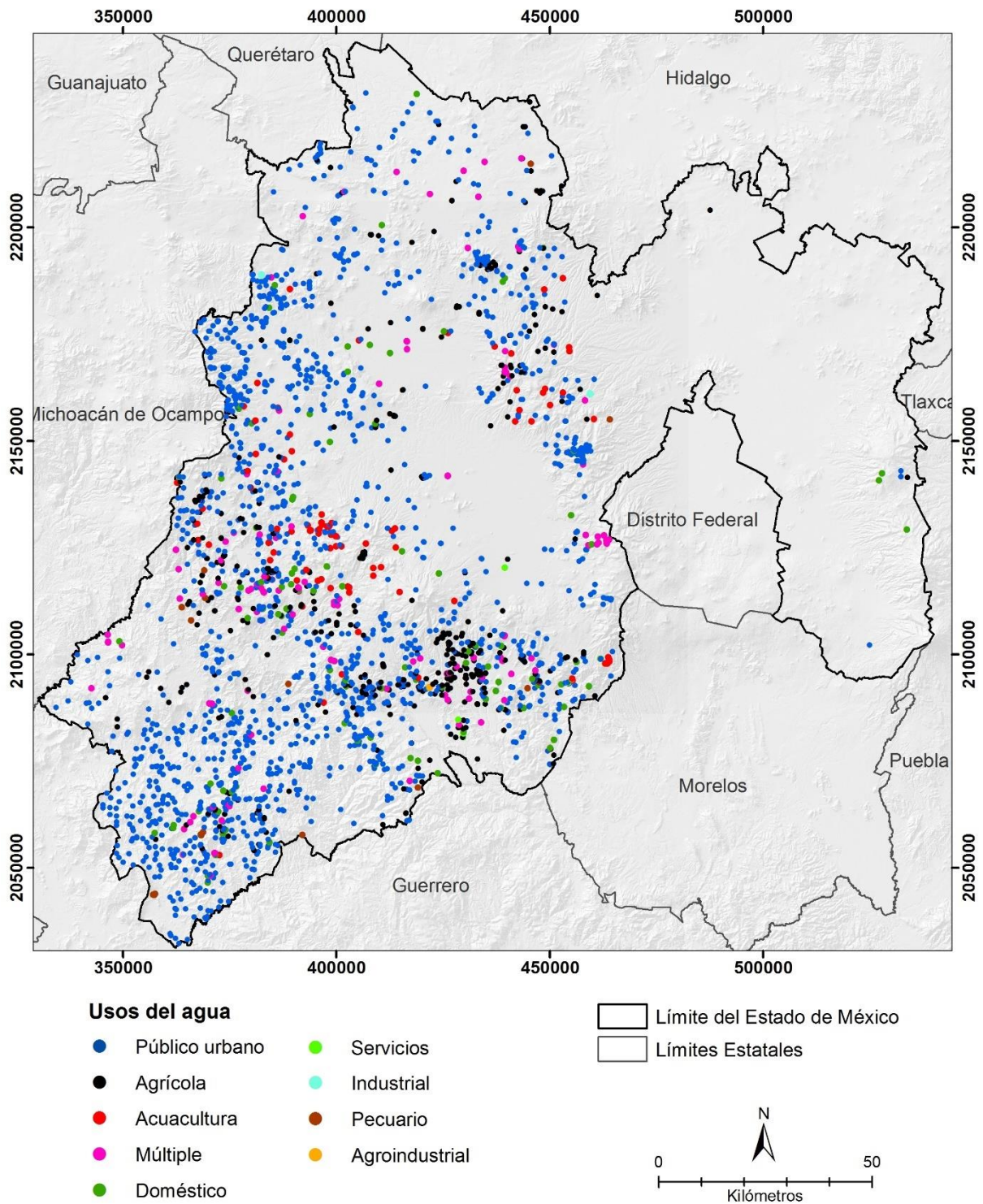


Figura 4.8. Mapa de ubicación de los manantiales por uso de agua, con base en REPDA (2015).



Tabla 4.5. Listado de manantiales seleccionados regionalmente para el uso público urbano.

| No. | Reg. | Titular  | Volumen<br>m <sup>3</sup> /año | Municipio          | Manantial                  |
|-----|------|--|--------------------------------|--------------------|----------------------------|
| 1   | 1    | OPDAP del Municipio de Jocotitlán  | 883008                         | Jocotitlán         | Las Fuentes                |
| 2   | 1    | Comité De Agua Potable San Antonio Acahualco   | 419750                         | Zinacantepec       | El Capulín                 |
| 3   | 1    | Municipio de Isidro Fabela*  | 190477                         | Isidro Fabela      | Los Capulines              |
| 4   | 1    | Comité de Agua Potable de la Cabecera Municipal de Calimaya  | 189216                         | Calimaya           | La Ciénega                 |
| 5   | 1    | Municipio de Almoloya de Juárez (Cabecera Municipal Primera y Segunda Sección)   | 168812                         | Almoloya de Juárez | Ojo de Agua                |
| 6   | 2    | APAS de Valle de Bravo   | 2049840                        | Valle de Bravo     | Los Álamos I               |
| 7   | 2    | Municipio de Temascaltepec   | 1441826                        | Temascaltepec      | Real de Arriba (El Fresno) |
| 8   | 2    | Municipio de Villa Guerrero (Los Ranchos, San José, El Moral, San Diego, San Miguel, San Lucas, La Joya, El Islote, Buenavista, San Francisco y San Felipe)* | 1040630                        | Tenango del Valle  | La Estrella                |
| 9   | 2    | H. Ayuntamiento de Temascaltepec (Cabecera Municipal)  | 630720                         | Temascaltepec      | Real Arriba (La Peña)      |
| 10  | 2    | SAPAS del Municipio de Tenancingo  | 630720                         | Tenancingo         | Las Huertas                |
| 11  | 3    | H. Ayuntamiento de Villa Guerrero  | 298050                         | Villa Guerrero     | Los Fresnos                |
| 12  | 3    | Municipio de Jocotitlán (Santiago Yeche)   | 283784                         | Jocotitlán         | Las Fuentes Yeche          |
| 13  | 3    | Municipio de Donato Guerra*  | 191423                         | Donato Guerra      | El Túnel Agua Escondida    |
| 14  | 3    | H. Ayuntamiento de Capulhuac (San Miguel Almaya)*  | 173375                         | Capulhuac          | El Santuario del Agua      |
| 15  | 3    | H. Ayuntamiento de Malinalco   | 157680                         | Malinalco          | San Miguel I               |
| 16  | 4    | Comisión Estatal de Agua y Saneamiento   | 9900200                        | Temascaltepec      | Chichotla                  |
| 17  | 4    | Municipio de Valle de Bravo*   | 3372545                        | Valle de Bravo     | Los Trucheros              |
| 18  | 4    | Municipio de Ocuilan*  | 1741214                        | Ocuilan            | Acahualtzingo              |
| 19  | 4    | APAS de Valle de Bravo   | 252280                         | Valle de Bravo     | Agua Fría                  |
| 20  | 4    | H. Ayuntamiento de Tenango del Valle (Monte Calvario y El Coloso)  | 86686                          | Tenango del Valle  | San Pedrito                |
| 21  | 5    | H. Ayuntamiento de Malinalco   | 946080                         | Malinalco          | El Sabino                  |
| 22  | 5    | Municipio de Coatepec Harinas (Cabecera Municipal)*  | 408391                         | Coatepec Harinas   | El Zacatón                 |
| 23  | 5    | APAS de Valle de Bravo*  | 378432                         | Valle de Bravo     | Fontana Luz                |
| 24  | 5    | Municipio de Almoloya de Juárez (San Francisco Tlalcilcalpan)*   | 319375                         | Almoloya de Juárez | El Túnel                   |
| 25  | 5    | H. Ayuntamiento de Malinalco   | 189216                         | Malinalco          | San Miguel II              |
| 26  | 6    | Municipio de Santo Tomás*  | 498827                         | Santo Tomas        | Barranca Honda             |
| 27  | 6    | Municipio de Ixtapan del Oro   | 362938                         | Ixtapan del Oro    | La Rastra                  |
| 28  | 6    | APAS de Valle de Bravo   | 356357                         | Valle de Bravo     | El Durazno                 |
| 29  | 6    | Municipio de Tlatlaya*   | 1616729                        | Tlatlaya           | Los Mangos                 |
| 30  | 6    | Municipio de Texcaltitlán*   | 756346                         | Texcaltitlán       | Ojo de Agua                |
| 31  | 7    | Municipio de Villa Guerrero  | 3284507                        | Villa Guerrero     | El Durazno                 |
| 32  | 7    | Municipio de Villa de Allende*   | 2548495                        | Villa de Allende   | Los Nogales                |

\*En asterisco los manantiales no visitados

Tabla 4.5. Listado de manantiales seleccionados regionalmente para el uso público urbano (continuación).

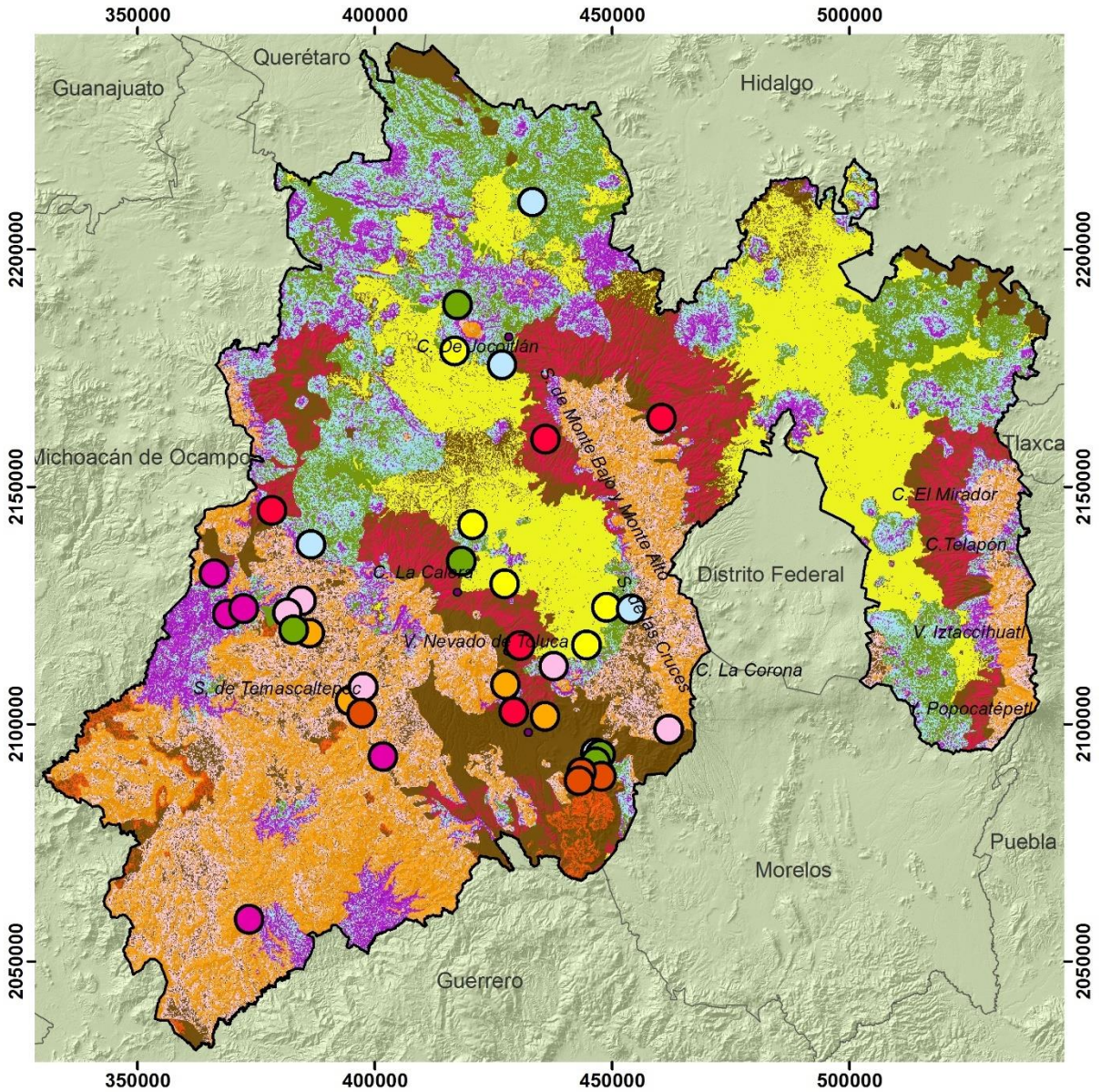
| No. | Reg. | Titular   | Volumen m <sup>3</sup> /año | Municipio             | Manantial            |
|-----|------|---|-----------------------------|-----------------------|----------------------|
| 32  | 7    | Municipio de Villa de Allende*                              | 2548495                     | Villa de Allende      | Los Nogales          |
| 33  | 7    | Manzana Sexta   | 410625                      | Jiquipilco            | Ojo de Agua y Nedeni |
| 34  | 7    | Municipio de Isidro Fabela*                                 | 204668                      | Isidro Fabela         | Agua Azul            |
| 35  | 7    | Comité de Agua Potable de la Cabecera Municipal de Calimaya | 189217                      | Calimaya              | Ojo de la Virgen     |
| 36  | 8    | H. Ayuntamiento de Malinalco (San Nicolás)                  | 31536                       | Malinalco             | Atlihuayan           |
| 37  | 8    | H. Ayuntamiento de Malinalco*                               | 18922                       | Malinalco             | Pozo El Tanque       |
| 38  | 8    | H. Ayuntamiento de Malinalco (Poblado El Zapote)*           | 15768                       | Malinalco             | El Aile              |
| 39  | 8    | H. Ayuntamiento de Malinalco (Poblado El Zapote)*           | 15768                       | Malinalco             | El Sauce             |
| 40  | 8    | Municipio de San Simón de Guerrero (Barrio San Pedro)*      | 13687                       | San Simón de Guerrero | Peña Larga           |

\*En asterisco los manantiales no visitados

De los 40 manantiales seleccionados en esta primera etapa, fue posible visitar 22 con base en el REPDA, correspondientes a 12 municipios (Almoloya de Juárez, Calimaya, Ixtapan del Oro, Jiquipilco, Jocotitlán, Malinalco, Temascaltepec, Tenancingo, Tenango del Valle, Valle de Bravo, Villa Guerrero y Zinacantepec). Estos correspondieron a las regiones 2, 3, 4, 5, 6 y 7 de zonas fracturadas volcánicas y porosas volcánicas.

En la región 1 caracterizada como medio poroso sedimentario no se identificaron (en campo) manantiales para uso público urbano; los pocos manantiales que hubo en esta región son destinados a otros usos de agua, sobre todo al uso agrícola.

En la región 8 con posibilidad de carst sólo se pudo visitar un manantial, el resto no se visitó debido a la complicación en el acceso. Al verificar en campo que dicho manantial no se encontraban en una zona cárstica sino en una volcánica, se optó (con el apoyo de la cartografía y de los Organismos Operadores) por elegir 5 manantiales más (en Malinalco), que debieran corresponder a este tipo región (sumando así en total 27 manantiales visitados en campo); sin embargo, no fue posible encontrar diferencias, ni tampoco obtener el dato de volumen de agua abastecido, debido a que no se encuentran registrados en la base de datos del REPDA. Por lo tanto, esta región tampoco se consideró porque no tiene manantiales representativos.



**Manantiales por región**

| Región | Ext. %  | Roca | Geof. | Prec. |
|--------|---------|------|-------|-------|
|        | 1 16.44 | PS   | PI    | S     |
|        | 2 15.87 | F    | Si    | A     |
|        | 3 12.55 | F    | P     | S     |
|        | 4 10.95 | F    | P     | A     |
|        | 5 10.77 | F    | PI    | S     |
|        | 6 7.68  | F    | Si    | S     |
|        | 7 5.47  | PV   | P     | S     |
|        | 8 1.07  | FK   | Si    | A     |

Otras 19.19

Ext % = Extensión  
 Geof. = Geoforma  
 Prec. = Precipitación  
 PS = Porosa sedimentaria  
 PV = Porosa volcánica  
 F = Fracturada  
 FK = Fracturado con posibilidad de karst  
 PI = Planicie  
 P = Piedemonte  
 Si = Sierra  
 S = Suficiente  
 A = Abundante

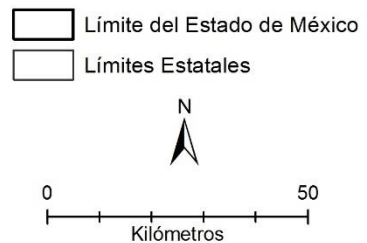


Figura 4.9. Mapa de manantiales seleccionados a nivel regional.

Las diferencias o contrastes existentes entre las características de los manantiales se deben a que la escala de trabajo que se utilizó como punto de partida es regional y difiere de la escala local. Una escala regional no permite vislumbrar a detalle la información hallada en el sitio.

De los manantiales seleccionados regionalmente fue posible visitar 27 manantiales en total: 24 manantiales son manejados por Organismos Operadores y 3 por Comités de Agua (sin dato de volumen de asignación). Los manantiales correspondientes a zonas de rocas fracturadas (volcánicas y metamórficas) y rocas porosas (volcánicas y sedimentarias). El resto de los manantiales enlistados en la selección regional (marcados con asterisco) no se visitaron debido a que no se dio autorización para acudir a las instalaciones ni a los pueblos, por cuestiones de seguridad, por conflictos que había entre comunidades o por acceso restringido a las instalaciones (sólo personal autorizado).

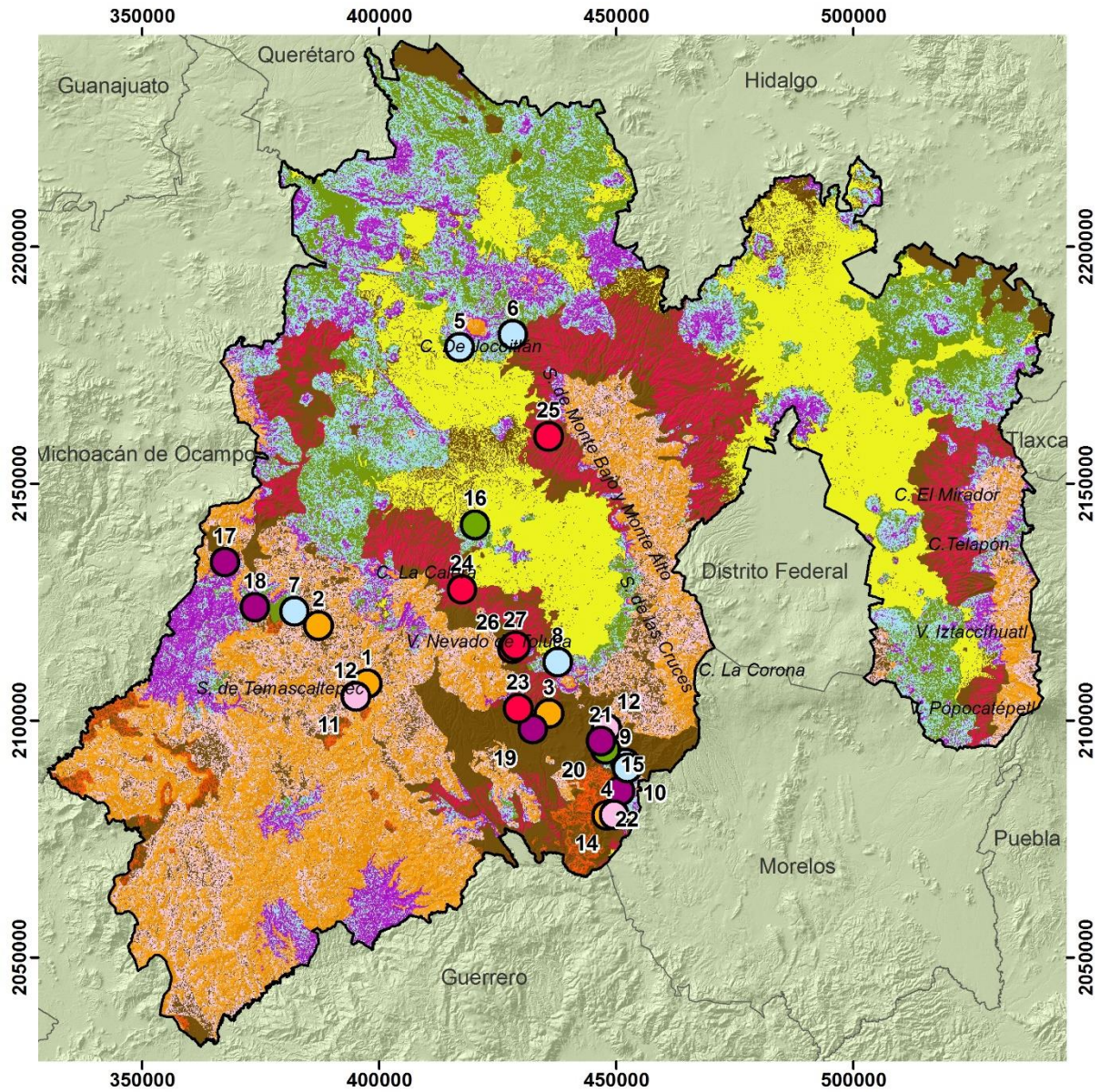
En el análisis se observó que las coordenadas de los 27 manantiales publicadas en el REPDA difieren hasta en 100 m de las que se registraron en campo. Los manantiales están localizados al centro, norte y suroeste del Estado de México (En el Anexo 1 se muestran fotografías de cada uno de los manantiales). Al mismo tiempo, a escala regional hay manantiales que se encuentran en los límites de las regiones y es a escala local donde se definen sus características. De este modo, algunos de ellos cambiaron de región (Tabla 4.6 y Figura 4.10)

Por ejemplo, en la cartografía regional hay manantiales que se encuentran en las regiones de los cuatro tipos de roca; sin embargo, con el análisis de las rocas realizada en laboratorio fue posible definir que sólo se encuentran en dos (rocas fracturadas y porosas volcánicas).

En este sentido, las características de algunos manantiales variaron tanto en el tipo de roca (roca fracturada, fracturada con posibilidad de carst y porosa volcánica y sedimentaria) como en el tipo de pendiente (zonas planas, de piedemonte y sierras). Respecto a los regímenes de lluvia, estos permanecen en lluvias suficientes y abundantes.

Tabla 4.6. Características de los 27 manantiales visitados en campo.

| No. | Reg. | Manantial                     | Municipio          | Roca predominante               | Permeabilidad    | Geoforma   | Precipitación |
|-----|------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------|------------|---------------|
| 1   | 2    | Chichotla                     | Temascaltepec      | Andesita,                       | Fracturado       | Sierra     | Abundante     |
| 2   | 2    | Los Álamos I                  | Valle de Bravo     | Basalto                         | Fracturado       | Sierra     | Abundante     |
| 3   | 2    | Las Huertas                   | Tenancingo         | Andesita                        | Fracturado       | Sierra     | Abundante     |
| 4   | 2    | El pozo                       | Malinalco          | Andesita                        | Fracturado       | Sierra     | Abundante     |
| 5   | 3    | Las Fuentes                   | Jocotitlán         | Basalto                         | Fracturado       | Piedemonte | Suficiente    |
| 6   | 3    | Las Fuentes Yече              | Jocotitlán         | Autobrecha volcánica            | Fracturado       | Piedemonte | Suficiente    |
| 7   | 3    | Agua Fría                     | Valle de Bravo     | Andesita                        | Fracturado       | Piedemonte | Suficiente    |
| 8   | 3    | San Pedrito                   | Tenango del Valle  | Basalto                         | Fracturado       | Piedemonte | Suficiente    |
| 9   | 3    | La Joya del Sol               | Malinalco          | Basalto afanítico               | Fracturado       | Piedemonte | Suficiente    |
| 10  | 3    | Puente Caporal                | Malinalco          | Andesita                        | Fracturado       | Piedemonte | Suficiente    |
| 11  | 4    | Real de Arriba (El Fresno)    | Temascaltepec      | Andesita afanítica              | Fracturado       | Piedemonte | Abundante     |
| 12  | 4    | Real de Arriba (La Peña)      | Temascaltepec      | Andesita afanítica              | Fracturado       | Piedemonte | Abundante     |
| 13  | 4    | Atlihuayan                    | Malinalco          | Andesita intermedia             | Fracturado       | Piedemonte | Abundante     |
| 14  | 4    | Los Pozos del Aguacate        | Malinalco          | Pizarra (fue lutita)            | Fracturado       | Piedemonte | Abundante     |
| 15  | 5    | El Sabino                     | Malinalco          | Andesita porfídica              | Fracturado       | Planicie   | Suficiente    |
| 16  | 5    | Ojo de Agua                   | Almoloya de Juárez | Basalto                         | Fracturado       | Planicie   | Suficiente    |
| 17  | 6    | La Rastra                     | Ixtapan del Oro    | Autobrecha volcánica            | Fracturado       | Sierra     | Suficiente    |
| 18  | 6    | El Durazno (Valle)            | Valle de Bravo     | Basalto vesiculado              | Fracturado       | Sierra     | Suficiente    |
| 19  | 6    | Los Fresnos                   | Villa Guerrero     | Dasita y basalto                | Fracturado       | Sierra     | Suficiente    |
| 20  | 6    | San Miguel II                 | Malinalco          | Ignimbrita                      | Fracturado       | Sierra     | Suficiente    |
| 21  | 6    | San Miguel I                  | Malinalco          | Ignimbrita                      | Fracturado       | Sierra     | Suficiente    |
| 22  | 6    | Los Terrones III (Chichiasco) | Malinalco          | Andesita porfídica              | Fracturado       | Piedemonte | Suficiente    |
| 23  | 7    | El Durazno                    | Villa Guerrero     | Andesita y lahares              | Poroso volcánico | Piedemonte | Abundante     |
| 24  | 7    | El Capulín                    | Zinacantepec       | Piroclástico                    | Poroso volcánico | Piedemonte | Suficiente    |
| 25  | 7    | Ojo de Agua y Nedeni          | Jiquipilco         | Andesita y lahares              | Poroso volcánico | Piedemonte | Suficiente    |
| 26  | 7    | Ojo de la Virgen              | Calimaya           | Andesita, depósito de avalancha | Poroso volcánico | Piedemonte | Suficiente    |
| 27  | 7    | La Ciénega                    | Calimaya           | Andesita, depósito de avalancha | Poroso volcánico | Piedemonte | Suficiente    |



**Manantiales y regiones**

| Región | Ext. % | Roca  | Geof. | Prec. |   |
|--------|--------|-------|-------|-------|---|
|        | 1      | 16.44 | PS    | PI    | S |
|        | 2      | 15.87 | F     | Si    | A |
|        | 3      | 12.55 | F     | P     | S |
|        | 4      | 10.95 | F     | P     | A |
|        | 5      | 10.77 | F     | PI    | S |
|        | 6      | 7.68  | F     | Si    | S |
|        | 7      | 5.47  | PV    | P     | S |
|        | 8      | 1.07  | FK    | Si    | A |

Otras 19.19  
 Ext % = Extensión  
 Geof. = Geoforma  
 Prec. = Precipitación  
 PS = Porosa sedimentaria  
 PV = Porosa volcánica  
 F = Fracturada  
 FK = Fracturado con posibilidad de karst  
 PI = Planicie  
 P = Piedemonte  
 Si = Sierra  
 S = Suficiente  
 A = Abundante

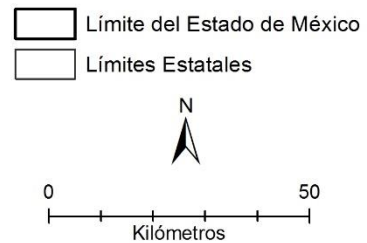


Figura 4.10. Mapa de manantiales seleccionados a nivel regional y visitados en campo.

En síntesis, de los 27 manantiales visitados en campo, 22 de ellos se identificaron en zonas de rocas fracturadas y 5 en rocas porosas volcánicas; 9 en zona de sierra, 16 en zonas de piedemonte y 2 en zonas planas; y finalmente, 9 con precipitación abundante y 18 con precipitación suficiente.

Para poder jerarquizar la prioridad de los manantiales a proteger con base en la regionalización, se tomó en consideración la disponibilidad de información y poder llevar a cabo el MCE; por esta razón se trabajó con la información disponible de 23 manantiales que correspondieron a las 6 regiones (región 2, 3, 4, 5, 6 y 7). De la región 1 (en medio poroso sedimentario) y la región 8 (en medio fracturado con posibilidad de carst) no hay manantiales representativos. Éstas dos no se consideran porque los manantiales visitados se encuentran sólo en medios fracturados y porosos volcánicos.

Para fines prácticos del presente trabajo se asigna una nueva numeración a las 6 regiones en las que hay manantiales representativos. Las regiones originales 1 y 8 se omitieron (Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Reasignación de numeración a las regiones que cuentan con manantiales representativos

| Nueva numeración de la región | Número de la región original | Permeabilidad    | Geoforma   | Precipitación |
|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------|---------------|
| 1                             | 2                            | Fracturado       | Sierra     | Abundante     |
| 2                             | 3                            | Fracturado       | Piedemonte | Suficiente    |
| 3                             | 4                            | Fracturado       | Piedemonte | Abundante     |
| 4                             | 5                            | Fracturado       | Planicie   | Suficiente    |
| 5                             | 6                            | Fracturado       | Sierra     | Suficiente    |
| 6                             | 7                            | Poroso volcánico | Piedemonte | Suficiente    |

#### 4.2.3. Parámetros fisicoquímicos de los manantiales

Para la etapa de reconocimiento de los manantiales (selección regional) se tomaron mediciones in-situ para determinar algunos parámetros físicoquímicos, los cuales fueron muestreados en los meses de abril, julio y agosto de 2016 (Tabla 4.8).

A partir de los datos obtenidos fue posible predecir la composición físicoquímica de los manantiales y hacer una caracterización de dichas fuentes de abastecimiento público.

Tabla 4.8. Parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua de los manantiales (muestreo campaña de reconocimiento)

| No. | Reg. | Manantial                      | Fecha de 1er muestreo | Tem °C                     | pH   | C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$ | S.T.D. ppm | Sal psu | ORP Mv |  |  |
|-----|------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|------|------------------------------|------------|---------|--------|--|--|
| 1   | 1    | Chichotla                      | 26-04-2016            | 19.7                       | 6.78 | 171.1                        | 84.4       | 0.133   | 480.2  |  |  |
| 2   | 1    | Los Álamos I                   | 18-04-2016            | 17                         | 7.48 | 115.1                        | 56.9       | 0.106   | 158.5  |  |  |
| 3   | 1    | Las Huertas                    | 12-04-2016            | 16.8                       | 7.8  | 162.6                        | 80.2       | 0.128   | 86.3   |  |  |
| 4   | 1    | El pozo                        | 01-08-2016            | 22.7 caja                  | 6.85 | 848                          | 419.8      | 0.487   | -      |  |  |
| 5   | 2    | Las Fuentes                    | 14-04-2016            | 16.5                       | 7.6  | 127.9                        | 63.2       | 0.112   | 185.5  |  |  |
| 6   | 2    | Las Fuentes Yече               | 14-04-2016            | 18.1                       | 7.47 | 141.2                        | 69.7       | 0.118   | 215.2  |  |  |
| 7   | 2    | Agua Fría                      | 18-04-2016            | No se pudo abrir la caseta |      |                              |            |         |        |  |  |
| 8   | 2    | San Pedrito                    | 16-04-2016            | 12.6                       | 7.91 | 237.4                        | 116.8      | 0.16    | 151.5  |  |  |
| 9   | 2    | La Joya del Sol                | 12-07-2016            | 17                         | 7.04 | 160.9                        | 79.6       | 0.139   | 242.1  |  |  |
| 10  | 2    | Puente Caporal                 | 01-08-2016            | 20.5 caja                  | 7.06 | 124.4                        | 61.6       | 0.118   | 394.7  |  |  |
| 11  | 3    | Real de Arriba (El Fresno)     | 26-04-2016            | 18.7                       | 6.37 | 215.3                        | 106        | 0.153   | 358.5  |  |  |
| 12  | 3    | Real de Arriba (La Peña)       | 26-04-2016            | 18.2                       | 6.39 | 210                          | 112.2      | 0.157   | 388.7  |  |  |
| 13  | 3    | Atlihuayan                     | 12-07-2016            | 18                         | 6.94 | 316                          | 156.4      | 0.22    | 448.3  |  |  |
| 14  | 3    | Los Pozos del Aguacate         | 01-08-2016            | 23 caja                    | 6.87 | 751                          | 371.8      | 0.433   | 198.5  |  |  |
| 15  | 4    | El Sabino                      | 07-04-2016            | 18.4                       | 7.12 | 244.3                        | 120.2      | 0.166   | 145.9  |  |  |
| 16  | 4    | Ojo de Agua                    | 08-04-2016            | 19.6                       | 6.8  | 176.2                        | 86.8       | 0.135   | 119.8  |  |  |
| 17  | 5    | La Rastra                      | 15-04-2016            | 19.4                       | 7.93 | 138                          | 68.1       | 0.118   | 218.1  |  |  |
| 18  | 5    | El Durazno (Valle)             | 19-04-2016            | 21.6                       | 7.54 | 174.9                        | 86.2       | 0.135   | 217.9  |  |  |
| 19  | 5    | Los Fresnos                    | 18-04-2016            | 16.9                       | 7.5  | 137.9                        | 68.1       | 0.116   | 264.9  |  |  |
| 20  | 5    | San Miguel II                  | 07-04-2016            | 19.9                       | 6.76 | 205.1                        | 101        | 0.149   | 156.7  |  |  |
| 21  | 5    | San Miguel I                   | 07-04-2016            | 18.1                       | 6.93 | 206.4                        | 102.2      | 0.151   | 160.3  |  |  |
| 22  | 5    | Los Terrones III (Chichicasco) | 01-08-2016            | 23 caja                    | 6.95 | 534                          | 264.3      | 0.322   | 92.4   |  |  |
| 23  | 6    | El Durazno                     | 18-04-2016            | 25.5 tubería               | 6.76 | 96.1                         | 47.6       | 0.1     | 39.8   |  |  |
| 24  | 6    | El Capulín                     | 08-04-2016            | 15.7                       | 7.34 | 133.9                        | 66.1       | 0.114   | 127.2  |  |  |
| 25  | 6    | Ojo de Agua y Nedeni           | 20-04-2016            | 17                         | 8.25 | 142.9                        | 70.5       | 0.119   | 254.4  |  |  |
| 26  | 6    | Ojo de la Virgen               | 05-04-2016            | 11.7                       | 7.5  | 114.3                        | 56.5       | 0.103   | 106.1  |  |  |
| 27  | 6    | La Ciénega                     | 05-04-2016            | 12.4                       | 6.87 | 94.8                         | 46.9       | 0.095   | 102.9  |  |  |

Tem. °C = Temperatura del agua en grados centígrados

pH = potencial de Hidrógeno

C.E.  $\mu\text{S}/\text{cm}$  = Conductividad Eléctrica en microsiemens/cm

S.T.D. ppm = Sólidos Totales Disueltos en partes por millón

Sal. psu = Salinidad en unidades prácticas de salinidad

O.R.P. mV = Potencial Redox en milivoltios



### *a) Temperatura*

La temperatura del agua en los manantiales en estudio oscilaron entre los 11.7 °C y 25.5°C. En general hay una temperatura promedio de 18°C. Estas aguas se pueden considerar como aguas no termales con una importancia directa para el consumo humano, ya que éstas son aguas provenientes de sistemas de flujo someros con temperaturas parecidas a la temperatura ambiente.

Las temperaturas del manantial el Pozo, Los Pozos del Aguacate, Los Terrones III (Chichiasco) en el municipio de Malinalco y El Durazno en el municipio de Villa Guerrero, presentaron las temperaturas más altas debido a que las mediciones se hicieron en zonas tapadas por concreto o en agua procedente de las tuberías. Estos manantiales también se verán afectados por el resto de los parámetros fisicoquímicos.

En contraste, las temperaturas más bajas de corresponden a los manantiales Ojo de la Virgen y La Ciénega en el municipio de Calimaya, ubicados en las faldas del Volcán Nevado de Toluca, lo cual puede explicar su baja temperatura.

### *b) pH*

El pH del agua indica la acidez o alcalinidad del líquido. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 1994) ha establecido el rango de pH 6.5 a 8.5 para el agua potable. Este rango permite controlar sus efectos en el comportamiento de otros constituyentes del agua.

El pH de los manantiales oscila en un valor de 6.37 a 8.25 (manantial El Durazno del municipio de Villa Guerrero y manantial Ojo de Agua de Jiquipilco respectivamente). 12 manantiales tienen un pH menor a 7.0 y son considerados como aguas ligeramente ácidas, mientras que los 14 restantes tienen un pH mayor a 7.0 y son considerados como ligeramente alcalinos, lo cual indica que se encuentran dentro de los rangos permisibles de la Norma Oficial Mexicana de calidad del agua.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> Un pH menor de 7.0 indica acidez en el agua, cuanto menor sea el valor del pH mayor es la concentración de iones hidrogeno y mayor es la acidez. Por encima de un pH de 7.0 se tienen condiciones básicas en el agua; la

### *c) Conductividad eléctrica*

La conductividad eléctrica es la capacidad del agua para transmitir corriente eléctrica, y en general depende de la temperatura. La conductividad eléctrica del agua de los manantiales tuvo un promedio de 163  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo cual en relación a la cantidad de STD es indicador de agua de buena calidad fisicoquímica; sin embargo, la conductividad eléctrica entre 94.8 y 848  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (manantial La Ciénega en Calimaya y El Pozo en Malinalco).

Los casos con elevados valores de conductividad pueden estar relacionados con el hecho de que los manantiales tienen cajas de captación enterradas, y no aportan grandes cantidades de agua, por lo que agua que tiene un flujo constante como pasa con el resto de los manantiales.

Cuanto mayor sea la conductividad del agua, mayor será la cantidad de sólidos o sales disueltas en ella, ya que la conductividad eléctrica del agua es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos.

### *d) Sólidos Totales Disueltos (STD)*

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible de STD establecido para el agua destinada al consumo humano es de 1000 mg/l (equivalentes a 1000 ppm) (Secretaría de Salud, 1994); sin embargo, para la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1993) es de 500 mg/l.

En los manantiales en estudio la concentración de STD no sobrepasa los límites establecidos, que de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana y a la de la OMS, indica que se trata de aguas de buena calidad. Los STD de los manantiales oscilaron entre 46.9 y 419.8 ppm. El manantial de menos STD fue el manantial La Ciénega en el municipio de Calimaya; mientras que el de mayor concentración fue el Pozo. Otros de los manantiales con altas concentraciones fueron Los Pozos del Aguacate, Los Terrones III (Chichicasco) y El Sabino en el municipio de Malinalco

En este último caso (El Sabino) la alta concentración de STD con respecto al resto de los manantiales se puede deber a que el manantial se encuentra ubicado en la zona urbana, aguas

---

concentración de iones hidrogeno es baja y se dice que el agua es alcalina. Cuando el pH es de 7.0 se dice que el pH es neutro y el agua no tiene características ácidas ni alcalinas (Rocha, 2011).

abajo, y con basura, lo que puede ser un posible foco de contaminación que altere la calidad del manantial.

*e) Salinidad*

El grado de salinidad de los manantiales oscila entre 0.095 y 0.487 psu (correspondientes a los manantiales de La Ciénega y El Pozo). De igual manera los manantiales con los valores más altos corresponden a Los Pozos del Aguacate, y Los Terrones III (Chichiasco) por lo cual sus valores están relacionados con el resto de los parámetros.

*f) Potencial de oxidación-reducción (ORP-redox)*

Un potencial redox comprendido entre +200 y +400 mV denota agua en condiciones aceptables. Con valores inferiores a +200 mV la concentración de gérmenes puede ser elevada y no conveniente.

Los valores de los 27 manantiales muestreados tienen un ORP con valores positivos que van desde los 39.8 a 480.2 mV, lo que quiere decir que en todos ellos se produce una oxidación, 9 de los cuales se consideran con agua en condiciones aceptables, los restantes se consideran fuera de estos rangos.

En síntesis, los manantiales presentan características fisicoquímicas similares; los valores muestran que se trata de aguas de reciente infiltración que proviene de acuíferos someros, ya que la temperatura del agua es muy semejante a la temperatura ambiente de las zonas donde se localizan los manantiales. Además, los parámetros indican que el agua no ha tenido mucho tiempo de residencia en el estrato rocoso, pues los valores conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y salinidad son bajos.

En general, los valores de los parámetros están dentro de los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 para calidad del agua destinada al consumo humano.

#### **4.2.4. Clasificación de manantiales**

Una vez obtenidas las características de los manantiales, se pudieron clasificar como manantiales de gravedad (descendentes o de ladera), pues surgen en condiciones no confinadas a través de pequeñas fracturas y de material poroso.

Desde el punto de vista del tipo de descarga se trata de dos tipos de manantiales, por un lado, de manantiales de medios fracturados debido a la descarga concentrada de agua a través de fisuras, fallas y otras rupturas de la roca consolidada. En los casos del medio poroso volcánico la descarga fue regularmente difusa.

Por la constancia de su caudal los manantiales son permanentes, con caudal poco variable ya que no responden más que moderadamente a las lluvias locales estacionales, pues se suministra de agua a la población durante todo el año.

Desde el punto de vista de la calidad del agua y la temperatura, se trata de manantiales no termales donde el agua es apta para consumo humano con un proceso de potabilización básico.

#### **4.3. Selección de manantiales a nivel local y análisis multicriterio (MCE)**

Para poder obtener los manantiales prioritarios a proteger con la implementación del análisis multicriterio se llevaron a cabo cinco pasos.

##### **4.3.1. Definir el objetivo**

El objetivo fue identificar los manantiales con mayor prioridad de protección por cada región.

##### **4.3.2. Identificación de Criterios**

Para la selección a nivel local se consideraron los criterios que influyen en la priorización de los manantiales a proteger por región. Como ya se ha mencionado, los criterios pueden ser factores y restricciones. Los factores antes de ser reescalados se consideran como variables.

A las variables de carácter cualitativo se les asignó una categoría, pues toda la información con que se trabaja es numérica y continua, los factores son criterios con valores continuos.

Posteriormente se transformaron todas las variables utilizadas a una escala en común: a tipo real en una escala de 0 a 1, para poder hablarse de factores.

Las variables consideradas fueron:

1. Estado de conservación de la infraestructura del manantial
2. Uso del suelo
3. Otras fuentes de abastecimiento
4. Población abastecida
5. Índice de marginación
6. Caudal asignado de agua (l/s)

### **1. Estado de conservación de la infraestructura del manantial**

Es una variable cualitativa en el que el estado de conservación va desde deficiente, aceptable, bueno y muy bueno. A cada una de estas categorías se le asignó un número para poder ser reescaladas y posteriormente ser comparadas con el resto de los factores.

La conservación de la infraestructura tiene una relación con el grado de protección al manantial y del agua que se encuentra en la caja de captación. Esta protección es in situ e inmediata (temporalmente hablando) ya que sirve como protección a partir de la salida del líquido. Además, sirve para aislar la entrada de contaminantes, como por ejemplo cartones, botellas de vidrio, bolsas de plástico, latas, envases vacíos de aceites o, para el caso de las áreas agrícolas (incluidos los invernaderos) envases vacíos de fertilizantes; también para no permitir la entrada de animales y otros objetos que puedan contaminar u obstruir la conducción del agua.

En este trabajo se refiere a protección in situ e inmediata porque, en caso de que la caja de captación presente basura se pueden hacer campañas de limpieza en el sitio en un corto plazo (días) para contar nuevamente con agua en buen estado. Por otro lado, en caso de no contar con la infraestructura necesaria, por ejemplo, si hay una caja de captación deteriorada o existe la falta de un límite perimetral ya sea una barda, reja o malla, también en un corto periodo de tiempo (semanas o meses) se puede gestionar la construcción o mejora de las obras requeridas.

Por eso, en términos de contaminación a la fuente, el impacto puede ser menor y contrarrestado a corto plazo y en el mismo lugar, en donde los usuarios no se verán afectados a largo plazo.

Es la Tabla 4.9 tabla se puede observar que la infraestructura de la mayoría de los manantiales se encuentra en un estado de conservación bueno y muy bueno. Los manantiales en un estado muy bueno son aquellos que cuentan con caja de captación bien cerrada (incluso con candado) y/o están bardeados o cercados para restringir el acceso a personas no autorizadas.

El bardeado impide que las cajas de captación puedan ser manipuladas, alteradas o contaminadas por terceros, al igual sirve de protección a las bombas si es que las hay. Este cercado puede ser de diferentes dimensiones, pero cumple la función de protección directa hacia la fuente de agua.

Tabla 4.9 Estado de conservación de la infraestructura de los manantiales

| No. | Reg. | Manantial                      | Conservación | Categoría |
|-----|------|--------------------------------|--------------|-----------|
| 1   | 1    | Chichotla                      | Bueno        | 2         |
| 2   |      | Los Álamos I                   | Bueno        | 2         |
| 3   |      | Las Huertas                    | Bueno        | 2         |
| 4   | 2    | Las Fuentes                    | Muy bueno    | 1         |
| 5   |      | Las Fuentes Yeche              | Bueno        | 2         |
| 6   |      | Agua Fría                      | Muy bueno    | 1         |
| 7   |      | San Pedrito                    | Muy bueno    | 1         |
| 8   | 3    | Real de Arriba (El Fresno)     | Muy bueno    | 1         |
| 9   |      | Real de Arriba (La Peña)       | Aceptable    | 3         |
| 10  |      | Atlihuayan                     | Bueno        | 2         |
| 11  | 4    | El Sabino                      | Deficiente   | 4         |
| 12  |      | Ojo de Agua                    | Bueno        | 2         |
| 13  | 5    | La Rastra                      | Aceptable    | 3         |
| 14  |      | El Durazno (Valle)             | Aceptable    | 3         |
| 15  |      | Los Fresnos                    | Aceptable    | 3         |
| 16  |      | San Miguel II                  | Aceptable    | 3         |
| 17  |      | San Miguel I                   | Muy bueno    | 1         |
| 18  |      | Los Terrones III (Chichicasco) | Aceptable    | 3         |
| 19  | 6    | El Durazno                     | Aceptable    | 3         |
| 20  |      | El Capulín                     | Bueno        | 2         |
| 21  |      | Ojo de Agua y Nedeni           | Muy bueno    | 1         |
| 22  |      | Ojo de la Virgen               | Muy bueno    | 1         |
| 23  |      | La Ciénega                     | Muy bueno    | 1         |

En algunos casos, como del manantial Ojo de la Virgen, La Ciénega y San Miguel I no hay bardeado sino cercado con malla, pero, al estar ubicados en zonas retiradas de la población, pueden ser lo suficientemente útiles como para impedir el paso de personas y resguardar la zona de la fuente.

En contraste, la infraestructura del manantial El Sabino es deficiente; no cuenta con caja de captación, está a cielo abierto y tiene como perímetro de protección un pequeño cercado que es insuficiente debido que está ubicado exactamente en la zona urbana.

## 2. Uso del suelo

Es una variable cualitativa con categorías de uso de suelo: agrícola, urbano y bosque. En el área de estudio la mayoría de los manantiales se encuentran en zonas boscosas, otros en zonas de cultivo y otros más en zonas urbanas (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Uso de suelo donde se localizan los manantiales

| No. | Reg. | Manantial                     | Uso de suelo | Categoría |
|-----|------|-------------------------------|--------------|-----------|
| 1   | 1    | Chichotla                     | Bosque       | 1         |
| 2   |      | Los Álamos I                  | Bosque       | 1         |
| 3   |      | Las Huertas                   | Bosque       | 1         |
| 4   | 2    | Las Fuentes                   | Urbano       | 2         |
| 5   |      | Las Fuentes Yeche             | Agrícola     | 3         |
| 6   |      | Agua Fría                     | Bosque       | 1         |
| 7   |      | San Pedrito                   | Urbano       | 2         |
| 8   | 3    | Real de Arriba (El Fresno)    | Bosque       | 1         |
| 9   |      | Real de Arriba (La Peña)      | Bosque       | 1         |
| 10  |      | Atlihuayan                    | Bosque       | 1         |
| 11  | 4    | El Sabino                     | Urbano       | 2         |
| 12  |      | Ojo de Agua                   | Urbano       | 2         |
| 13  | 5    | La Rastra                     | Bosque       | 1         |
| 14  |      | El Durazno (Valle)            | Bosque       | 1         |
| 15  |      | Los Fresnos                   | Agrícola     | 3         |
| 16  |      | San Miguel II                 | Bosque       | 1         |
| 17  |      | San Miguel I                  | Bosque       | 1         |
| 18  |      | Los Terrones III (Chichiasco) | Bosque       | 1         |
| 19  | 6    | El Durazno                    | Agrícola     | 3         |
| 20  |      | El Capulín                    | Agrícola     | 3         |
| 21  |      | Ojo de Agua y Nedeni          | Bosque       | 1         |
| 22  |      | Ojo de la Virgen              | Bosque       | 1         |
| 23  |      | La Ciénega                    | Agrícola     | 3         |

El uso agrícola a mediano o largo plazo podrá tener mayor impacto de contaminación, por la cantidad de productos tóxicos, como el uso de fertilizantes. Se trata de contaminación de tipo difusa que puede tardar desde días hasta meses para llegar a los niveles freáticos, dependiendo del tipo de contaminante, de su grado de degradación y la capacidad de autodepuración del suelo, así como también pueden transitar (en la dirección del flujo del agua) desde la zona de contaminación hasta alcanzar varios kilómetros en donde se tenga una fuente de agua. En este caso, la renovación natural de la calidad del agua subterránea será a mediano o largo plazo y la población abastecida se verá afectada.

Por otro lado, en las zonas urbanas la contaminación no está exenta de afectar. Se trata de contaminación de tipo puntual, generada por fosas sépticas y fugas de drenaje, en donde el suelo podrá permitir o no la contaminación hacia el acuífero.

Por su parte, los bosques no se consideran como fuentes potenciales de contaminación, pues contribuyen a ser zonas de recarga que favorecen la alimentación de los acuíferos.

El uso de suelo es uno de los factores a considerar para dar prioridad de protección de los manantiales ya que como fuente de contaminación se podrá definir el grado de prioridad para proteger y el método de protección.

### **3. Existencia de fuentes alternas de abastecimiento**

Se consideró si la población que se está abasteciendo de agua del manantial cuenta o no con otras fuentes de abastecimiento. Se emplearon las categorías: si o no (Tabla 4.11).

Si el manantial es la única fuente de abastecimiento se da mayor prioridad para su protección, pues al ser el único suministro de agua para la población se tiene que asegurar tanto la cantidad como la calidad del agua.

Más de la mitad de los manantiales (16) cuentan con fuentes alternas de abastecimiento, mientras la minoría (5) son únicas fuentes de abastecimiento, lo cual tiene influencia a la hora de priorizar los manantiales a proteger.



Tabla 4.11. Existencia de otras fuentes de abastecimiento a los manantiales

| No. | Reg. | Manantial                      | Fuente | Categoría |
|-----|------|--------------------------------|--------|-----------|
| 1   | 1    | Chichotla                      | Si     | 1         |
| 2   |      | Los Álamos I                   | Si     | 1         |
| 3   |      | Las Huertas                    | Si     | 1         |
| 4   | 2    | Las Fuentes                    | Si     | 1         |
| 5   |      | Las Fuentes Yeche              | Si     | 1         |
| 6   |      | Agua Fría                      | Si     | 1         |
| 7   |      | San Pedrito                    | Si     | 1         |
| 8   | 3    | Real de Arriba (El Fresno)     | Si     | 1         |
| 9   |      | Real de Arriba (La Peña)       | Si     | 1         |
| 10  |      | Atlihuayan                     | No     | 2         |
| 11  | 4    | El Sabino                      | Si     | 1         |
| 12  |      | Ojo de Agua                    | No     | 2         |
| 13  | 5    | La Rastra                      | No     | 2         |
| 14  |      | El Durazno (Valle)             | No     | 2         |
| 15  |      | Los Fresnos                    | Si     | 1         |
| 16  |      | San Miguel II                  | Si     | 1         |
| 17  |      | San Miguel I                   | Si     | 1         |
| 18  |      | Los Terrones III (Chichicasco) | No     | 2         |
| 19  | 6    | El Durazno                     | No     | 2         |
| 20  |      | El Capulín                     | Si     | 2         |
| 21  |      | Ojo de Agua y Nedeni           | Si     | 1         |
| 22  |      | Ojo de la Virgen               | Si     | 1         |
| 23  |      | La Ciénega                     | Si     | 1         |

#### 4. Población abastecida

La población abastecida es el número de habitantes a los cuales se les suministra de agua potable. Esta variable es cuantitativa, a mayor cantidad de población tendrá mayor necesidad de protegerse la fuente, pues está correlacionada con la demanda de agua.

El número de habitantes que abastece cada manantial es variable. Por ejemplo, hay poblaciones que van desde 1500 habitantes aproximadamente, como en el caso del manantial El Durazno (en el poblado de San Miguel, Villa Guerrero), hasta más de 100000 como el caso del manantial Chichotla (ubicado en el Pedregal del Tequesquipan, Temascaltepec), el cual que abastece a poblaciones de los municipios de Tejupilco, Luvianos y Temascaltepec (Tabla 4.12).

Tabla 4.12 Población abastecida por el caudal de los manantiales

| No. | Reg. | Manantial                      | Habitantes |
|-----|------|--------------------------------|------------|
| 1   | 1    | Chichotla                      | 108495     |
| 2   |      | Los Álamos I                   | 28000      |
| 3   |      | Las Huertas                    | 9341       |
| 4   | 2    | Las Fuentes                    | 7575       |
| 5   |      | Las Fuentes Yeche              | 2111       |
| 6   |      | Agua Fría                      | 4000       |
| 7   |      | San Pedrito                    | 2583       |
| 8   | 3    | Real de Arriba (El Fresno)     | 2533       |
| 9   |      | Real de Arriba (La Peña)       | 900        |
| 10  |      | Atlihuayan                     | 882        |
| 11  | 4    | El Sabino                      | 2993       |
| 12  |      | Ojo de Agua                    | 19541      |
| 13  | 5    | La Rastra                      | 2230       |
| 14  |      | El Durazno (Valle)             | 8562       |
| 15  |      | Los Fresnos                    | 5444       |
| 16  |      | San Miguel II                  | 3988       |
| 17  |      | San Miguel I                   | 3323       |
| 18  |      | Los Terrones III (Chichicasco) | 324        |
| 19  | 6    | El Durazno                     | 1571       |
| 20  |      | El Capulín                     | 16442      |
| 21  |      | Ojo de Agua y Nedeni           | 5682       |
| 22  |      | Ojo de la Virgen               | 11165      |
| 23  |      | La Ciénega                     | 8000       |

## 5. Índice de marginación

El índice de marginación es una medida de las condiciones socioeconómicas que permiten medir formas de exclusión social.

Si se asume que a mejor condición socioeconómica de la población menor vulnerabilidad ante una amenaza y mayor capacidad de respuesta, entonces el índice de marginación puede convertirse en un buen indicador de vulnerabilidad socioeconómica de la población, en este caso ante la gestión, cultura y protección de los recursos hídricos.

Los valores numéricos de los índices de marginación se califican en grados de marginación. En este sentido, de acuerdo a los índices y los grados de marginación existentes se pudieron identificar al menos para este estudio, niveles de marginación: bajo y muy bajo (Tabla 4.13).

Tabla 4.13 Índices y grados de marginación de las localidades abastecidas por los manantiales.

| No. | Reg. | Manantial                     | Marginación | Índice   |
|-----|------|-------------------------------|-------------|----------|
| 1   | 1    | Chichotla                     | Baja        | -1.03613 |
| 2   |      | Los Álamos I                  | Baja        | -1.13306 |
| 3   |      | Las Huertas                   | Muy baja    | -1.23178 |
| 4   | 2    | Las Fuentes                   | Muy baja    | -1.31096 |
| 5   |      | Las Fuentes Yeche             | Baja        | -0.68345 |
| 6   |      | Agua Fría                     | Baja        | -1.13306 |
| 7   |      | San Pedrito                   | Muy baja    | -1.20474 |
| 8   | 3    | Real de Arriba (El Fresno)    | Muy baja    | -1.32601 |
| 9   |      | Real de Arriba (La Peña)      | Muy baja    | -1.32601 |
| 10  |      | Atlihuayan                    | Baja        | -0.43674 |
| 11  | 4    | El Sabino                     | Baja        | -0.95993 |
| 12  |      | Ojo de Agua                   | Baja        | -0.91591 |
| 13  | 5    | La Rastra                     | Baja        | -1.07433 |
| 14  |      | El Durazno (Valle)            | Muy baja    | -1.33435 |
| 15  |      | Los Fresnos                   | Muy baja    | -1.16546 |
| 16  |      | San Miguel II                 | Baja        | -0.91592 |
| 17  |      | San Miguel I                  | Baja        | -0.91592 |
| 18  |      | Los Terrones III (Chichiasco) | Baja        | -0.55650 |
| 19  | 6    | El Durazno                    | Baja        | -0.83705 |
| 20  |      | El Capulín                    | Baja        | -0.77758 |
| 21  |      | Ojo de Agua y Nedeni          | Baja        | -0.47596 |
| 22  |      | Ojo de la Virgen              | Baja        | -1.12132 |
| 23  |      | La Ciénega                    | Baja        | -1.12133 |

En el análisis para la protección de la fuente de agua se tomaron en cuenta aquellos manantiales localizados en zonas de marginación baja debido a que, al menos de acuerdo con condición socioeconómica es menor en relación a las zonas de marginación muy baja.

## 6. Caudal asignado de agua

Los manantiales considerados en esta investigación fueron los publicados en el REPDA. El caudal de los manantiales depende en gran medida del volumen de las precipitaciones. Los manantiales estudiados son manantiales perennes, ya que su caudal (l/s) se mantiene constante todo el año con pequeñas variaciones. El caudal asignado va desde 1 y 3 l/s aproximadamente como es el caso del manantial Atlihuayan en Malinalco y San Pedrito localizado en el Cerro del Calvario en Tenango del Valle, hasta más de 300 l/s del manantial Chichotla localizado en el Pedregal del Tequesquipanen en Temascaltepec (Tabla 4.14).

Tabla 4.14 Caudal asignado para el abastecimiento público (REPDA, 2015)

| No. | Reg. | Manantial                     | Caudal asignado (l/s) |
|-----|------|-------------------------------|-----------------------|
| 1   | 1    | Chichotla                     | 360.0                 |
| 2   |      | Los Álamos I                  | 65.0                  |
| 3   |      | Las Huertas                   | 20.0                  |
| 4   | 2    | Las Fuentes                   | 28.0                  |
| 5   |      | Las Fuentes Yече              | 9.0                   |
| 6   |      | Agua Fría                     | 8.0                   |
| 7   |      | San Pedrito                   | 2.7                   |
| 8   | 3    | Real de Arriba (El Fresno)    | 45.7                  |
| 9   |      | Real de Arriba (La Peña)      | 2.0                   |
| 10  |      | Atlihuayan                    | 1.0                   |
| 11  | 4    | El Sabino                     | 30.0                  |
| 12  |      | Ojo de Agua                   | 10.0                  |
| 13  | 5    | La Rastra                     | 11.5                  |
| 14  |      | El Durazno (Valle de Bravo)   | 11.3                  |
| 15  |      | Los Fresnos                   | 9.5                   |
| 16  |      | San Miguel II                 | 6.0                   |
| 17  |      | San Miguel I                  | 5.0                   |
| 18  |      | Los Terrones III (Chichiasco) | 1.0                   |
| 19  | 6    | El Durazno                    | 1.0                   |
| 20  |      | El Capulín                    | 13.3                  |
| 21  |      | Ojo de Agua y Nedeni          | 13.0                  |
| 22  |      | Ojo de la Virgen              | 6.0                   |
| 23  |      | La Ciénega                    | 6.0                   |

En este trabajo se asume que a mayor caudal asignado mayor debe ser la necesidad de protección ya que guarda una relación proporcional con la población abastecida.

Es importante mencionar que el caudal asignado difiere del caudal natural del manantial. Esta situación se contempló a la hora de realizar las zonas de protección de los manantiales.

#### 4.3.3. Reescalamiento de factores

Los factores tienen diferentes escalas, por lo cual, fueron reescalados a una escala común (escala real de 0 a 1). Este reescalamiento tiene como objetivo facilitar las comparaciones entre los diversos factores. Para este procedimiento fue necesario convertir la información puntual en formato vector a raster,

Para reescalar las variables con el módulo FUZZY (difuso) y llegar a las imágenes de los factores, se requirió conocer los valores mínimo y máximo de la escala original (imágenes de las variables ingresadas). Posteriormente, para atribuir los valores límite ajuste para la nueva escala de 0-1, fue necesario definir la función de pertinencia para cada factor, basada en la teoría de grupos difusos o lógica difusa, y de este modo asignar los valores a los puntos de control de la función seleccionada.

Se utilizó la función sigmoïdal, monótonicamente creciente, en donde los valores mínimos corresponden a los de menor importancia y los valores máximos a los de mayor importancia, asignados a los puntos de control “a” y “b” respectivamente.

Como se trabajó tanto con variables cuantitativas como cualitativas, la asignación de valores a los puntos de control fue diferente. Para reescalar las variables cuantitativas: caudal, población y marginación se consideró el valor mínimo de cada variable asignándolo al punto de control “a” y el valor máximo (el que se consideró pertinente) al punto “b” para de esta manera ser reescalados en un rango de 0-1.

Para el caso de las variables cualitativas: uso de suelo, conservación y fuentes de abastecimiento, se tomó en cuenta en el punto de control “a” el valor de 0 y no el 1 (que corresponde al valor mínimo de cada variable), ya que 0 significaría sin importancia y en este caso las categorías utilizadas son de menor importancia, más no sin ella.

En algunos casos (caudal y población) los valores mínimos y máximos de las variables son muy distantes por lo que se ajustaron para el manejo de la información.

1. Caudal asignado (l/s): El caudal concesionado para cada manantial es variable, el caudal de mayor volumen (322.91 l/s) tiene mayor importancia respecto a los caudales menores (hasta 1.0 l/s). Estos valores son muy extremos y en una escala de 0-1 los caudales menores resultarían imperceptibles, por esta razón se definió que a partir del segundo caudal mayor 66.86 l/s (por estar más cercano al resto) se considera como de mayor importancia (Figura 4.11), por consiguiente:  $a = 1$ ,  $b = 66.86$
2. Población abastecida: El número de habitantes a los que abastece cada manantial también es variada; a mayor cantidad de habitantes mayor es la importancia respecto al

objetivo. La población va desde 108495 a 324 habitantes y de igual manera se consideró que a partir de la segunda mayor población que es de 28000 habitantes (cerca a las poblaciones restantes) se atribuiría como de mayor importancia (Figura 4.12). Se asignó entonces que:  $a = 324$ ,  $b = 28000$ .

3. Índice de marginación: Predominan dos rangos categorías en las zonas de estudio: la marginación baja (-1.15143, -0.39539) y muy baja (-1.52944, -1.15143). La marginación baja se considera como la categoría de mayor importancia respecto a la categoría muy baja; por lo tanto, se considera que:  $a = -0.47596$ ,  $b = -1.33435$ .
4. Estado de conservación de la infraestructura del manantial: El estado de conservación tuvo a 4 categorías: muy bueno (1), bueno (2), aceptable (3), y deficiente (4). El estado deficiente (4) es considerado de mayor importancia respecto a los valores menores (3, 2 y 1 respectivamente) que son de menor importancia de acuerdo al objetivo, y en consecuencia:  $a = 0$ ,  $b = 4$ .
5. Uso del suelo: En esta variable hay tres categorías como fuentes contaminantes: bosque (1), urbano (2) y agrícola (3). La que tiene mayor impacto y es de mayor importancia es el uso agrícola (3), seguido del uso urbano (2), y subsecuentemente la del suelo boscoso (1), por ello se consideró que:  $a = 0$ ,  $b = 3$ .
6. Existencia de otras fuentes de abastecimiento: Existen dos categorías: aquellos manantiales que cuentan con otras fuentes alternas de abastecimiento (1) y los manantiales que son únicas fuentes que abastecen para la población (2). La categoría 1 se considera de menor importancia, y la categoría 2 a la de mayor importancia, por lo tanto:  $a = 0$ ,  $b = 2$ .

En la Tabla 4.15 se pueden observar los resultados del reescalamiento de cada uno de los factores: los valores en 0 son de menor importancia, los valores en 1 son más importantes.

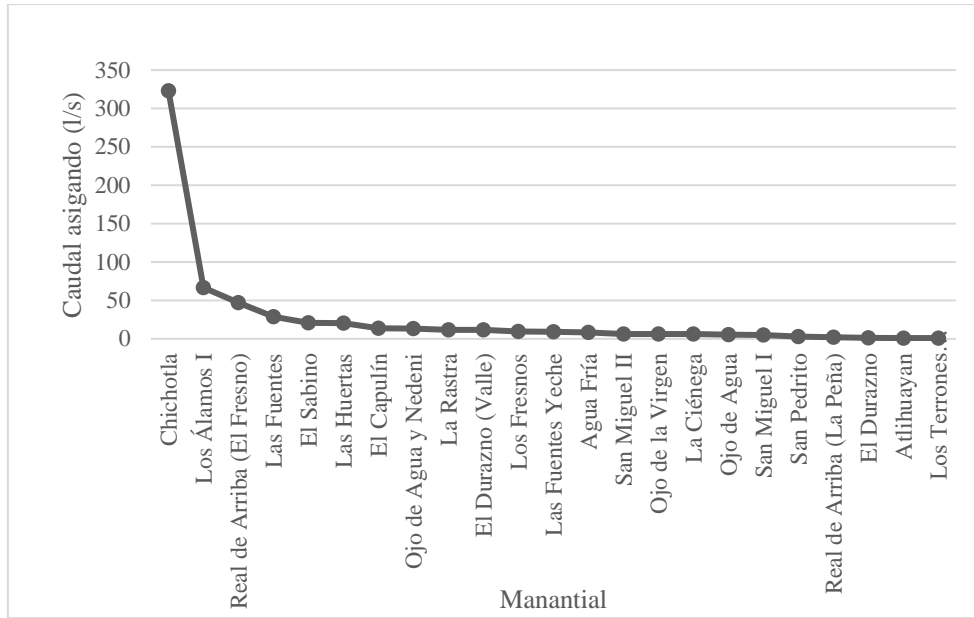


Figura 4.11. Caudal asignado de agua (l/s)

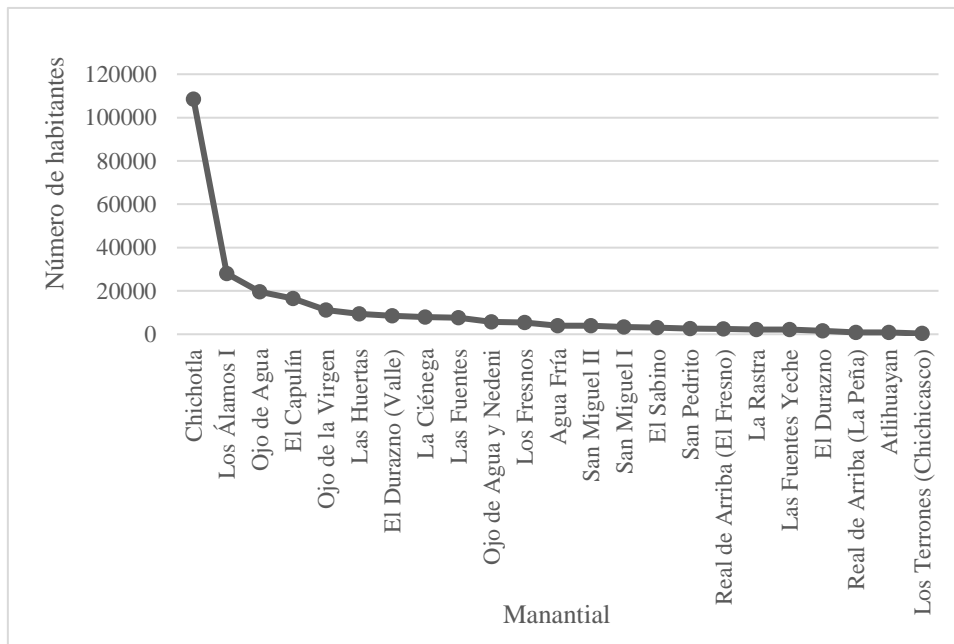


Figura 4.12. Población abastecida

Tabla 4.15. Valores de los factores reescalados (en escala real de 0-1)

| No. | Reg. | Manantial                     | Caudal asignado |       | Uso del suelo |      | Población |       | Conser |      | Fuente |     | Marginación |         |
|-----|------|-------------------------------|-----------------|-------|---------------|------|-----------|-------|--------|------|--------|-----|-------------|---------|
|     |      |                               | C               | F     | C             | F    | C         | F     | C      | F    | C      | F   | C           | F       |
| 1   | 1    | Chichotla                     | 322.90          | 1     | 1             | 0.25 | 108495    | 1     | 2      | 0.50 | 1      | 0.5 | 1.03613     | 0.24851 |
| 2   | 1    | Los Álamos I                  | 66.86           | 1     | 1             | 0.25 | 28000     | 1     | 2      | 0.50 | 1      | 0.5 | 1.13306     | 0.11903 |
| 3   | 1    | Las Huertas                   | 20.57           | 0.203 | 1             | 0.25 | 9341      | 0.240 | 2      | 0.50 | 1      | 0.5 | 1.23178     | 0.03187 |
| 4   | 2    | Las Fuentes                   | 28.80           | 0.379 | 2             | 0.75 | 7575      | 0.160 | 1      | 0.15 | 1      | 0.5 | 1.31096     | 0.00167 |
| 5   | 2    | Las Fuentes Yече              | 9.26            | 0.038 | 3             | 1    | 2111      | 0.010 | 2      | 0.50 | 1      | 0.5 | 0.68345     | 0.82490 |
| 6   | 2    | Agua Fría                     | 8.23            | 0.029 | 1             | 0.25 | 4000      | 0.043 | 1      | 0.15 | 1      | 0.5 | 1.13306     | 0.11903 |
| 7   | 2    | San Pedrito                   | 2.83            | 0.002 | 2             | 0.75 | 2583      | 0.016 | 1      | 0.15 | 1      | 0.5 | 1.20474     | 0.05057 |
| 8   | 3    | Real de Arriba (El Fresno)    | 47.03           | 0.792 | 1             | 0.25 | 2533      | 0.016 | 1      | 0.15 | 1      | 0.5 | 1.32601     | 0.00021 |
| 9   | 3    | Real de Arriba (La Peña)      | 2.06            | 0.001 | 1             | 0.25 | 900       | 0.001 | 3      | 0.85 | 1      | 0.5 | 1.32601     | 0.00021 |
| 10  | 3    | Atlihuayan                    | 1.00            | 0.000 | 1             | 0.25 | 882       | 0.001 | 2      | 0.50 | 2      | 1   | 0.43674     | 1.00000 |
| 11  | 4    | El Sabino                     | 20.86           | 0.208 | 2             | 0.75 | 2993      | 0.023 | 4      | 1.00 | 1      | 0.5 | 0.95993     | 0.37129 |
| 12  | 4    | Ojo de Agua                   | 5.51            | 0.012 | 2             | 0.75 | 19541     | 0.787 | 2      | 0.50 | 2      | 1   | 0.91591     | 0.44696 |
| 13  | 5    | La Rastra                     | 11.84           | 0.065 | 1             | 0.25 | 2230      | 0.012 | 3      | 0.85 | 2      | 1   | 1.07433     | 0.19315 |
| 14  | 5    | El Durazno (Valle)            | 11.62           | 0.063 | 1             | 0.25 | 8562      | 0.203 | 3      | 0.85 | 2      | 1   | 1.33435     | 0.00000 |
| 15  | 5    | Los Fresnos                   | 9.72            | 0.043 | 3             | 1    | 5444      | 0.082 | 3      | 0.85 | 1      | 0.5 | 1.16546     | 0.08484 |
| 16  | 5    | San Miguel II                 | 6.17            | 0.015 | 1             | 0.25 | 3988      | 0.043 | 3      | 0.85 | 1      | 0.5 | 0.91592     | 0.44695 |
| 17  | 5    | San Miguel I                  | 5.14            | 0.010 | 1             | 0.25 | 3323      | 0.029 | 1      | 0.15 | 1      | 0.5 | 0.91592     | 0.44695 |
| 18  | 5    | Los Terrones III (Chichiasco) | 1.00            | 0     | 1             | 0.25 | 324       | 0     | 3      | 0.85 | 2      | 1   | 0.55650     | 0.95672 |
| 19  | 6    | El Durazno                    | 1.10            | 0.000 | 3             | 1    | 1571      | 0.005 | 2      | 0.50 | 2      | 1   | 0.83705     | 0.58446 |
| 20  | 6    | El Capulín                    | 13.69           | 0.089 | 3             | 1    | 16442     | 0.628 | 2      | 0.50 | 2      | 1   | 0.77758     | 0.68447 |
| 21  | 6    | Ojo de Agua y Nedeni          | 13.39           | 0.085 | 1             | 0.25 | 5682      | 0.090 | 1      | 0.15 | 1      | 0.5 | 0.47596     | 0.99530 |
| 22  | 6    | Ojo de la Virgen              | 6.17            | 0.015 | 1             | 0.25 | 11165     | 0.333 | 1      | 0.15 | 1      | 0.5 | 1.12132     | 0.13266 |
| 23  | 6    | La Ciénega                    | 6.17            | 0.015 | 3             | 1    | 8000      | 0.178 | 1      | 0.15 | 1      | 0.5 | 1.12133     | 0.13265 |

Conser= Estado de conservación de la infraestructura

C= Categoría

F= Valor del factor reescalado de (0-1)

#### 4.3.4. Ponderación de pesos de los factores

La asignación de pesos está en función de la importancia de cada factor o influencia que tiene con el objetivo de la investigación. Se realizó una encuesta a un grupo de expertos del centro de investigación CIRA, quienes realizaron una comparación por pares respecto a la importancia de un factor respecto a otro, donde el Radio de Consistencia para cada uno de ellos fue aceptable,



con un valor menor a 0.1 (Tabla 4.16). El orden de importancia de los factores fue desde el más importante (1) hasta menos importante (6) (Tabla 4.17).

Para realizar la comparación entre las ponderaciones de pesos del grupo de expertos se eliminaron los pesos extremos, se obtuvo el promedio y de esta manera se determinó el peso de cada factor. El factor que mayor peso tuvo fue el caudal asignado (seguido del uso del suelo) resaltando así la importancia del mismo como prioridad en los manantiales a proteger (Tabla 4.18).

Tabla 4.16. Pesos de los factores realizando una comparación por pares según grupo de expertos.

| No. | Factor/Experto                             | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|-----|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | Uso del suelo                              | 0.3872 | 0.4615 | 0.0287 | 0.0252 | 0.4723 | 0.3142 | 0.0606 | 0.2393 |
| 2   | Caudal asignado                            | 0.2559 | 0.1095 | 0.4675 | 0.2467 | 0.2533 | 0.0664 | 0.4672 | 0.0514 |
| 3   | Existencia de otras fuentes abastecimiento | 0.1467 | 0.0515 | 0.057  | 0.1323 | 0.0584 | 0.1287 | 0.0389 | 0.0857 |
| 4   | Población abastecida                       | 0.0564 | 0.1095 | 0.2505 | 0.4729 | 0.1285 | 0.1437 | 0.2518 | 0.1363 |
| 5   | Estado de conservación                     | 0.1179 | 0.2402 | 0.054  | 0.0454 | 0.0584 | 0.2993 | 0.1401 | 0.4578 |
| 6   | Índice de marginación                      | 0.0359 | 0.0279 | 0.1424 | 0.0775 | 0.0292 | 0.0478 | 0.0413 | 0.0295 |
|     | <i>Radio de Consistencia</i>               | 0.07   | 0.04   | 0.06   | 0.07   | 0.04   | 0.06   | 0.06   | 0.06   |

Tabla 4.17. Orden de importancia de los factores de acuerdo con la comparación por pares.

| No. | Factor/Experto                             | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1   | Uso del suelo                              | 1 | 1 | 6 | 6 | 1 | 1 | 5 | 2 |
| 2   | Caudal asignado                            | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 5 | 1 | 5 |
| 3   | Existencia de otras fuentes abastecimiento | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 2 | 4 |
| 4   | Población abastecida                       | 5 | 4 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 5   | Estado de conservación                     | 4 | 2 | 5 | 5 | 5 | 2 | 6 | 1 |
| 6   | Índice de marginación                      | 6 | 6 | 3 | 4 | 6 | 6 | 4 | 6 |

Tabla 4.18. Asignación de pesos de los manantiales prioritarios a proteger

| No. | Factor                                     | Peso   |
|-----|--|--------|
| 1   | Caudal asignado                            | 0.3360 |
| 2   | Uso del suelo                              | 0.3165 |
| 3   | Población abastecida                       | 0.1285 |
| 4   | Estado de conservación                     | 0.1224 |
| 5   | Existencia de otras fuentes abastecimiento | 0.0624 |
| 6   | Índice de marginación                      | 0.0339 |

#### 4.3.5. Agregación de factores

En esta etapa de evaluación, el módulo *Spatial Decision Modeler* ofrece cuatro opciones de riesgo (risk) y compensación (tradeoff), dentro de las cuales se eligió la opción de riesgo medio con compensación y se obtuvo como resultado una imagen con los pesos de los manantiales asignando la prioridad de protección.

#### 4.3.6. Priorización de manantiales a proteger

Como ya se mencionó, el proceso de análisis multicriterio (MCE) se ejecutó en el módulo *Spatial Decision Modeler* (SDM) (Figura 4.13). Se ingresaron las variables categóricas, que una vez reescaladas a través del módulo Fuzzy se convirtieron a factores. Estos factores, al igual que la restricción fueron ligados al módulo MCE, asignando un riesgo medio con compensación, lo que dio como resultado una imagen con valores de importancia para cada manantial.

De este modo, se pudieron identificar los pesos de acuerdo a la importancia de protección del manantial. En la Tabla 4.19 están marcados en negritas los manantiales seleccionados con mayor necesidad de protección los cuales fueron seis (Figura 4.14):

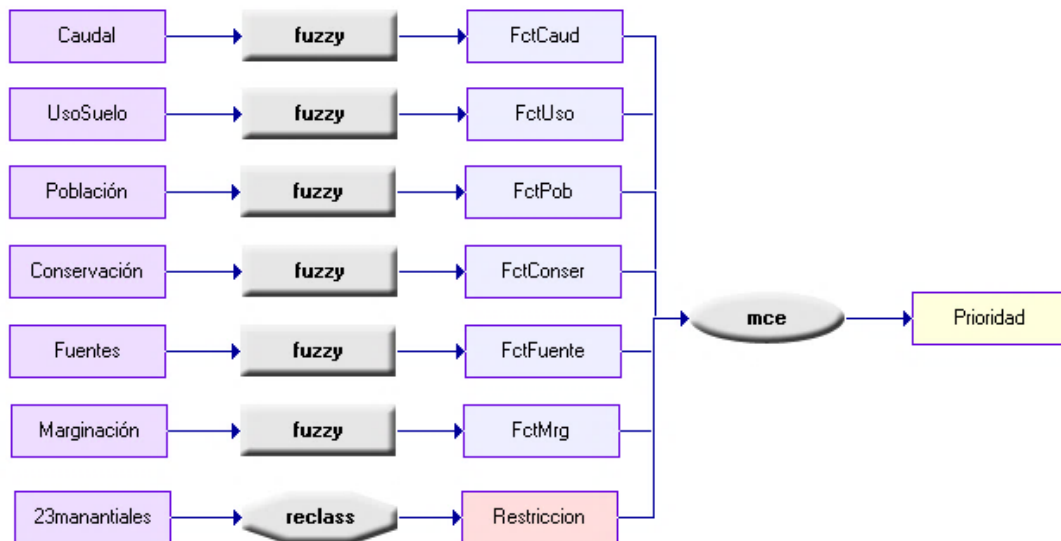


Figura 4.13. Esquema de ejecución del EMC en el módulo *Spatial Decision Modeler*

- Región 1: Chichotla, Temascaltepec
- Región 2: Las Fuentes Yeche, Jocotitlán
- Región 3: Real de Arriba (El fresno), Temascaltepec
- Región 4: Ojo de Agua, Almoloya de Juárez
- Región 5: Los Fresnos, Villa Guerrero
- Región 6: El Capulín, Zinacantepec

Tabla 4.19. Grado de prioridad de protección de los manantiales por regiones.

| No. | Reg. | Manantial                      | Puntaje       |
|-----|------|--------------------------------|---------------|
| 1   | 1    | Chichotla                      | <b>0.6444</b> |
| 2   |      | Los Álamos I                   | 0.6401        |
| 3   |      | Las Huertas                    | 0.2715        |
| 4   | 2    | Las Fuentes                    | 0.4344        |
| 5   |      | Las Fuentes Yeche              | <b>0.4510</b> |
| 6   |      | Agua Fría                      | 0.1477        |
| 7   |      | San Pedrito                    | 0.2910        |
| 8   | 3    | Real de Arriba (El Fresno)     | <b>0.3965</b> |
| 9   |      | Real de Arriba (La Peña)       | 0.2152        |
| 10  |      | Atlihuayan                     | 0.2368        |
| 11  | 4    | El Sabino                      | 0.4764        |
| 12  |      | Ojo de Agua                    | <b>0.4811</b> |
| 13  | 5    | La Rastra                      | 0.2760        |
| 14  |      | El Durazno (Valle)             | 0.2932        |
| 15  |      | Los Fresnos                    | <b>0.4799</b> |
| 16  |      | San Miguel II                  | 0.2407        |
| 17  |      | San Miguel I                   | 0.1504        |
| 18  |      | Los Terrones III (Chichicasco) | 0.2784        |
| 19  | 6    | El Durazno                     | 0.4606        |
| 20  |      | El Capulín                     | <b>0.5739</b> |
| 21  |      | Ojo de Agua y Nedeni           | 0.2020        |
| 22  |      | Ojo de la Virgen               | 0.1806        |
| 23  |      | La Ciénega                     | 0.3981        |

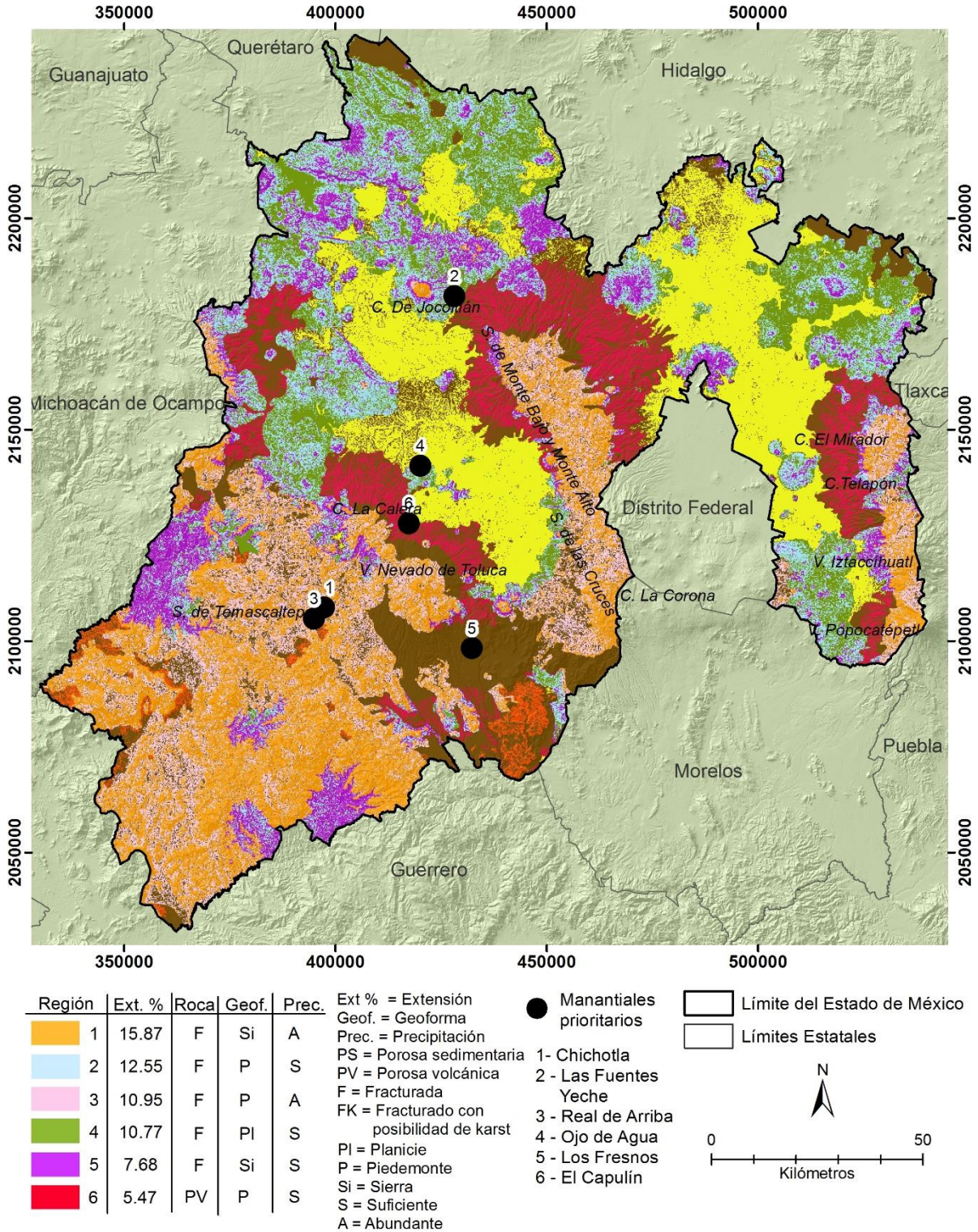


Figura 4.14. Localización de los manantiales con prioridad de protección en el área de estudio.

#### **4.4. Características generales de los manantiales con prioridad de protección**

En este apartado se describen brevemente las características generales de los manantiales prioritarios a proteger, tanto aspectos físicos como sociales.

Los seis manantiales seleccionados se localizan en diferentes municipios de la entidad estatal y pertenecen administrativamente a diferentes unidades (asignadas por CONAGUA) y medios acuíferos (Figura 4.15).

El manantial Chichotla y Real de Arriba pertenecen al acuífero de Temascaltepec, Las Fuentes Yече al de Ixtlahuaca-Atlacomulco, Ojo de Agua y El Capulín al acuífero del Valle de Toluca, y finalmente Los Fresnos al acuífero de Tenancingo.

##### **4.4.1. Manantial Chichotla, Temascaltepec**

El manantial Chichotla se localiza en las serranías del municipio de Temascaltepec, a 22 km aproximadamente al oeste del Volcán Nevado de Toluca y a 8 km al noreste de la cabecera municipal.

El Nevado de Toluca es la elevación más alta que se encuentra a más de 4500 msnm, mientras que el manantial está a una altitud de 2050 msnm. Emerge en una zona de vegetación densa y boscosas, alejada de las zonas de los asentamientos humanos, sobre una capa de rocas fracturadas compuesta de andesitas-basaltos.

El manantial abastece por gravedad a las comunidades de tres municipios: Luvianos, Tejupilco y Temascaltepec, por lo cual su aporte de agua es de un caudal aproximado de 360 l/s de acuerdo a datos del REPDA y corroborados en campo. Su gestión está bajo la administración de la Comisión Estatal del Agua (CAEM), Gerencia Regional de Operación Tejupilco - Valle de Bravo, jurisdicción del municipio de Tejupilco.

En la Figura 4.16 se puede observar: a) la entrada del manantial, límite perimetral de protección de este, b) la caja de captación que de igual manera está cercada y en donde se puede observar el excedente, y c) el resto del flujo de agua que corre sobre la superficie teniendo como afluente

es el río Temascaltepec, además de que observa la tubería que transporta por gravedad el agua hacia los pueblos.

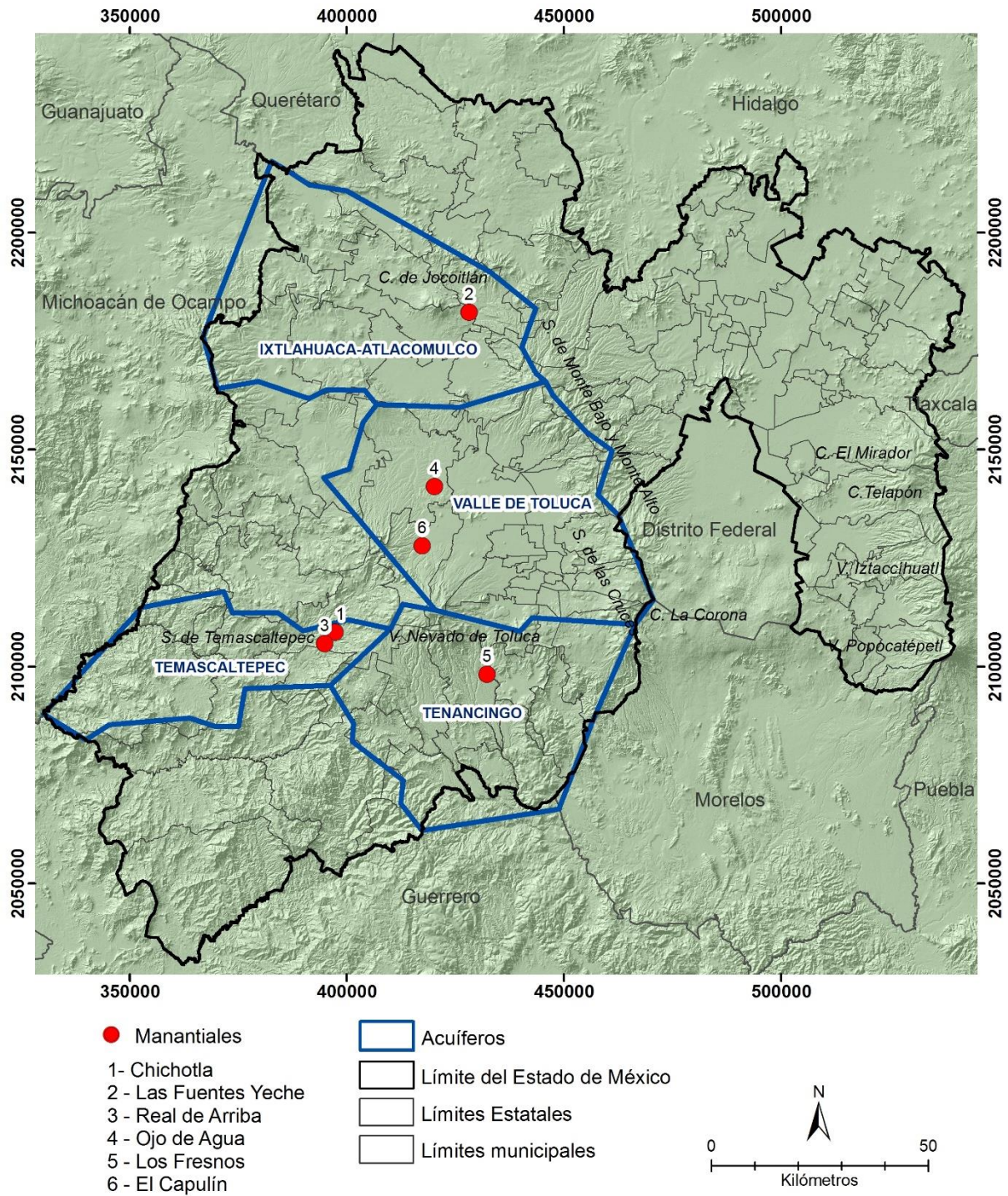
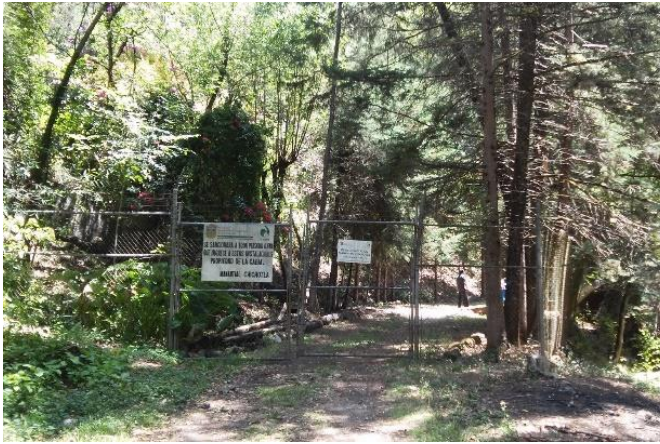
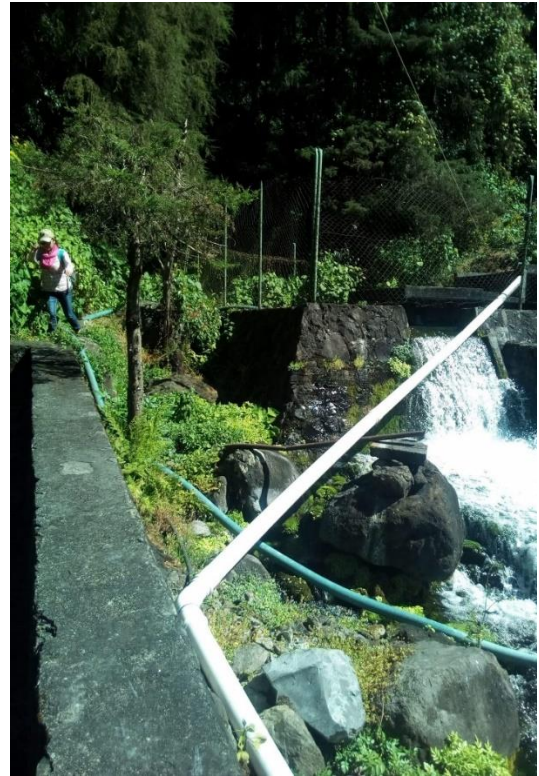


Figura 4.15. Localización de los manantiales dentro de los límites político-administrativos de los acuíferos.



a) Cercado de protección del manantial Chichotla



b) Caja de captación del manantial y excedente de agua



c) Excedente de agua

Figura 4.16. Caja de captación y excedente del manantial Chichotla

Oficialmente este manantial es el segundo con más caudal asignado con más de 360 l/s en la entidad, después del manantial el Molino que se localiza en el municipio de Malinalco y que es destinado a la acuacultura.

#### 4.4.2. Manantial Las Fuentes Yeche, Jocotitlán

El manantial Las Fuentes Yeche se encuentra en la localidad de Santiago Yeche, en el municipio del Jocotitlán, cercano a dos elevaciones que forman el parteaguas: el Cerro de Jocotitlán y la Sierra de Monte Bajo. Se localiza a 8 km al este del Cerro de Jocotitlán (tomando como punto de referencia la cima), al sur del extremo norte de la Sierra de Monte Bajo y a 11 km al noreste de la cabecera municipal de Jocotitlán.

El Cerro de Jocotitlán está a una altitud aproximada de 3900 msnm (es la mayor elevación del municipio y se considera uno de los más altos de la entidad) y la porción extrema norte de la Sierra de Monte Bajo a 3200 msnm, mientras que el manantial se encuentra a una altitud de 2599 msnm.

El agua del manantial es transportada por bombeo para abastecer aguas arriba al poblado de Santiago Yече que se encuentra a 3 km al suroeste del manantial, a una altitud de entre 2700 y 2800 msnm y es administrado por su Comité de Agua. El caudal asignado del manantial según datos del REPDA es de 9 l/s.

En la Figura 4.17 se puede observar a) panorámica de la captación el manantial, b) caja de captación, c) cajas de almacenamiento de distribución; d) excedente de agua en canal de riego y: e) el excedente que forma el arroyo Las Fuentes y que tiene un valor cultural.

El manantial emerge desde una zona escarpada, en la ladera de rocas volcánicas fracturadas compuesta por tobas andesíticas que son parte de las coladas del Cerro de Jocotitlán (al fondo de la foto se puede observar el cerro) en donde el agua es captada. Está rodeado por pastizal/matorral y cultivos.

Desde el momento que el agua es captada y fluye a la caja de almacenamiento que eventualmente es utilizada como área de recreación (alberca) a pesar de no tener la infraestructura para dicho uso. A partir de este sitio, el agua se dirige a los tres puntos mencionados: a las cajas de almacenamiento de distribución de bombeo, que a través del sistema de tuberías el agua es transportada a la zona de bombeo (algunos tubos son interceptados para llenar pipas de agua para uso comercial); al canal de riego en el que el excedente de agua fluye para regar cultivos locales y; el resto del excedente que pasa a formar parte del río y que tiene un valor cultural (al igual que la alberca) debido a que lo utilizan como lavadero.





a) Panorámica de la captación del manantial



b) Caja de captación y almacenamiento



c) Caja que transporta el agua a la zona de bombeo



d) Excedente en el canal de riego



e) Excedente del manantial (río)

Figura 4.17. Caja de captación y usos del manantial Las fuentes Yeche.

#### 4.4.3. Manantial Real de Arriba (El fresno), Temascaltepec

El manantial Real de Arriba se encuentra en el poblado del mismo nombre, en las serranías del municipio de Temascaltepec. Se localiza a 22 km aproximadamente al oeste del Volcán Nevado de Toluca, a 7 km al este de la cabecera municipal de Temascaltepec, y a 4 km al suroeste del manantial Chichotla. La elevación que forma el parteaguas es el Nevado de Toluca que llega a más de 4500 msnm, mientras que el manantial Real de Arriba se encuentra a 1905 msnm

El manantial emerge en la ladera del cerro, con vegetación densa boscosa, de rocas fracturadas de origen volcánico compuestas por andesitas-basaltos. Se encuentra dentro de una propiedad privada, dentro del pueblo y su gestión está bajo el Organismo Operador de Temascaltepec.

En la Figura 4.18 se puede observar: a) la caja de captación, y b) el excedente de agua. En la foto de la caja de captación no se pueden observar las tuberías, ya que estas van enterradas y transportan por gravedad el agua para abastecer al poblado de Real de Arriba; en la otra foto se puede ver que el excedente que fluye constantemente se utiliza para llenar una piscina dentro la propiedad y un estanque para la crianza de peces (del lado izquierdo de la foto la piscina y del lado derecho el estanque), en el cual el agua desemboca en el río Cotorrito.

El manantial Real del Arriba está dentro de los 25 manantiales más caudalosos de la entidad. Su aporte de asignación de agua es de 45.7 l/s.



a) Caja de captación donde brota el manantial



b) Excedente de agua

Figura 4.18. Caja de captación y usos del manantial Real de Arriba.

#### 4.4.4. Manantial Ojo de Agua, Almoloya de Juárez

El manantial se localiza en la cabecera del municipio de Almoloya de Juárez, en el barrio de San Pedro a una altitud de 2603 msnm. Se localiza a 3 km aproximadamente al norte del Cerro del Molcajete, elevación más cercana que llega hasta 2900 msnm, en las zonas planas del valle de Toluca.

En la Figura 4.19 se pudo observar a) el brote del manantial, b) la caja de captación, c) el excedente del manantial que se dirigen a unas albercas y d) el resto del excedente de agua que se utiliza como lavadero.

El manantial es conocido como el Santuario Ojo de Agua, se encuentra en la zona urbana de Almoloya, emerge en una zona de rocas fracturadas compuesta por basaltos cubierta por sedimentos, desde este punto las tuberías de conducción están enterradas, por lo que no son visibles. La caja de captación se encuentra a cielo abierto en el patio de la Iglesia de la Inmaculada Concepción de María, esta caja que tiene la función de estanque es habitada por peces, está cercado por una valla que forma a su vez un límite perimetral de protección del manantial inmediato. El cercado de la iglesia también tiene la función de límite de protección. El caudal para el abasto de la población es de 10 l/s.

Una parte del caudal del manantial se dirige a través de tuberías subterráneas a la zona de bombeo (3 bombas) y una vez clorada el agua, se destina a diversas localidades de Almoloya de Juárez. Otra parte del caudal del manantial es el excedente que circula desde la caja de captación a las albercas que son utilizadas como áreas de recreación y ocio, este lugar se conoce como Balneario Ojo de Agua. El agua que sigue su curso es utilizada para usos domésticos, como lavado de ropa, por lo que tienen un valor cultural. Dicho flujo de agua finalmente desemboca en el río Almoloya en donde se mezcla con las aguas negras proveniente de los drenajes del pueblo.



a) Brote del manantial



b) Estanque en donde brota el manantial



c) Balneario Ojo de Agua



d) Zona de lavadero

Figura 4.19. Caja de captación del manantial y usos del manantial Ojo de Agua.

#### 4.4.5. Manantial Los Fresnos, Villa Guerrero

El llamado manantial Los Fresnos es un conjunto de ocho manantiales que se localizan en la orilla de la cabecera municipal de Villa Guerrero. Se encuentran a aproximadamente 19 km al sureste del Volcán Nevado de Toluca y a 2 km al Norte de la cabecera municipal. Los Fresnos se encuentra a una altitud aproximada de 2110 msnm, mientras que la cabecera municipal de Villa Guerrero se encuentra entre los 2150 y 2190 msnm.

El caudal de Los Fresnos es recolectado en una caja de almacenamiento principal para ser distribuida por bombeo a la cabecera municipal. En la Figura 4.20 se puede observar: a) el brote de uno de los manantiales o veneros, b) la caja de captación de este manantial, c) la caja principal de recolección del agua de los ocho manantiales y el sistema de tuberías, y d) la zona de cloración del agua.



a) Brote del manantial



b) Cajas de captación de los veneros



c) Caja de captación principal



d) Tanques de cloración

Figura 4.20. Caja de captación del manantial Los Fresnos

Los ocho manantiales emergen en varios puntos del terreno, en la margen derecha de la cañada del río Texcaltenco (altitud del río 2104 msnm), una zona de relieve muy abrupto rodeado por vegetación densa y de difícil acceso. Los manantiales brotan sobre rocas volcánicas fracturadas basálticas. Cada manantial cuenta con una pequeña caja de captación, en donde a través de mangueras su caudal es conducido por gravedad hacia la caja de captación principal que tiene un caudal de asignación de 9.5 l/s. Desde la caja principal el agua es bombeada mediante un sistema de tuberías hacia a la zona de cloración que está en el pueblo. Una vez bombeadas son

dirigidas (junto con el agua de otras fuentes) a los tanques de elevación para abastecer al poblado de la cabecera de Villa Guerrero.

#### 4.4.6. Manantial El Capulín, Zinacantepec

El manantial El Capulín está localizado en el poblado de Tejalpa en el municipio de Zinacantepec, a 7 km al suroeste de la cabecera municipal y a 14 km al norte del volcán Nevado de Toluca.

El Capulín se encuentra a una altitud de 2902 msnm, en la margen derecha del río la Garrapata (2901 msnm). Las zonas de mayor altitud corresponden a la zona del Nevado de Toluca a aproximadamente 4500 msnm y a la zona montañosa aleadaña situada al noroeste del volcán a más de 3400 msnm.

En la Figura 4.21 se puede observar: a) el nacimiento del manantial y b) la caja de captación. El manantial El Capulín es un conjunto de manantiales que emergen a la superficie en una misma dirección, en la margen derecha del río, desde una pared de rocas, cubierta por piroclastos. Está rodeado por bosque, pero una vez alejándose del sitio predominan cultivos. El manantial tiene caudal con registro de asignación de 13.3 l/s.



a) Brote del manantial

b) Caja de captación

Figura 4.21. Caja de captación del manantial El Capulín.

La caja de captación cubre en su totalidad al conjunto de manantiales. El caudal captado es dirigido por gravedad a través de una tubería subterránea para abastecer al poblado de San Antonio Acahualco que se localiza al noreste de El Capulín. El excedente del manantial que es mínimo aporta agua del río la Garrapata, el cual tiene como afluente el río San Pedro.

#### **4.5. Delimitación de zonas de protección de manantiales**

La protección del agua subterránea debe ser una prioridad en zonas cuando la contaminación puede alcanzar fácilmente al acuífero y afectar al manantial que es la fuente de suministro de agua potable; por esta razón, el desafío de la zonificación de protección es identificar estas zonas y asignarles cierto grado de prioridad, incluso en las zonas menos sensibles.

Para determinar la protección de los manantiales se realizaron dos pasos fundamentales: delimitar la zona de captura potencial de los manantiales y, por medio de la estimación de la recarga anual delimitar las diferentes zonas de protección de cada fuente de agua.

##### **4.5.1. Delimitación de zonas de captura potencial de los manantiales**

Como bien se ha mencionado, el área de captura de un manantial es el área geográfica donde se infiltra agua que se dirige hacia el punto de descarga de dicha fuente. A partir de esta zona de captura potencial es posible definir un área de protección.

Con conocimiento geográfico y considerando la topografía del área de estudio se realizó un análisis hidrogeológico, lo que permitió la delimitación de la zona de captura potencial, en el supuesto de que el agua subterránea corre de las partes altas a las partes bajas del terreno.

Se partió de la delimitación de las zonas de captura de un manantial tomando en consideración la red de drenaje superficial a través de MDE, y por su puesto considerando la cuenca hidrográfica; no obstante, la delimitación de dichas zonas de captura difirió en algunos manantiales, ya que la dirección de la red de drenaje superficial no necesariamente coincidió con la dirección del flujo de agua subterránea, debido a que este último pasa subterráneamente por debajo de algunas corrientes de agua superficial hasta alcanzar el manantial, tal como se muestra en la Figura 3.12 de la metodología. En el mapa de la Figura 4.22 se puede visualizar la distribución y la delimitación de cada zona de captura potencial.

Los límites de las zonas de captura de los manantiales Las Fuentes Yeche y Real de Arriba han coincidido con los límites topográficos de la cuenca hidrográfica, mientras que en el resto de los casos: Chichotla, Ojo de Agua, Los Fresnos y El Capulín, dichas zonas fueron delimitadas modificando tales límites a través de una la profundización del MDE y consideraran la dirección preferencial del flujo de agua subterránea.

La extensión superficial de las zonas de captura potencial de los manantiales se puede observar en la Tabla 4.20. Prácticamente todas tienen la misma área. Se puede consultar el apartado 4.6.2. de proyección de escenarios que muestra la extensión superficial que ocupan los usos del suelo de las zonas de captura potencial.

Tabla 4.20. Área de las zonas de captura potencial de los manantiales.

| No. | Manantial         | Área (km <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------------|-------------------------|
| 1   | Chichotla         | 87.8                    |
| 2   | Las Fuentes Yeche | 71.3                    |
| 3   | Real de Arriba    | 68.8                    |
| 4   | Ojo de agua       | 76.1                    |
| 5   | Los Fresnos       | 77.3                    |
| 6   | El Capulín        | 57.7                    |

#### 4.5.1.1. Zona de captura potencial del manantial Chichotla

La delimitación zona de captura potencial del manantial Chichotla se hizo considerando la dirección preferencial del flujo de agua subterránea. Los límites de la zona de captura potencial van desde el Volcán Nevado de Toluca, punto más alto que se encuentra a más de 4500 msnm desde donde se infiltra el agua hasta recorrer la Sierra del Temascaltepec en donde se localiza el manantial a aproximadamente 2050 msnm. Existe una diferencia de altitud de más de 2000 metros.

La superficie total del área de captura se calcula en 87.8 km<sup>2</sup>. El área es ocupada sobre todo por bosque en las faldas del Nevado, pero también hay presencia importante de cultivos en las cercanías al manantial.



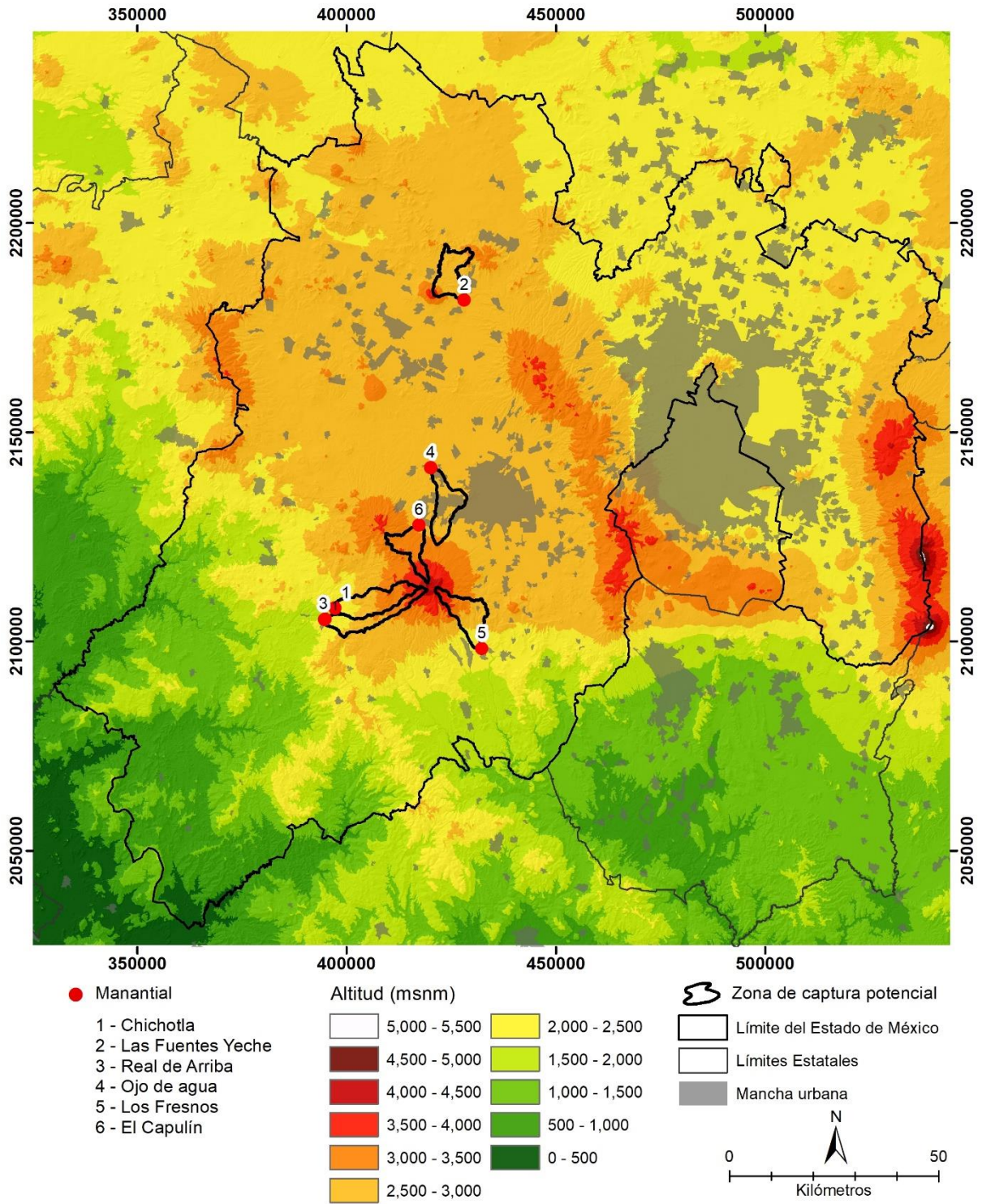


Figura 4.22. Mapa de la delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales.

#### **4.5.1.2. Zona de captura potencial del manantial Las Fuentes Yeche**

La zona de captura potencial del manantial Las Fuentes Yeche se delimitó con base en la cuenca hidrográfica ya que la dirección de las corrientes superficiales coincide con la dirección preferencia del flujo de agua subterráneo, pues esta zona está compuesta por una red de corrientes superficiales que desaparecen en un punto del terreno y vuelven a brotar en la superficie para formar ríos. Parte del caudal del manantial Las Fuentes Yeche forma el curso del río Las Fuentes que también es alimentado por otro río.

El agua proveniente de la precipitación se infiltra y circula desde los puntos más altos como es el Cerro de Jocotitlán a 3900 msnm y la parte norte de la Sierra de Monte Bajo a más de 3200 msnm (Cerro Seco y el Cerro el Peleo) hacia los puntos más bajos en donde se encuentra el manantial a 2599 msnm. La superficie total del área de captura se calcula en 71.3 km<sup>2</sup>. En general, el área es ocupada por cultivos en las zonas próximas al manantial, pero en la zona montañosa es ocupada por bosques.

#### **4.5.1.3. Zona de captura potencial del manantial Real de Arriba**

La zona de captura potencial del manantial Real de Arriba se delimitó tomando como base la cuenca hidrográfica. Sus límites se extienden desde el Volcán Nevado de Toluca que forma el parteaguas con una altitud de más de 4500 msnm hasta la Sierra del Temascaltepec en donde se localiza el manantial, a aproximadamente 1900 msnm. La superficie total del área de captura se calcula en 66.8 km<sup>2</sup>. La zona de captura potencial es ocupada sobre todo por bosque en las faldas del volcán, pero también hay presencia importante de cultivos.

#### **4.5.1.4. Zona de captura potencial del manantial Ojo de Agua**

La zona de captura potencial del manantial Ojo de Agua no coincide en su totalidad con la cuenca hidrográfica, por esta razón se hizo un ajuste de profundización al MDE para que la zona de captura potencial coincidiera con la dirección preferencial del flujo de agua subterránea.

El cerro del Molcajete (2920 msnm) es la elevación más cercana al manantial; sin embargo, este se encuentra dentro de la zona de captura potencial, la cual se extiende al sur, hasta las faldas

del Nevado de Toluca a 3250 msnm que es el límite más alto de la zona y de donde proviene el agua infiltrada, mientras que el manantial se encuentra a 2603 msnm.

La superficie total del área de captura se calcula en 76.1 km<sup>2</sup>. Los alrededores del manantial están ocupados sobre todo por zona urbana, después hay una transición de uso de suelo de pastizal y cultivos, y vuelve nuevamente a ser ocupada por zonas urbanas; sin embargo el área más alta de la zona de captura potencial está dominada por actividad agrícola; el bosque prácticamente es imperceptible.

#### **4.5.1.5. Zona de captura potencial del manantial Los Fresnos**

La delimitación zona de captura potencial del manantial Los Fresnos se hizo considerando la dirección preferencial del flujo de agua subterránea, que no necesariamente corresponde a la cuenca hidrográfica, por lo que se hizo una profundización del MDE.

El aporte de agua de Los Fresnos es proveniente de las aguas subterráneas que fluyen desde el Nevado de Toluca que se encuentra a más de 4000 msnm hasta alcanzar la zona del manantial que está a una altitud aproximada de 2100 msnm. La superficie total del área de captura se calcula en 77.4 km.<sup>2</sup> Las zonas más altas conformadas por el volcán están ocupadas por bosque; sin embargo, hay una transición a uso de suelo agrícola y urbano en un área extensa próxima al manantial. La serie de manantiales que conforman Los Fresnos se encuentran en la margen derecha del río Texcaltenco, el cual es afluente del caudal excedente del manantial y queda fuera de la zona de captura potencial.

#### **4.5.1.6. Zona de captura potencial del manantial El Capulín**

En la delimitación del área de captura del manantial la topografía local no decide en la circulación preferencial del flujo del agua subterránea, por lo que se hizo una profundización del MDE.

La altitud de la margen derecha del río y donde emerge el manantial es mayor al de la margen izquierda. Si la dirección de flujo subterráneo obedece a la topografía regional donde el agua transita desde las zonas más altas a las más bajas, entonces el río queda fuera de la zona de captura potencial.

Las zonas de mayor altitud que forman el parteaguas corresponden a la zona del Nevado de Toluca en el sur a más de 4000 msnm y a la zona montañosa alledaña situada al suroeste a más de 3400 msnm. La altitud más baja de la zona de captura potencial es donde se encuentra el manantial a 2902 msnm.

La superficie total del área de captura se calcula en 58.2 km<sup>2</sup>. Las zonas de montaña y los márgenes de los ríos están ocupadas por bosque; sin embargo, el resto de la zona de captura es predominada por parcelas agrícolas.

Una vez delimitadas las zonas de captura potencial, fue necesario delimitar las zonas de protección de los manantiales dentro éstas, a través del cálculo del balance del agua.

#### **4.5.2. Estimación de la infiltración para la delimitación de las zonas de protección de manantiales**

La estimación de la infiltración del suelo del área estudiada se llevó a cabo utilizando el método del balance hídrico, donde se estimó además la precipitación, escorrentía y la evapotranspiración del área de estudio. Con la estimación de la infiltración se lograron delimitar las zonas de protección de los manantiales.

##### **4.5.2.1. Precipitación**

Para llevar a cabo el cálculo de la precipitación se utilizaron imágenes de precipitación mensual del área de estudio.

En algunas zonas de captura potencial la precipitación media anual osciló entre los 1000 mm y 1200 mm anuales, tal es el caso de la zona de captura potencial del manantial Chichotla, Real de Arriba, Los Fresnos y El Capulín, mientras que precipitaciones menores de aproximadamente 850 mm se presentan en Las Fuentes Yече y Ojo de Agua, ambas localizadas en zonas de menor altitud y en donde la diferencia altitudinal entre los parteaguas y la ubicación de los manantiales es menor, se podría decir que prácticamente los manantiales forman parte de las zonas planas de los valles (Figura 4.23 y Tabla 4.21).

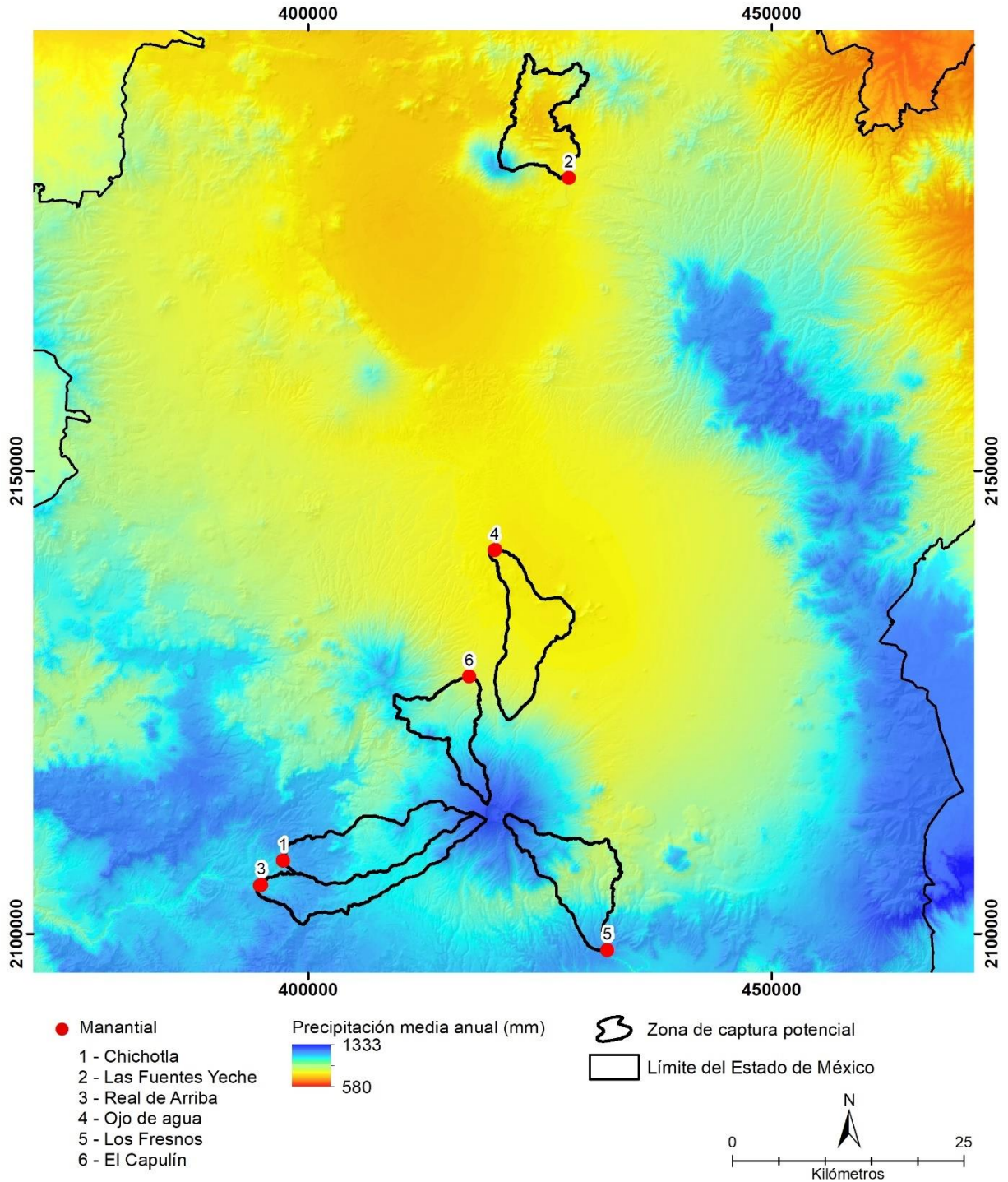


Figura 4.23. Mapa de precipitación media anual (1980-2010), con base en datos del SMN (2015) y Ordoñez (2015) y zonas de captura potencial de los manantiales.

Tabla 4.21. Precipitación media mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).

| No. | Manantial         | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct  | Nov  | Dic  | Anual  |
|-----|-------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|--------|
| 1   | Chichotla         | 21.8 | 10.5 | 11.4 | 29.2 | 85.5 | 190.2 | 218.4 | 218.7 | 194.7 | 88.3 | 24.0 | 12.0 | 1104.6 |
| 2   | Las Fuentes Yeche | 15.1 | 9.9  | 11.0 | 26.2 | 61.1 | 138.3 | 173.9 | 162.7 | 135.1 | 58.0 | 14.8 | 10.9 | 816.8  |
| 3   | Real de Arriba    | 21.5 | 10.2 | 10.8 | 28.0 | 84.7 | 195.4 | 220.8 | 223.7 | 201.6 | 91.5 | 23.9 | 11.6 | 1123.6 |
| 4   | Ojo de            | 15.0 | 8.3  | 13.0 | 29.3 | 69.3 | 143.7 | 163.3 | 154.1 | 132.3 | 57.0 | 14.1 | 8.8  | 808.2  |
| 5   | Los Fresnos       | 19.3 | 9.2  | 11.7 | 31.5 | 82.1 | 182.6 | 211.5 | 207.2 | 187.2 | 73.8 | 19.1 | 9.9  | 1045.3 |
| 6   | El Capulín        | 20.6 | 11.5 | 12.5 | 33.0 | 83.2 | 175.2 | 209.8 | 204.1 | 183.6 | 78.2 | 21.5 | 12.7 | 1045.9 |

En el mes de mayo comienzan lluvias más frecuentes, pero es de junio a septiembre cuando cambian drásticamente los patrones, disminuyendo gradualmente en octubre en todas las zonas de captura. Por lo tanto, se puede considerar que los “meses de lluvias” son de junio a septiembre y los de estiaje de octubre a mayo (Figura 4.24).

En los meses de lluvia es cuando más agua se logra infiltrar al suelo alimentando tanto a los sistemas acuíferos como manantiales. Este evento se ve reflejado en el volumen del caudal de agua de los manantiales, ya que en estiaje disminuyen un poco.

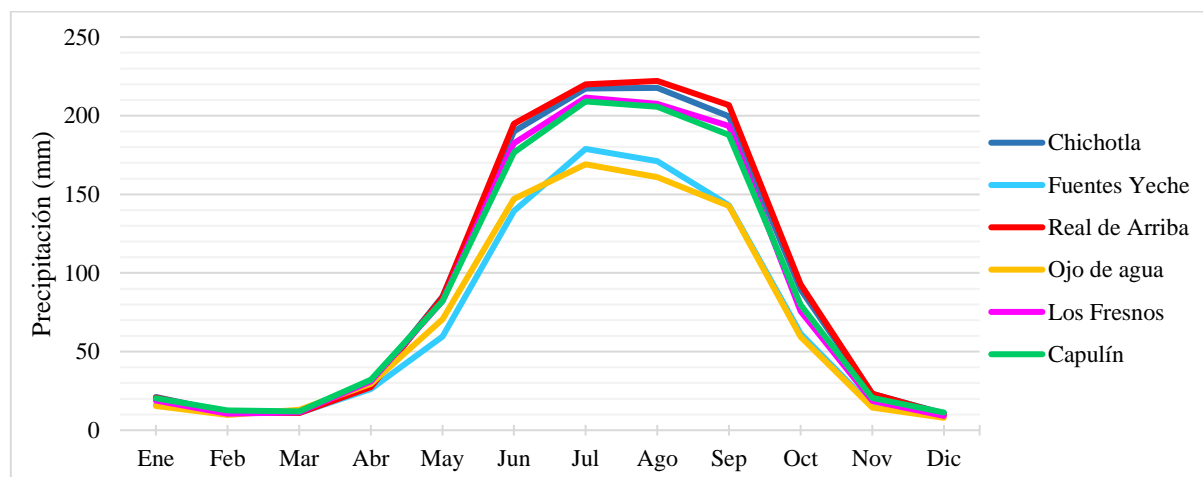


Figura 4.24. Histograma de precipitación media mensual de las zonas de captura de los manantiales.

#### 4.5.2.2. Esguerrimiento superficial

De los dos procedimientos citados en la metodología para la obtención del coeficiente de esguerrimiento superficial se eligió el método de CONAGUA, debido a que se utiliza en estudios de carácter gubernamental.

El coeficiente de esguerrimiento ( $C_e$ ) se obtuvo a partir del parámetro K que depende del tipo y uso de suelo, y del volumen de precipitación anual.

##### a) *Tipo de suelo (textura y permeabilidad)*

El tipo de suelo influirá en su capacidad de infiltración. Entre más poroso sea y menor contenido de material coloidal posea, tendrá una mayor capacidad de infiltración, lo cual retardará la aparición del esguerrimiento superficial.

Se obtuvo la clasificación del tipo de suelo de CONABIO (Figura 4.25), con la que se realizó una reclasificación con base en la textura del suelo en: gruesa, media y fina, y se asoció a su grado de permeabilidad en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables), y C (suelos casi impermeables) respectivamente (Figura 4.26). Las zonas no determinadas corresponden a cuerpos de agua y a zonas urbanas.

Puede notarse que en la zona de estudio el tipo de suelo de textura gruesa y de alta permeabilidad se encuentra localizada en la cumbre y en las faldas del noreste del volcán Nevado de Toluca, así como en la zona oeste y sur de la ZMVT. Este tipo de textura prácticamente no está presente en las zonas de captura de los manantiales, a excepción del manantial Ojo de Agua, en donde su extensión es notoria.

Las estructuras de textura media del suelo predominan, lo que favorece el proceso de percolación y puede resaltarse como una característica favorable para el funcionamiento de los acuíferos y del caudal de los manantiales, ya que todo flujo de recarga debe en primer lugar infiltrarse.

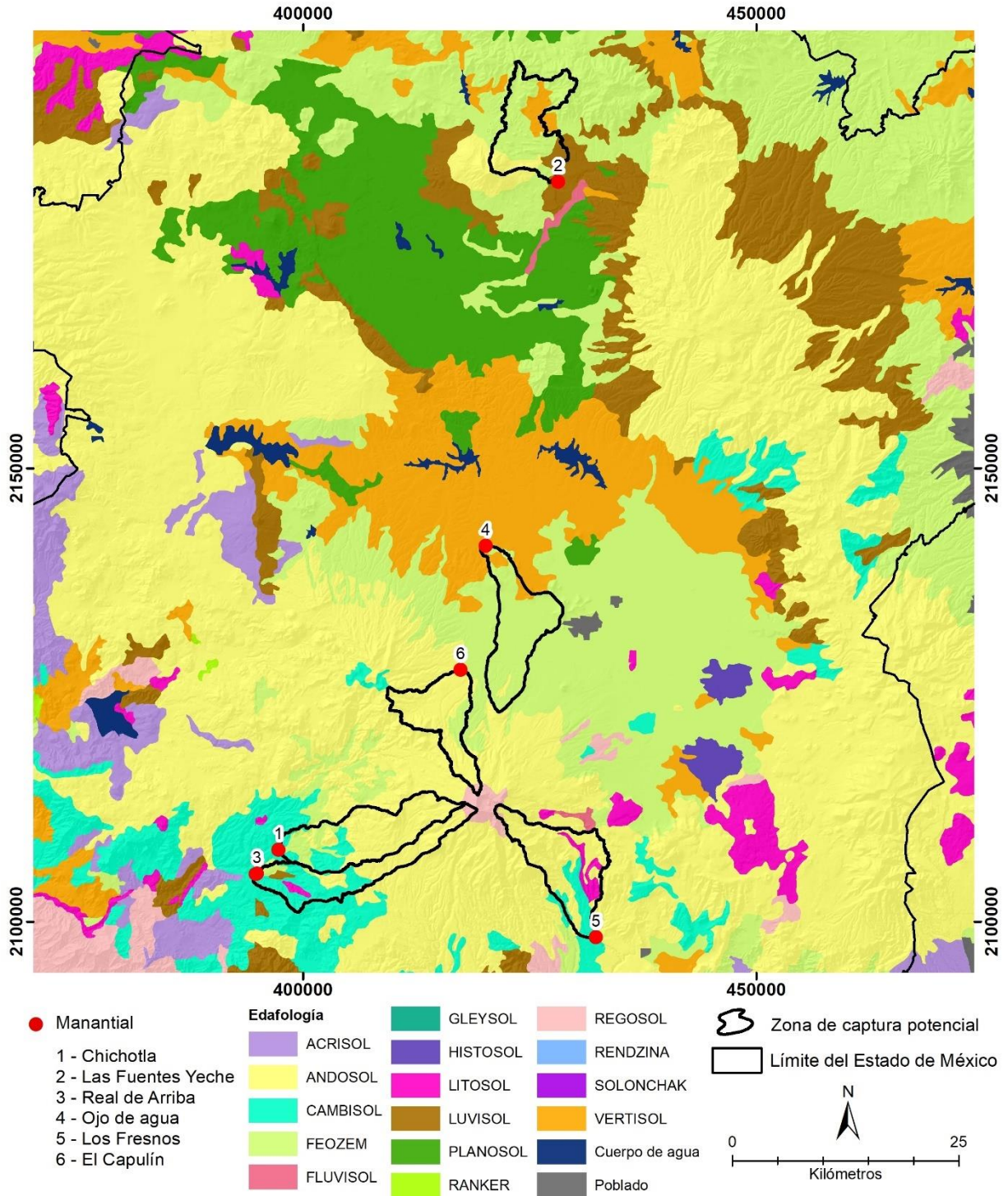


Figura 4.25. Mapa de edafología de la zona de estudio (CONABIO, 2009)



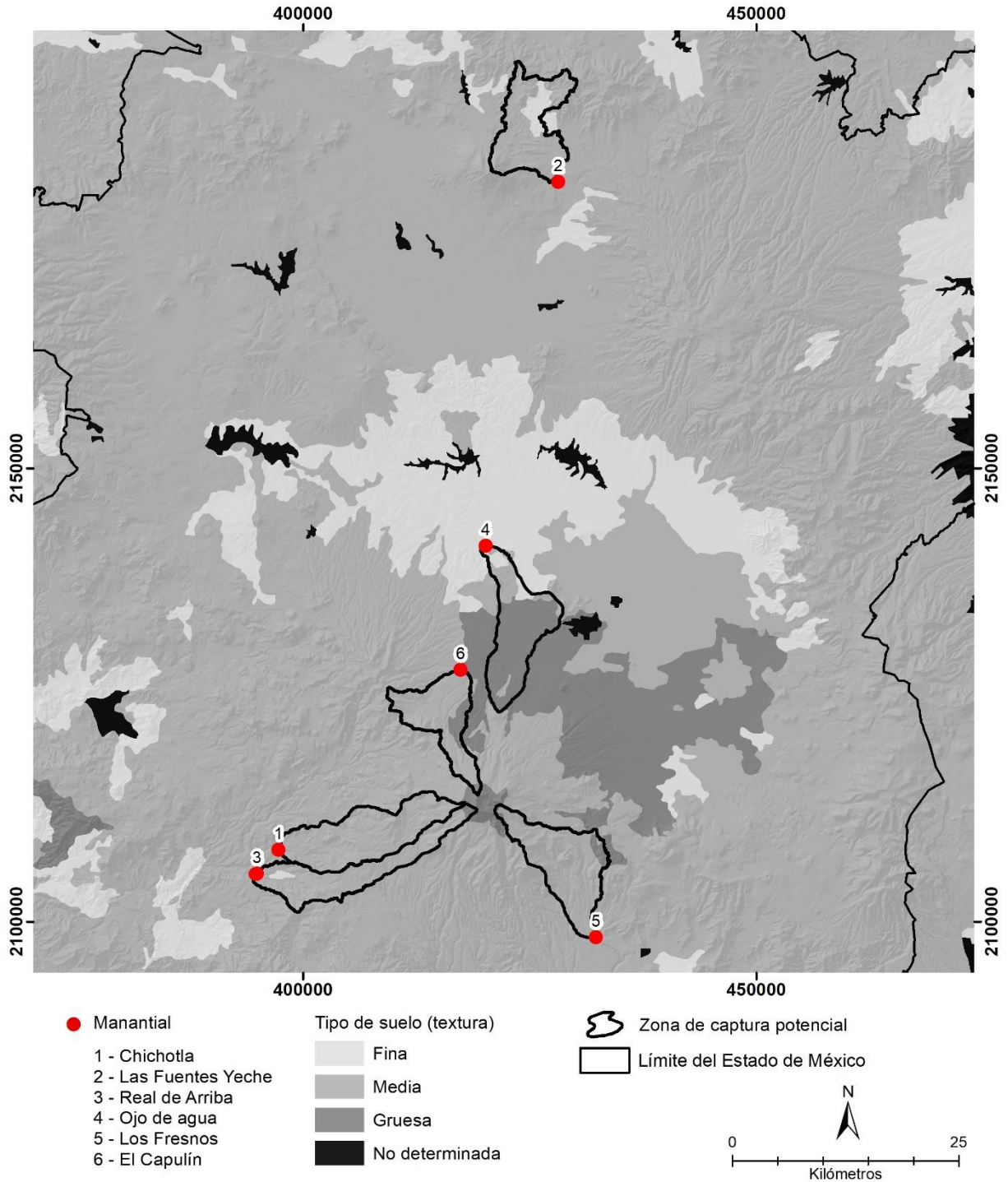


Figura 4.26. Tipo de suelo según su textura y zonas de captura potencial de los manantiales (CONABIO, 2009).

La textura media con un grado de permeabilidad media ocupa la mayor parte de la zona de estudio, y se encuentra en las zonas altas montañosas y sus alrededores, como es el Nevado de Toluca, la Sierra de las Cruces y Monte Alto, la Sierra de Temascaltepec y Cerro de Jocotitlán. Este tipo de suelo es ocupado predominantemente por cinco zonas de captura de los manantiales: Las Fuentes Yeche, el Capulín, Chichotla, Real de Arriba y Los Fresnos. Es ocupado en su mayoría por el desarrollo de las zonas urbanas del centro y norte la ZMVT.

Por su parte, la textura fina del suelo es caracterizado sobre todo por suelos casi impermeables, de pendientes suaves, localizados en la zona más baja del acuífero del Valle de Toluca, en la zona lacustre. Este tipo de suelo prácticamente no está presente en las zonas de captura, sólo se puede apreciar una pequeña porción en la zona de captura potencial del manantial Ojo de Agua y Las Fuentes Yeche.

#### *b) Uso del suelo*

Se hizo una clasificación de uso de suelo con base en imágenes satelitales LANDSAT 8 del año 2016, donde se lograron definir 7 clases: pastizal/matorral, agricultura, urbano, suelo desnudo, bosque poco denso, bosque denso y cuerpos de agua. De la clasificación, cinco fueron las categorías que ocuparon el área de estudio: áreas desnudas, cultivos, pastizal (en menos de 50%), bosque (cubierto del 25 al 50%) y zonas urbanas (Figura 4.27).

En el área mostrada se puede observar que hay una predominancia de uso de suelo agrícola principalmente (40%) y de bosque (30%), consecuentemente del pastizal/matorral y la urbe. El primero ocupa sobre todo las zonas de piedemonte y semiplanas, y las segundas las zonas montañosas como es el Nevado de Toluca, la Sierra de las Cruces y Monte Alto, la Sierra de Temascaltepec, y otros cerros.

En la zona de captura potencial del manantial Chichotla y Real de Arriba predomina el bosque en más de la mitad de la superficie, el resto corresponde a cultivos y a pequeñas zonas de pastizal/matorral y urbanas.

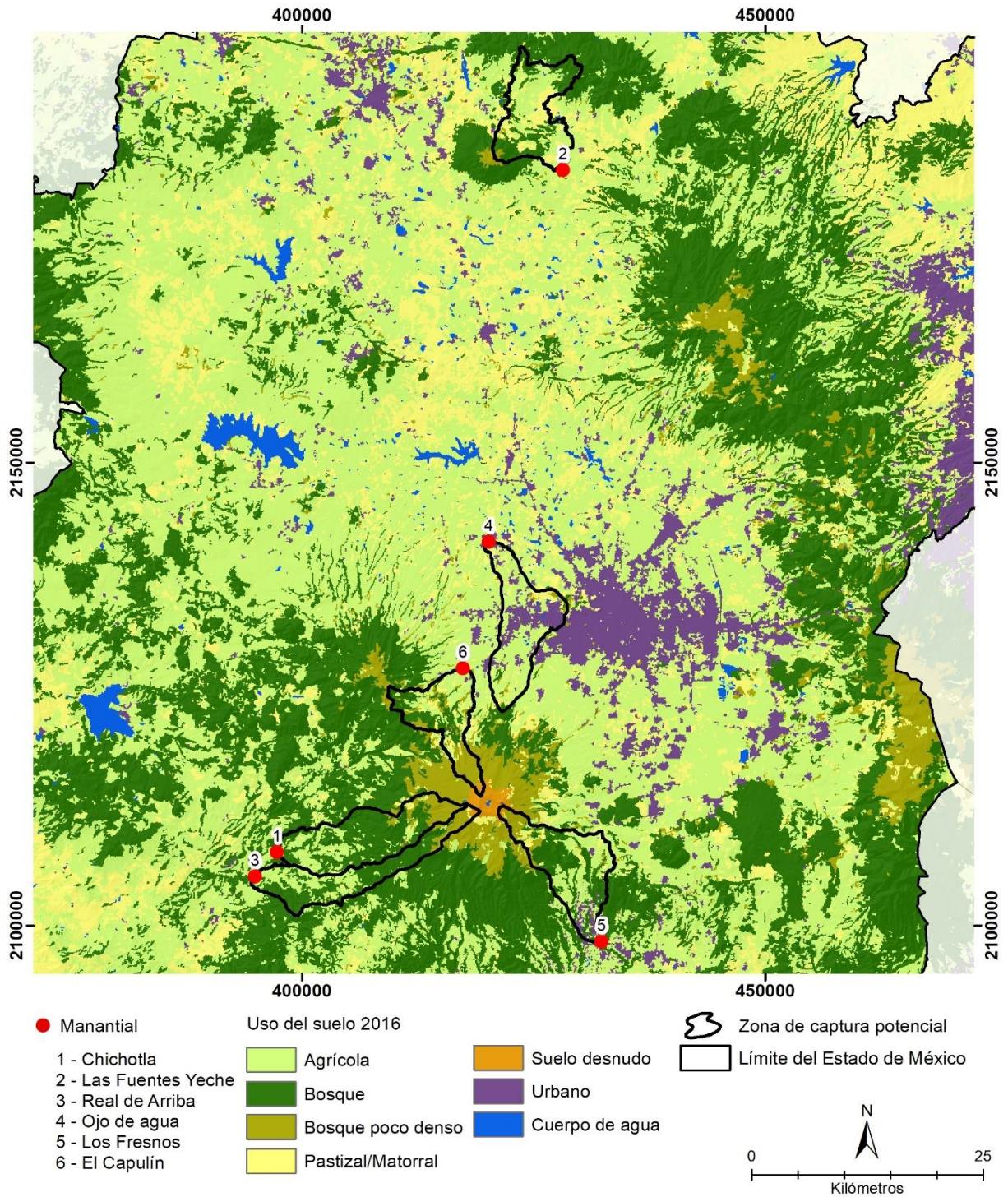


Figura 4.27. Mapa de uso del suelo para 2016 y zonas de captura potencial de los manantiales.

En las zonas de captura de los manantiales Las Fuentes Yече, el Capulín y Los Fresnos el bosque ocupa sólo una pequeña porción de su superficie y son las zonas agrícolas las que predominan con pequeñas zonas de pastizales; sin embargo, es en Los Fresnos donde se puede observar un área urbana más extensa, en las proximidades del manantial.

Por su parte, la zona de captura potencial del manantial Ojo de Agua está ocupada predominantemente tanto por cultivos como por asentamientos urbanos. En esta zona de captura potencial a diferencia resto, es más notable el uso urbano, ocupa la porción oeste de la ZMVT; sin embargo, este se encuentra alejado del manantial y es el uso agrícola el que se encuentra en las proximidades de este.

*c) Valores de  $K$  en función del tipo y uso del suelo.*

Tomando en consideración el tipo y uso de suelo se pudieron asignar los valores de  $K$  para determinar el  $C_e$ . Fueron cinco las categorías obtenidas, los valores de  $K$  varían de 0 a 0.32 con base en el método de CONAGUA (Tabla 4.22 y Figura 4.28). Los valores más altos representan mayor escurrimiento, y por lo tanto menor infiltración y los valores más bajos menor escurrimiento y por ende más infiltración del agua en el suelo.

El promedio del valor de  $K$  (parámetro que depende del tipo y uso de suelo) para el área de estudio y para las áreas de captura fue de 0.265285. Como  $K$  fue mayor de 0.15, el coeficiente de escurrimiento anual ( $C_e$ ) se calculó mediante la fórmula mencionada en el apartado de la estimación del balance hídrico de la metodología.

Tabla 4.22. Valores de  $K$  en función del tipo y uso del suelo (DOF, 2002).

| No. | Uso del Suelo                             | Tipo de Suelo |      |      |
|-----|---|---------------|------|------|
|     |   | A             | B    | C    |
| 1   | Barbecho, áreas incultas y desnudas       | 0.26          | 0.28 | 0.3  |
| 2   | Cultivos                                  | 0.24          | 0.27 | 0.3  |
| 3   | Pastizal cubierto en menos del 50% - Poco | 0.24          | 0.28 | 0.3  |
| 4   | Bosque cubierto del 25 al 50%             | 0.17          | 0.26 | 0.28 |
| 5   | Zonas urbanas                             | 0.26          | 0.29 | 0.32 |

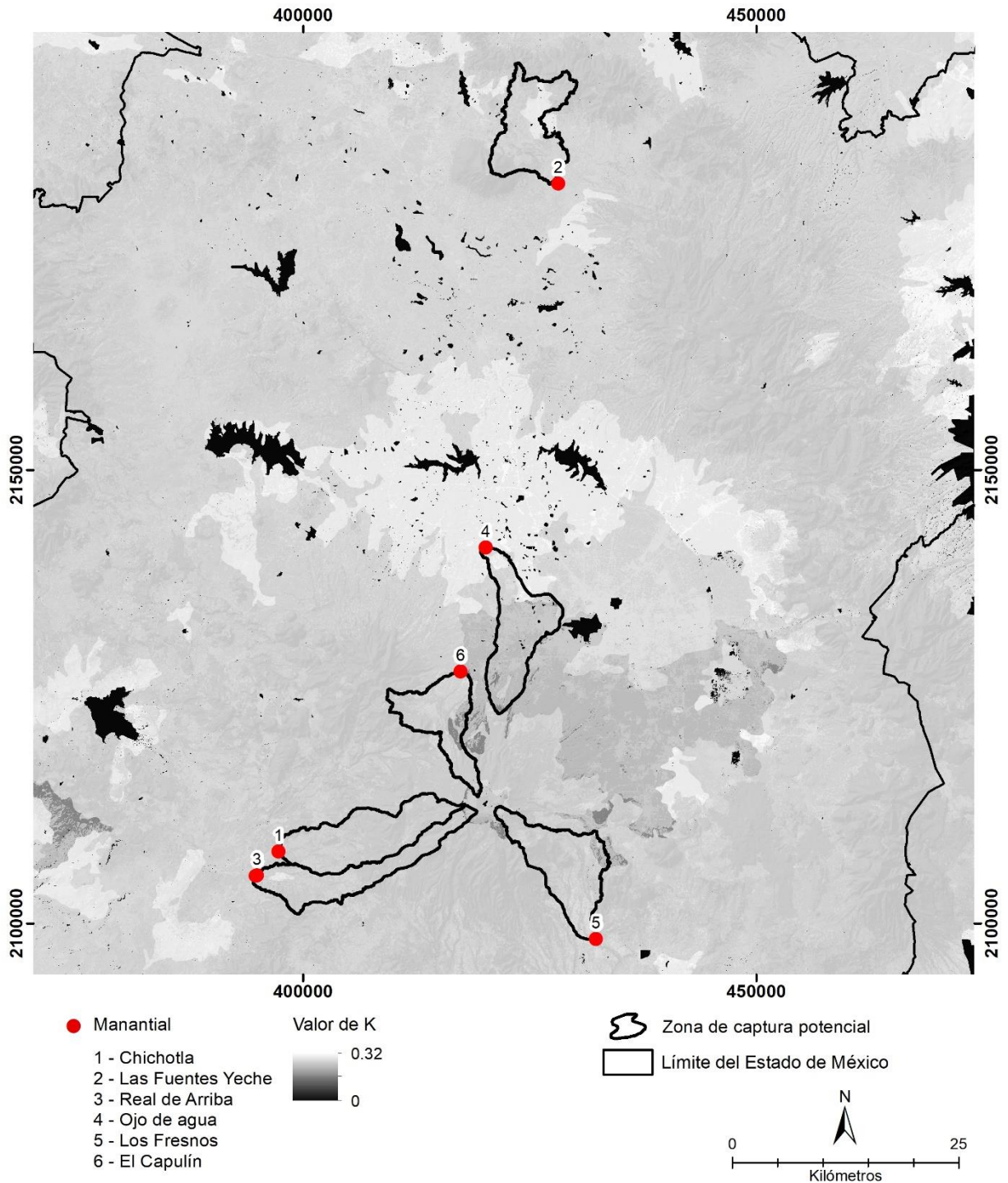


Figura 4.28. Valor de k en función del tipo y uso del suelo y zonas de captura potencial de los manantiales.

#### d) *Coefficiente de escurrimiento anual*

El  $C_e$  tomó valores comprendidos entre 0 y 0.26, correspondiendo los valores de 0 a los cuerpos de agua como son lagos y lagunas y a zonas urbanas que CONABIO marca como no determinadas (Figura 4.29). Los valores altos se localizan en algunas zonas altas de las montañas y de pie de monte; los valores medios se encuentran en la zona centro del área de estudio donde se encuentran asentamientos urbanos y en partes altas como las laderas del Nevado, y zonas de media y casi nula permeabilidad; mientras que los  $C_e$  bajos se encuentran también en parte de la zona central en las zonas más permeables donde hay cultivos y pastizales. En general las zonas con valores medios favorecen el proceso de infiltración eficaz.

#### e) *Escorrimento superficial anual y mensual*

Finalmente, el proceso de multiplicación de imágenes de  $C_e$  y de precipitación anual dio como resultado el escurrimiento superficial anual de las zonas de estudio (Figura 4.31). El escurrimiento superficial anual más elevado se presenta en las zonas altas, esto se puede explicar debido a los altos volúmenes de precipitación e intensidad de la lluvia pese a que existe una extensa zona de bosque y vegetación abundante, mientras que la zona central correspondiente a las zonas más bajas, presenta valores bajos de escurrimiento anual, aquí se encuentran algunas zonas urbanas, y extensas zonas de cultivos y pastizales (Tabla 4.23).

Tabla 4.23. Valores de  $K$ ,  $C_e$  y Escorrimento promedio anual de las zonas de captura potencial.

| No. | Manantial      | $K$    | $C_e$  | $Q$ (mm) |
|-----|----------------|--------|--------|----------|
| 1   | Chichotla      | 0.2626 | 0.1875 | 207.3    |
| 2   | Fuentes Yeche  | 0.2714 | 0.1612 | 132.0    |
| 3   | Real de Arriba | 0.2634 | 0.1907 | 214.5    |
| 4   | Ojo de Agua    | 0.2530 | 0.1431 | 115.6    |
| 5   | Fresnos        | 0.2645 | 0.1825 | 192.2    |
| 6   | Capulín        | 0.2580 | 0.1751 | 183.8    |

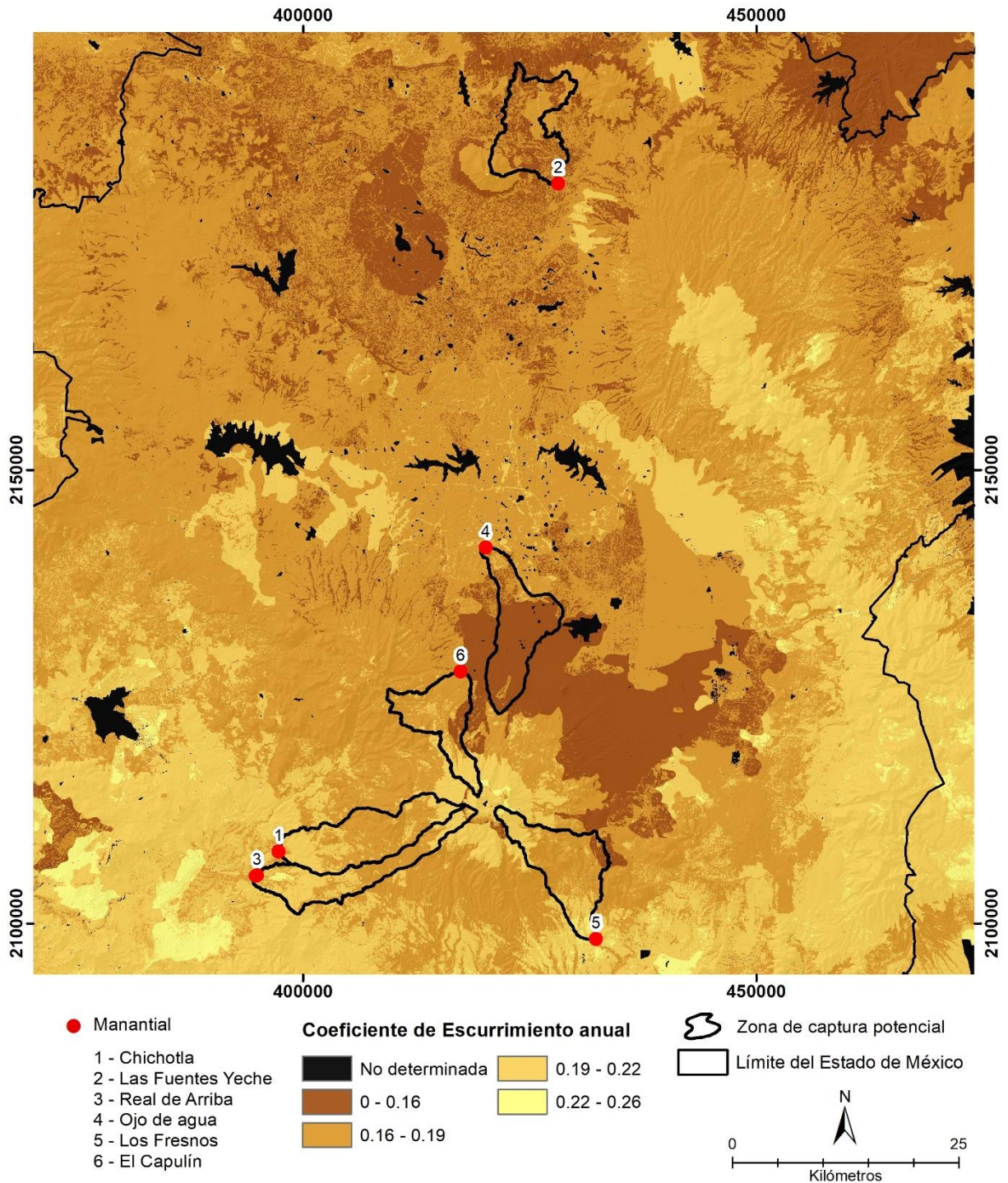


Figura 4.29. Mapa de Coeficiente de esguerrimiento anual y zonas de captura potencial de los manantiales.

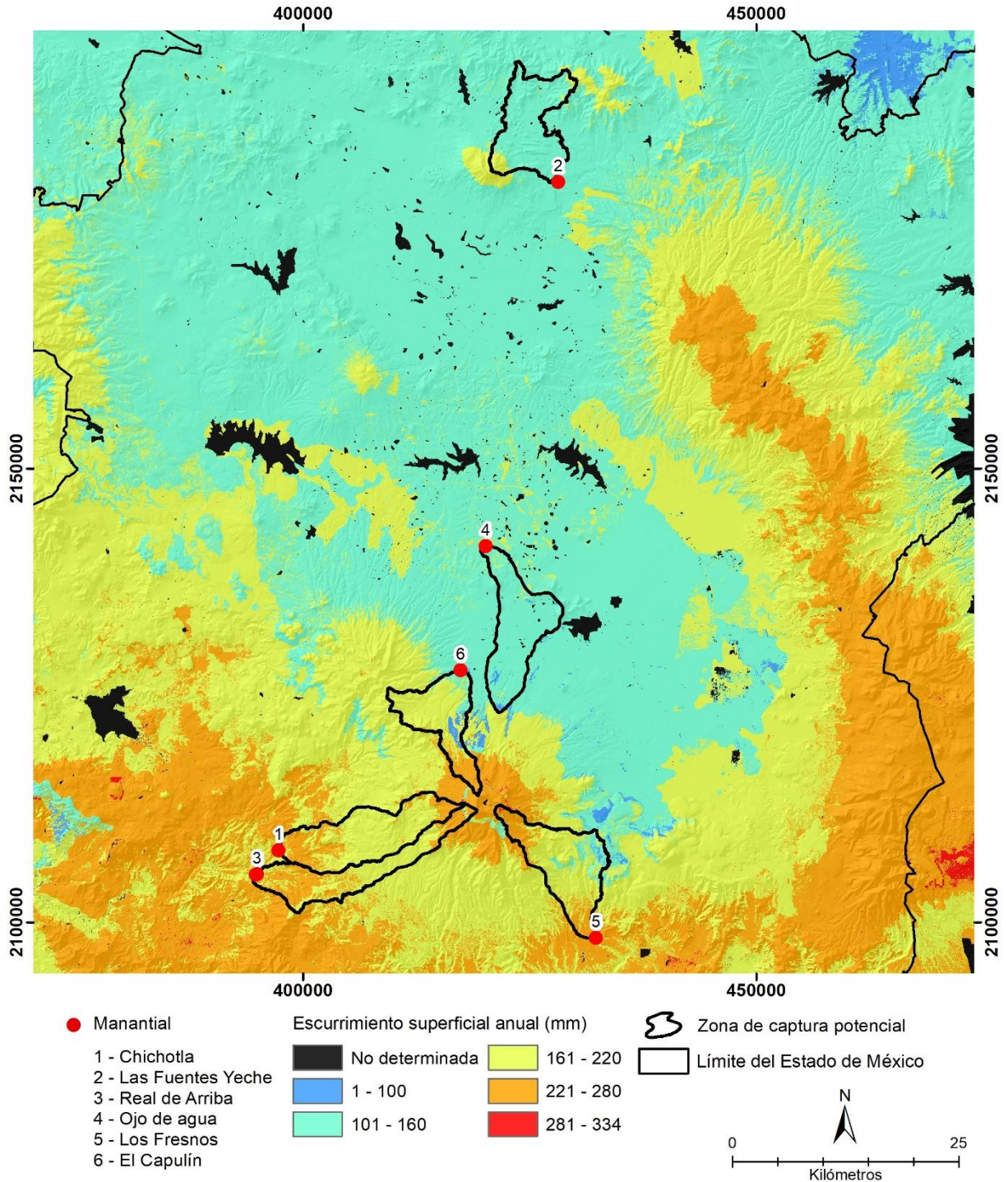


Figura 4.30. Mapa de escurrimiento superficial anual y zonas de captura potencial.

En la Tabla 4.24 y Figura 4.31 se puede observar el comportamiento temporal del escurrimiento superficial mensual. En los meses de lluvias de junio a septiembre hay mayor escurrimiento, pero no significa que este sea mayor a la infiltración.



Tabla 4.24. E scorrimiento superficial mensual y anual de las zonas de captura potencial (mm).

| No. | Manantial        | Ene | Feb | Mar | Abr | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov | Dic | Anual |
|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-------|
| 1   | Chichotla        | 4.1 | 2.0 | 2.1 | 5.5 | 16.0 | 35.7 | 41.0 | 41.0 | 36.6 | 16.6 | 4.5 | 2.3 | 207.3 |
| 2   | Las Fuentes Yече | 2.4 | 1.6 | 1.8 | 4.2 | 9.9  | 22.3 | 28.1 | 26.3 | 21.8 | 9.4  | 2.4 | 1.8 | 132.0 |
| 3   | Real de Arriba   | 4.1 | 1.9 | 2.1 | 5.3 | 16.1 | 37.3 | 42.1 | 42.7 | 38.5 | 17.5 | 4.6 | 2.2 | 214.5 |
| 4   | Ojo de Agua      | 2.1 | 1.2 | 1.9 | 4.2 | 9.9  | 20.6 | 23.4 | 22.0 | 18.9 | 8.2  | 2.0 | 1.3 | 115.6 |
| 5   | Los Fresnos      | 3.5 | 1.7 | 2.1 | 5.8 | 15.1 | 33.6 | 38.9 | 38.0 | 34.5 | 13.6 | 3.5 | 1.8 | 192.2 |
| 6   | El Capulín       | 3.6 | 2.0 | 2.2 | 5.8 | 14.6 | 30.8 | 36.8 | 35.8 | 32.3 | 13.7 | 3.8 | 2.2 | 183.8 |

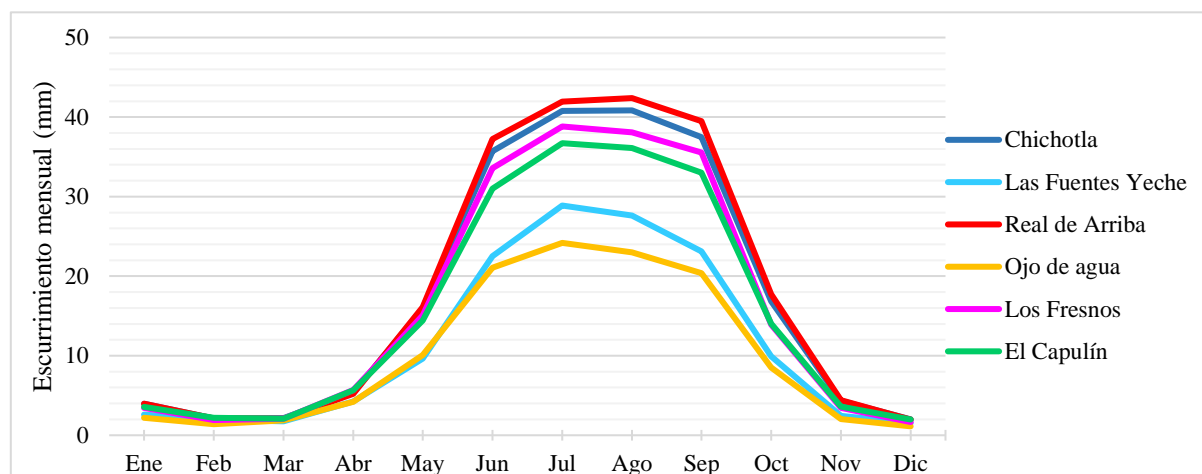


Figura 4.31. Histograma de E scorrimiento superficial mensual de las zonas de captura potencial.

#### 4.5.2.3. Evapotranspiración

De los dos métodos de evapotranspiración calculados, se optó por el método de Hargreaves. Para ellos se obtuvo la temperatura mensual y anual y la radiación solar. La temperatura anual promedio del área de la entidad varió de los 3.1 a los 22.6 °C; no obstante, para las zonas de captura potencial osciló entre los 10.1 y 12.8 °C (Figura 4.32).

El rango de temperatura mensual de las zonas de captura potencial osciló desde los 8.2 °C hasta los 14.8, siendo los meses más calurosos abril a septiembre y los más fríos de diciembre a febrero. La zona de captura potencial del El Capulín presenta las temperaturas más bajas, lo que se puede deber a que se encuentra en una latitud más alta, en la zona norte de las faldas del volcán Nevado de Toluca (Tabla 4.25, Figura 4.33).

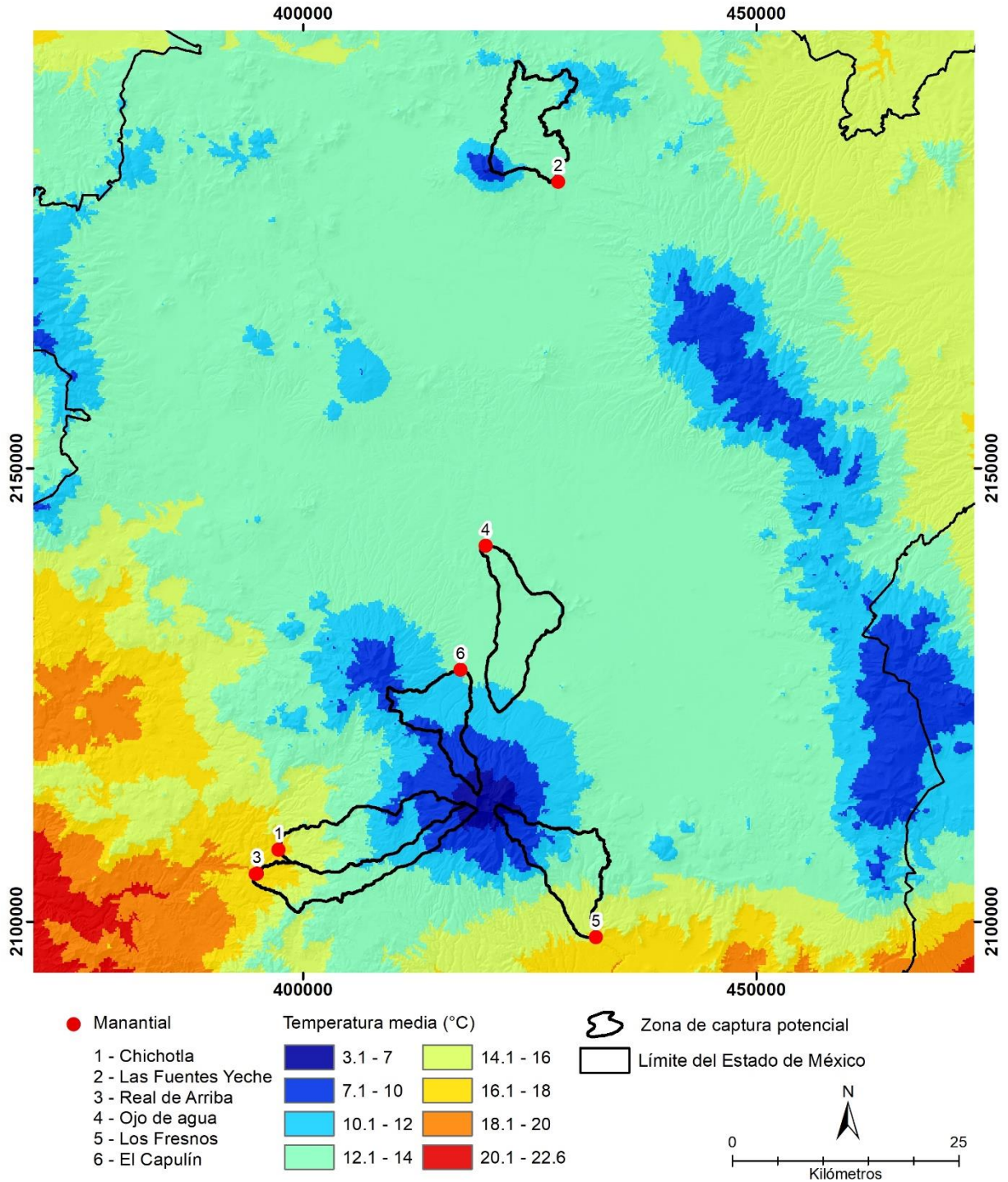


Figura 4.32. Temperatura media anual y zonas de captura potencial de los manantiales.

Tabla 4.25. Temperatura promedio mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (°C).

| No. | Manantial         | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  | Anual |
|-----|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1   | Chichotla         | 10.2 | 10.8 | 12.2 | 13.5 | 14.1 | 13.6 | 12.9 | 12.9 | 12.9 | 12.2 | 11.3 | 10.4 | 12.3  |
| 2   | Las Fuentes Yeche | 9.7  | 10.5 | 12.4 | 13.9 | 14.5 | 14.2 | 13.5 | 13.4 | 13.1 | 12.1 | 10.8 | 10.0 | 12.3  |
| 3   | Real de Arriba    | 10.8 | 11.4 | 12.8 | 14.1 | 14.7 | 14.1 | 13.5 | 13.5 | 13.4 | 12.8 | 11.9 | 11.0 | 12.8  |
| 4   | Ojo de Agua       | 9.9  | 10.8 | 12.5 | 14.0 | 14.8 | 14.5 | 13.8 | 13.8 | 13.6 | 12.8 | 11.3 | 10.2 | 12.7  |
| 5   | Los Fresnos       | 10.0 | 10.7 | 12.1 | 13.5 | 14.0 | 13.6 | 12.9 | 12.9 | 12.8 | 12.2 | 11.2 | 10.2 | 12.2  |
| 6   | El Capulín        | 8.2  | 8.8  | 10.1 | 11.3 | 11.7 | 11.3 | 10.6 | 10.7 | 10.5 | 9.9  | 9.1  | 8.3  | 10.1  |

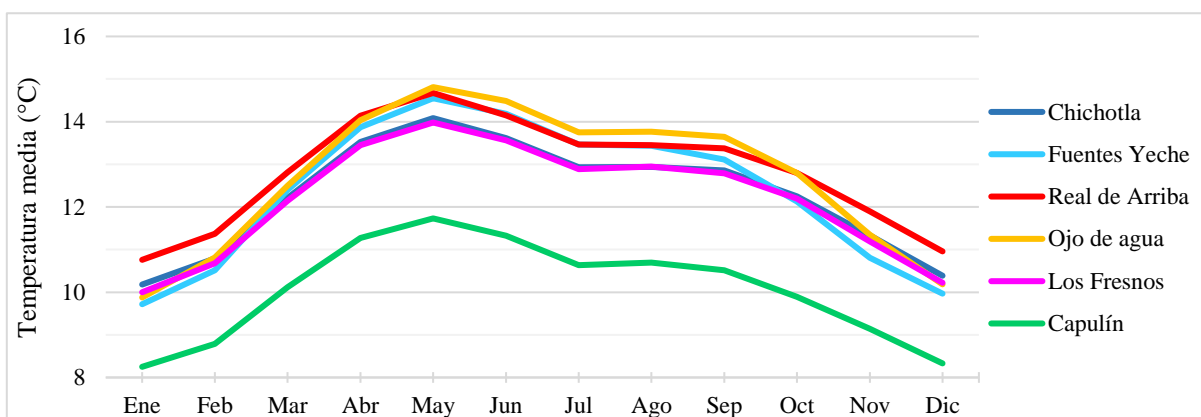


Figura 4.33. Histograma de Temperatura media mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.

Por otro lado, la radiación solar más baja se presenta en el mes de diciembre, mientras que la más alta en los meses de mayo a julio (Tabla 4.26). La temperatura y la radiación solar tienen una estrecha relación, pues los meses de temperatura más alta coinciden con los de radiación solar en las zonas de menor latitud.

Tabla 4.26. Radiación solar mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.

| No. | Manantial         | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  |
|-----|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1   | Chichotla         | 11.2 | 12.6 | 14.3 | 15.5 | 16.0 | 16.1 | 16.0 | 15.7 | 14.7 | 13.1 | 11.6 | 10.8 |
| 2   | Las Fuentes Yeche | 11.1 | 12.5 | 14.2 | 15.5 | 16.1 | 16.2 | 16.1 | 15.7 | 14.7 | 13.0 | 11.4 | 10.6 |
| 3   | Real de Arriba    | 11.2 | 12.6 | 14.3 | 15.5 | 16.0 | 16.1 | 16.0 | 15.7 | 14.7 | 13.2 | 11.6 | 10.8 |
| 4   | Ojo de Agua       | 11.2 | 12.6 | 14.3 | 15.5 | 16.0 | 16.1 | 16.0 | 15.7 | 14.7 | 13.1 | 11.5 | 10.7 |
| 5   | Los Fresnos       | 11.2 | 12.6 | 14.3 | 15.5 | 16.0 | 16.1 | 16.0 | 15.7 | 14.7 | 13.2 | 11.6 | 10.8 |
| 6   | El Capulín        | 11.2 | 12.6 | 14.3 | 15.5 | 16.0 | 16.1 | 16.0 | 15.7 | 14.7 | 13.1 | 11.5 | 10.7 |

La  $ET_o$  más baja se presenta en las zonas más altas del área de estudio como es el Nevado de Toluca, la Sierra de las Cruces y el Cerro de Jocotitlán, e incrementa gradualmente en las zonas de menor altitud (Figura 4.34).

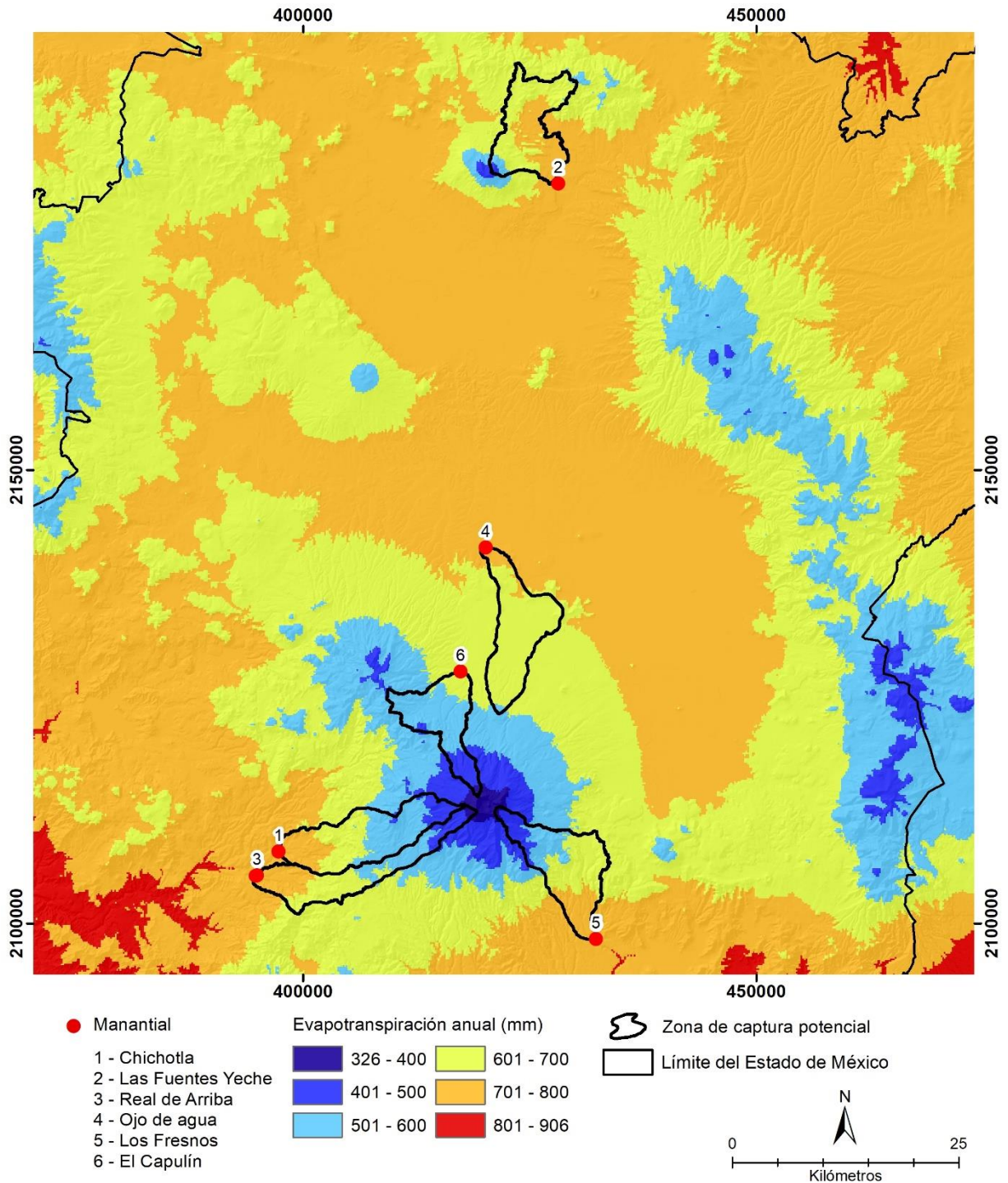


Figura 4.34. Mapa de evapotranspiración potencial anual y las zonas de captura potencial.

En el área de estudio la  $ET_o$  anual osciló de 326 mm a 906 mm anuales; no obstante, en las zonas de captura potencial osciló un promedio de 544.8 a 680 mm de agua evaporada anualmente.

Las zonas de captura potencial cuya  $ET_o$  son las más altas, varían desde 680 mm a 677 mm anuales, y son la del manantial Las Fuentes Yече y del El Ojo de Agua, esto puede ser posible debido a la altitud y a la temperatura que es más elevada. Los meses con los valores más altos de  $ET_o$  son de marzo a agosto (Tabla 4.27 y Figura 4.35).

En este sentido, es posible establecer una relación entre variables, los meses de temperatura más alta coinciden con los de radiación solar en las zonas de menor latitud y en consecuencia son los de  $ET_o$  más alta.

Tabla 4.27. Evapotranspiración potencial mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).

| No. | Manantial        | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  | Anual |
|-----|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1   | Chichotla        | 40.1 | 47.1 | 57.0 | 64.0 | 64.4 | 56.9 | 53.4 | 52.7 | 48.9 | 45.7 | 41.8 | 38.3 | 610.0 |
| 2   | Las Fuentes Yече | 43.8 | 51.8 | 63.9 | 71.6 | 73.2 | 65.8 | 60.1 | 58.9 | 54.0 | 50.2 | 45.3 | 41.7 | 680.2 |
| 3   | Real de Arriba   | 41.0 | 48.3 | 58.3 | 65.7 | 65.9 | 57.9 | 54.5 | 53.7 | 49.9 | 46.6 | 42.7 | 39.1 | 623.5 |
| 4   | Ojo de Agua      | 44.2 | 52.2 | 63.4 | 70.6 | 71.1 | 63.7 | 59.5 | 58.5 | 54.2 | 51.3 | 46.6 | 42.2 | 677.4 |
| 5   | Los Fresnos      | 41.0 | 48.1 | 58.0 | 64.7 | 64.9 | 57.6 | 54.2 | 53.5 | 49.2 | 46.5 | 42.6 | 39.2 | 619.3 |
| 6   | El Capulín       | 35.6 | 41.9 | 50.7 | 56.7 | 57.7 | 51.9 | 47.7 | 47.4 | 43.4 | 40.2 | 37.0 | 33.9 | 544.1 |

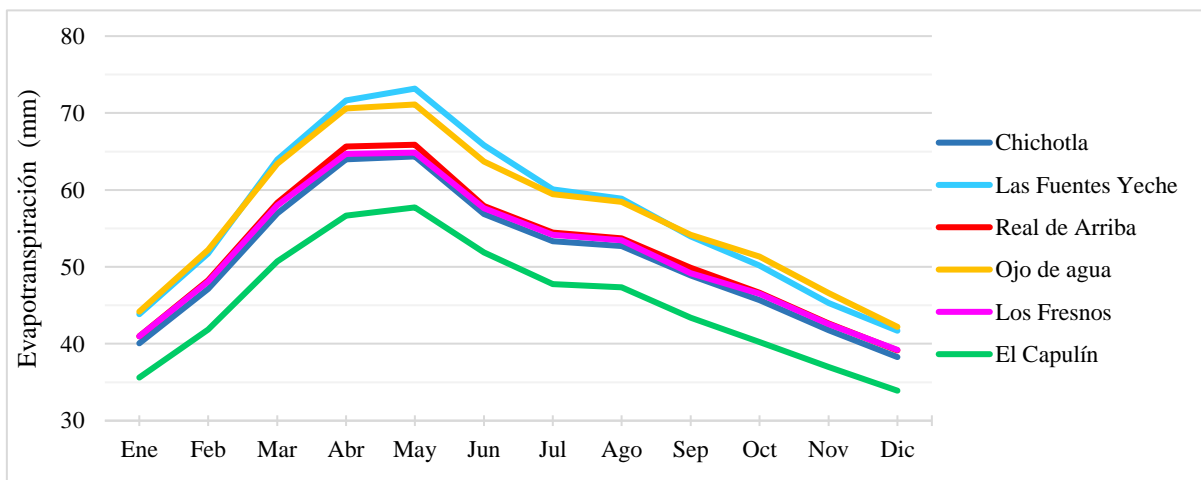


Figura 4.35. Histograma de evapotranspiración de referencia mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.

#### 4.5.2.4. Infiltración

Los resultados de la *Ip* anual mostraron que los valores en las zonas de captura potencial oscilan entre los 684.9 mm y los 909.2 mm anuales. Prácticamente las seis zonas de captura potencial de los manantiales tienen el mismo rango de *Ip*, no obstante, las Fuentes Yeche y El Ojo de Agua cambian ligeramente, debido a que se encuentran en las zonas de menos precipitaciones.

Los valores más altos *Ip* anual se presentan en los meses de junio a septiembre, meses en los que también se dan las mayores lluvias”, altas temperaturas, alta evapotranspiración y mayor escurrimiento superficial. Los valores de la *Ip* representarían la máxima cantidad de lluvia que puede absorber el suelo (Tabla 4.28 y Figura 4.36).

Una vez llevada a cabo la *Ip* se obtuvo la *Ir* anual (Figura 4.37). Los resultados demostraron que los mayores volúmenes de agua precipitados anualmente ocurren en las zonas montañosas, principalmente en la Sierra de las Cruces, el Volcán Nevado de Toluca y las sierras del sur de la entidad estatal, disminuyendo gradualmente hacia los pies de monte y zonas planas.

Tabla 4.28. Infiltración potencial mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).

| No. | Manantial         | Ene  | Feb | Mar  | Abr  | May  | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct  | Nov  | Dic  | Anual |
|-----|-------------------|------|-----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 1   | Chichotla         | 17.7 | 8.5 | 9.2  | 23.7 | 69.5 | 154.4 | 177.4 | 177.7 | 158.1 | 71.7 | 19.5 | 9.8  | 897.3 |
| 2   | Las Fuentes Yeche | 12.6 | 8.3 | 9.2  | 22.0 | 51.2 | 116.0 | 145.8 | 136.4 | 113.3 | 48.6 | 12.4 | 9.1  | 684.9 |
| 3   | Real de Arriba    | 17.4 | 8.2 | 8.8  | 22.7 | 68.6 | 158.0 | 178.7 | 181.0 | 163.1 | 74.0 | 19.3 | 9.4  | 909.2 |
| 4   | Ojo de Agua       | 12.9 | 7.1 | 11.1 | 25.1 | 59.4 | 123.2 | 140.0 | 132.1 | 113.4 | 48.8 | 12.1 | 7.5  | 692.7 |
| 5   | Los Fresnos       | 15.8 | 7.5 | 9.6  | 25.7 | 67.1 | 149.0 | 172.7 | 169.2 | 152.7 | 60.2 | 15.6 | 8.1  | 853.2 |
| 6   | El Capulín        | 17.0 | 9.5 | 10.3 | 27.2 | 68.6 | 144.4 | 172.9 | 168.3 | 151.3 | 64.4 | 17.7 | 10.4 | 862.1 |

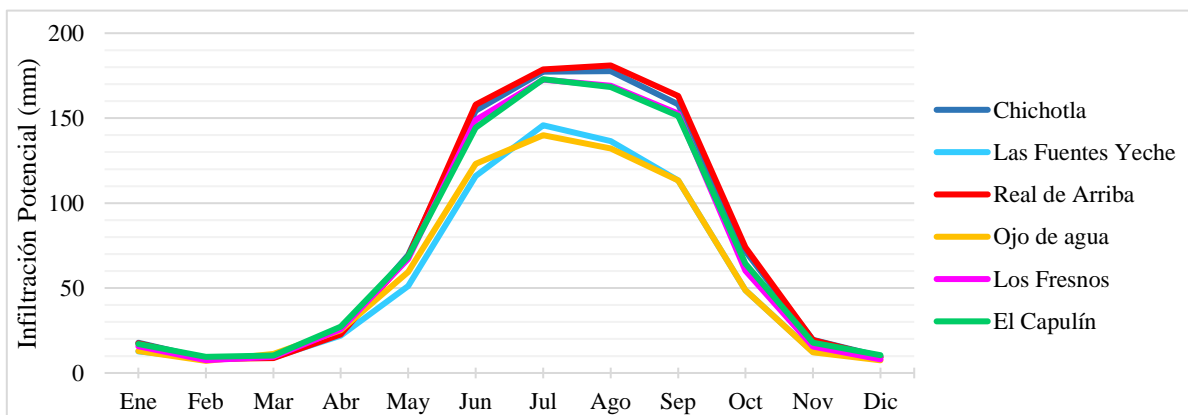


Figura 4.36. Histograma de infiltración potencial mensual de las zonas de captura potencial.

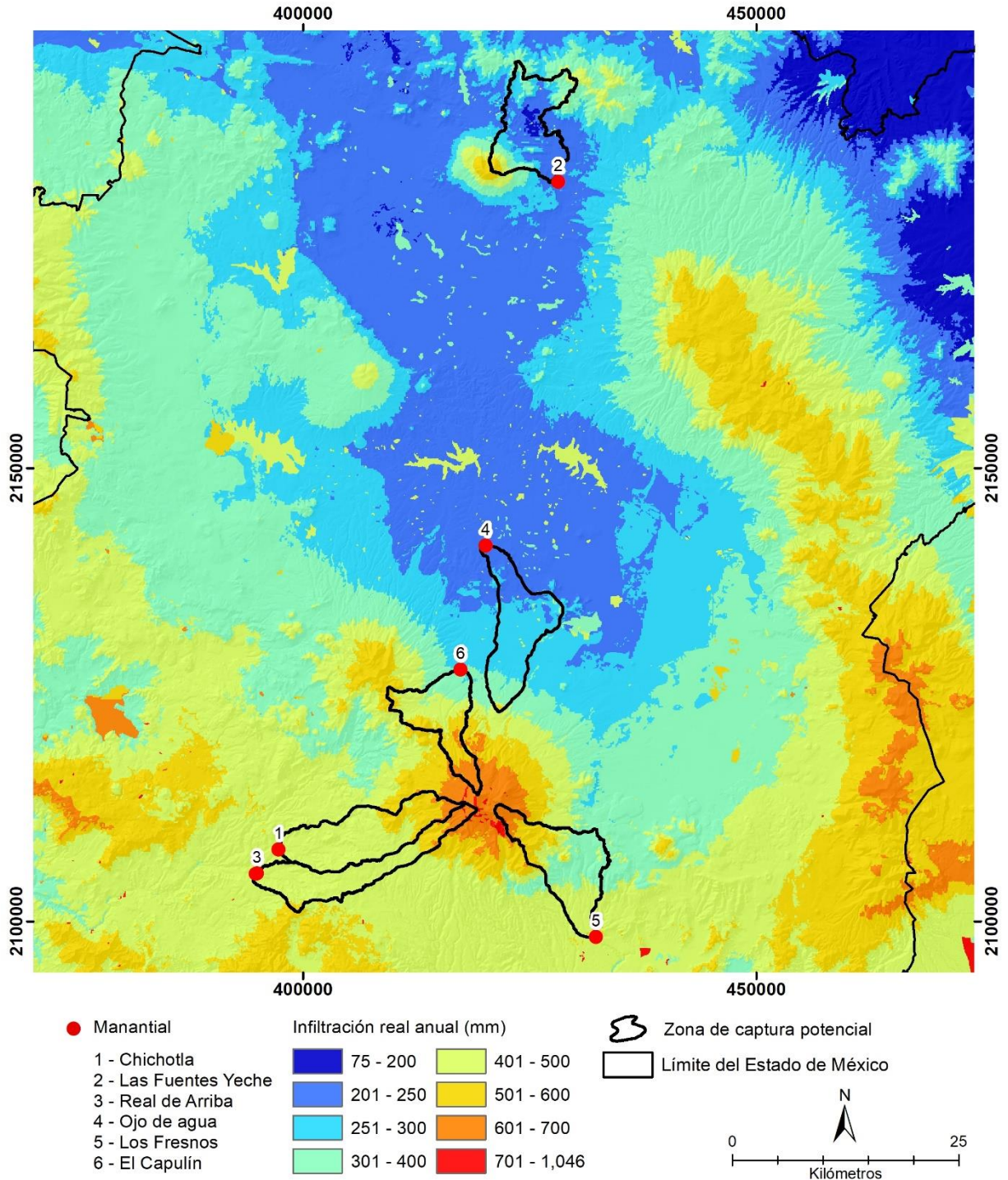


Figura 4.37. Mapa de infiltración real anual y zonas de captura potencial de los manantiales.

Cuatro zonas de captura potencial de los manantiales tienen un rango de  $I_r$  que va desde los 272 mm a los 494.9 mm al año. Los valores más bajos corresponden a las zonas de captura de las Fuentes Yeche y El Ojo de Agua. La baja infiltración de estos dos se puede deber a que se

encuentran en zonas donde ocurren menos precipitaciones, en suelos casi impermeables ocupadas por amplios cultivos. La variabilidad temporal de la infiltración se puede observar más claramente en la Tabla 4.29 y Figura 4.38.

En general los meses en que se infiltra el agua en el suelo es de mayo a octubre, que son los meses en que ocurren las mayores precipitaciones. En las zonas de captación del manantial Las Fuentes Yeche y Ojo de Agua, los meses en que hay infiltración de agua de lluvia es de junio a septiembre y va de 50 mm a 85 mm mensuales, mientras que en el resto sucede de mayo a octubre y con volúmenes de agua mayores, pues van desde los 2.2 mm hasta 127.3 mm mensuales.

En este sentido, las zonas de captura de los manantiales Chichotla, Real de Arriba, El Capulín y los Fresnos se ven más favorecidas respecto a la cantidad de agua infiltrada a pesar de ir disminuyendo gradualmente de la zona del Nevado de Toluca hacia los manantiales.

Tabla 4.29. Infiltración real mensual y anual de las zonas de captura potencial de los manantiales (mm).

| No. | Manantial         | Ene | Feb | Mar | Abr | May  | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct  | Nov | Dic | Anual |
|-----|-------------------|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|-------|
| 1   | Chichotla         | -   | -   | -   | -   | 5.1  | 97.6  | 124.0 | 125.0 | 109.2 | 26.1 | -   | -   | 486.9 |
| 2   | Las Fuentes Yeche | -   | -   | -   | -   | -    | 50.2  | 85.8  | 77.6  | 59.3  | -    | -   | -   | 272.8 |
| 3   | Real de Arriba    | -   | -   | -   | -   | 2.7  | 100.1 | 124.2 | 127.3 | 113.3 | 27.3 | -   | -   | 494.9 |
| 4   | Ojo de Agua       | -   | -   | -   | -   | -    | 59.5  | 80.5  | 73.6  | 59.2  | -    | -   | -   | 272.8 |
| 5   | Los Fresnos       | -   | -   | -   | -   | 2.2  | 91.4  | 118.5 | 115.7 | 103.6 | 13.7 | -   | -   | 445.0 |
| 6   | El Capulín        | -   | -   | -   | -   | 10.8 | 92.5  | 125.2 | 121.0 | 107.9 | 24.2 | -   | -   | 481.7 |

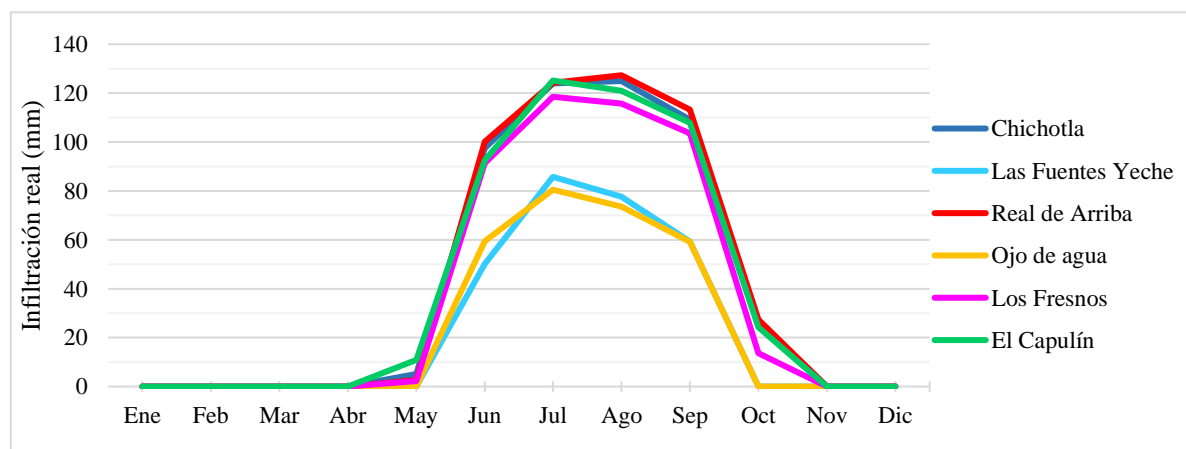


Figura 4.38. Histograma de infiltración real mensual de las zonas de captura potencial de los manantiales.



En conclusión, la infiltración ocurrida puede ser influenciada por las características físicas y climáticas de las zonas estudio. Dependiendo del tipo (permeabilidad) y uso de suelo, geología, altitud, relieve, e incluso latitud en las que se localizan las zonas de captura será el comportamiento espacial y temporal de los diversos factores climáticos y del ciclo del agua, lo que dará como consecuencia en mayor o menor medida la infiltración del agua en el suelo.

#### **4.5.3. Delimitación de las zonas de protección de manantiales**

La zona de captura potencial de los manantiales se dividió en distintas áreas para su protección, con la finalidad de evitar la amenaza de contaminación del agua y agotamiento del recurso. Dicha subdivisión resultó de la modificación del método británico para la delimitación de zonas de protección de fuentes de agua (Environment Agency, 2009) que, en lugar de considerar los tiempos de tránsito de un contaminante, consideró la recarga anual, estimada esta como el agua que potencialmente llegaría al manantial en ese tiempo.

De este modo se lograron diferenciar tres zonas de protección: interna, externa y de contribución potencial a largo plazo. En el apartado 4.6 Proyección de escenarios se presenta una tabla con la extensión superficial de los usos del suelo de las zonas de protección de manantiales.

La zona de protección interna (ZP I) se ubicó inmediatamente adyacente al manantial. Es caracterizado por el límite perimetral (cerca, malla, reja o barda) que rodea al manantial, diseñado para proteger contra la transmisión de contaminantes que podrían representar un riesgo significativo para las aguas subterráneas. Es un límite fijo cuyo objetivo es reducir el riesgo de contaminación por químicos y algunos patógenos.

La zona de protección externa (ZP II) consideró la relación de la recarga anual, la descarga y el área de recarga. La recarga anual de las zonas de captura potencial supone un tiempo de tránsito de 365 días, tiempo que tarda el agua en alcanzar el manantial desde el momento en que se infiltra. Su extensión superficial puede variar.

La zona de contribución potencial del manantial (ZP III) corresponde al área restante de la zona de captura potencial. Es el área en la cual toda la recarga de aguas subterráneas se podría descargar en la fuente a largo plazo.

#### 4.5.3.1. Zonas de protección del manantial Chichotla y Real de Arriba

Debido a la colindancia de las zonas de captura potencial del manantial Chichotla y Real de Arriba y a que en ambas la dirección del flujo del agua subterránea va en el mismo sentido, éstas fueron unificadas para poder definir las zonas de protección en una sola zona de captura potencial; sin embargo, en algunos de los apartados posteriores se muestran divididas para una mejor percepción de los resultados.

El manantial Chichotla tiene como ZP I un límite de protección mediante una malla y cuenta con personal encargado de restringir el acceso a personas ajenas a la gestión de este; mientras que el manantial de Real de Arriba tiene como límite un bardeado (propiedad privada) que impide de igual modo el paso a personas y el vertido directo de contaminantes.

Las ZP II ocupa más de la mitad de la zona de captura potencial de cada manantial, 51.7% de Chichotla y 64.9 % de Real de Arriba, lo cual ubica el límite de la ZP II a la misma distancia, ocupando aproximadamente el 60% (90 km<sup>2</sup>) de la zona de captura total de ambos manantiales. Debido a que las características de ambas zonas de captura potencial son similares, no habrá variación notoria de las variables utilizadas posteriormente entre ambas.

La ZP II es la zona que en un año aporta el agua suficiente para alimentar a los manantiales debido a las condiciones de fracturamiento del medio rocoso, su caudal es de 1,400 l/seg aproximadamente, incluidos los volúmenes de agua asignados para ambos. Esta zona está ocupada principalmente por bosque denso en aproximadamente el 58% y por cultivos en un 40%. La ZP III se extiende hasta el Nevado de Toluca, es la zona en que el agua subterránea puede llegar a largo plazo a los manantiales (Figura 4.39).

Se debe prestar atención a las actividades que se realizan en las localidades situadas sobre todo en la zona I y II para evitar o minimizar el grado de contaminación y de demanda del agua, sobre todo porque a pesar de que el manantial emerge en una zona con vegetación abundante, la ZP II presenta inmediatamente en una extensión de cultivos que, en caso de utilizar productos químicos, podrían penetrar en la superficie, alcanzar el flujo de agua subterránea y viajar en el transcurso de un año hasta llegar al manantial, pudiendo degradar la calidad del agua y/o disminuir el caudal.

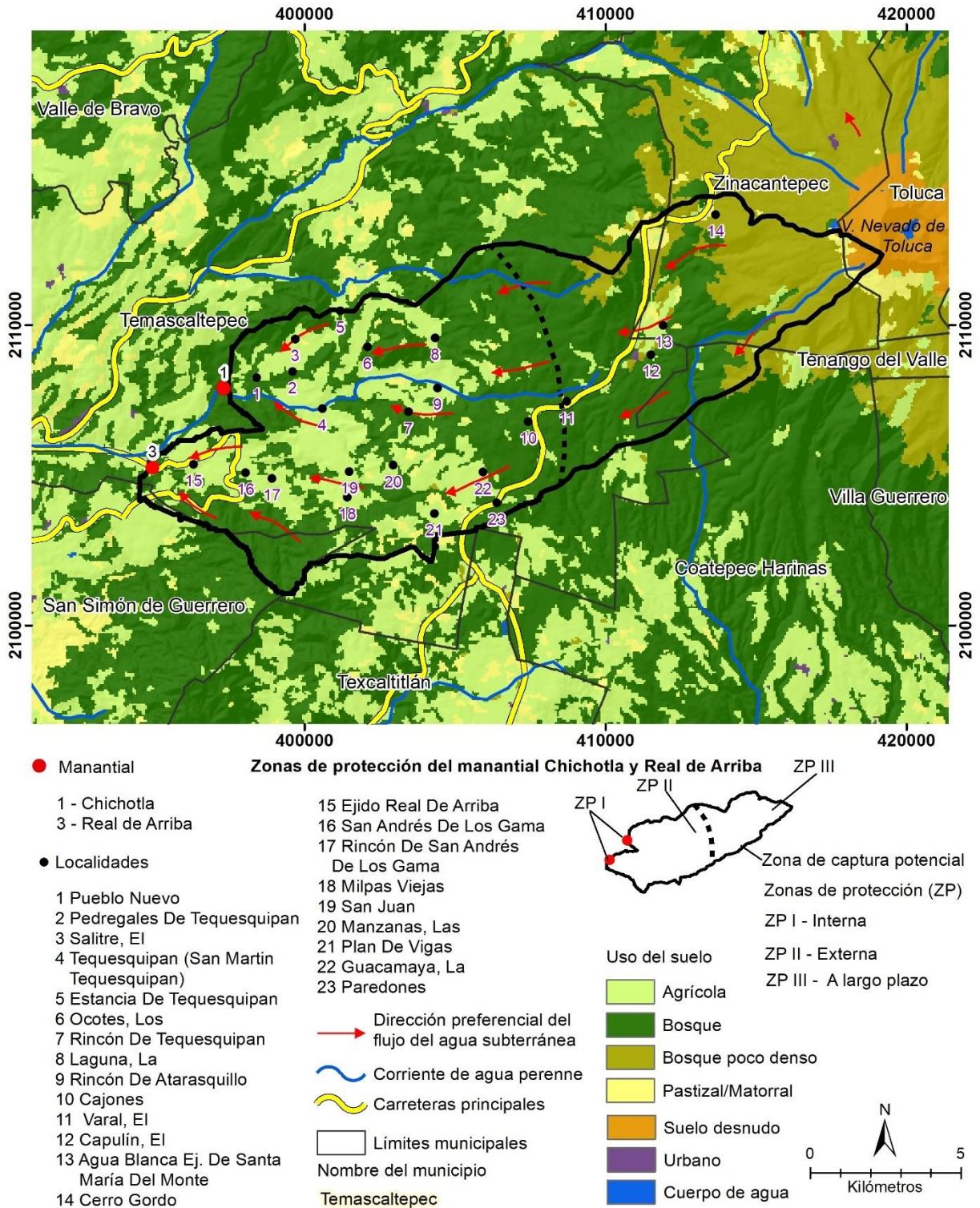


Figura 4.39. Zonas de protección del manantial Chichotla y Real de Arriba, Temascaltepec.

No obstante, el resto de la zona ZP III localizada en las faldas del Nevado es ocupadas por bosque poco denso y denso, una zona importante para la infiltración de agua; de no atender las primeras zonas agrícolas, el agua que transita puede contaminarse.

#### **4.5.3.2. Zonas de protección del manantial Las Fuentes Yeche**

La ZP I del manantial Las Fuentes Yeche es inexistente, cuenta únicamente con la caja de captación y enseguida con la caja de almacenamiento que es utilizada como balneario. De aquí se desvía el agua a las tuberías para ser bombeada. Sólo se cuenta con una zona de protección en el área de bombeo.

El manantial tiene un valor cultural, es utilizado como área de recreación y ocio, por lo que hasta el momento se permite tener dicho uso y acceso a él. En caso de existir a futuro alguna situación que contribuya a la contaminación inmediata de este, será necesario construir una zona de protección; no obstante, esta debe ir de la mano con las medidas de protección de la ZP II.

Las ZP II llega hasta las laderas del Cerro de Jocotitlán y Monte Bajo, ocupa el 22.7 % del área de captura (16.2 km<sup>2</sup>) y aporta el agua suficiente para que en un año el flujo de agua subterránea llegue al manantial, el cual fue de 140 l/seg, incluido el volumen a agua asignado.

Esta zona está ocupada principalmente por bosque denso en aproximadamente un 49.7%, por pastizal en un 18.3% y por cultivos en un 26%,. El suelo agrícola podría favorecer la entrada de agentes químicos que contaminen el flujo de agua subterránea que llega al manantial (Figura 4.40).

En este sentido, las localidades que se sitúan dentro de los límites de la ZP II deben prestar atención para tener las medidas correspondientes y evitar o minimizar el grado contaminación para que no llegue a afectar en algún momento dado la calidad del agua.

El resto de la zona ZP II junto con la ZP III localizada en las zonas más altas de la zona de captura potencial, están ocupadas por bosque denso, tienen una función importante como áreas de recarga.

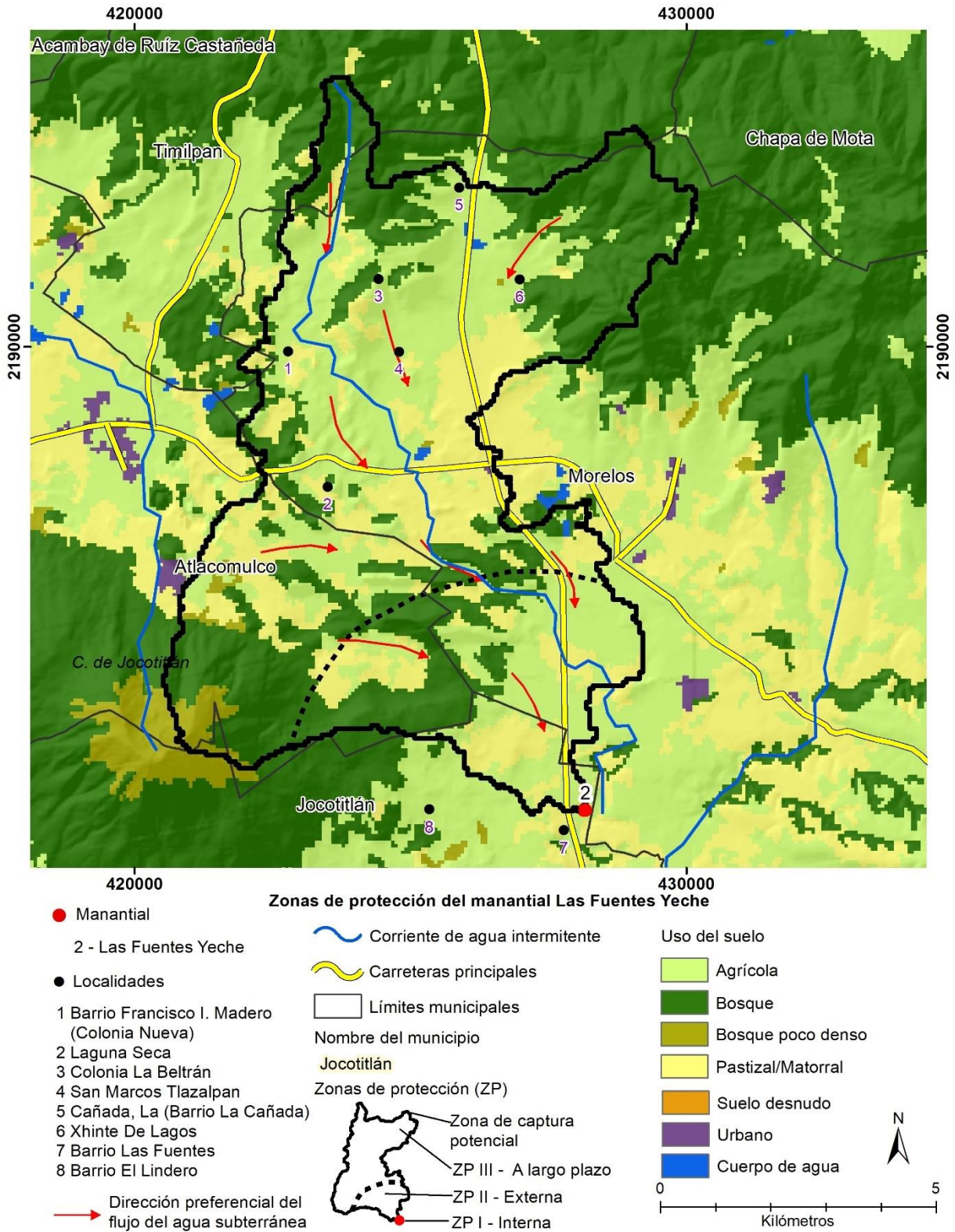


Figura 4.40. Zona de captura potencial para el manantial Las Fuentes Yече, Jocotitlán.

#### 4.5.3.3. Zonas de protección del manantial Ojo de Agua

La ZP I del manantial Ojo de Agua está compuesta por una valla que rodea inmediatamente la captación de agua y por el bardeado del patio de la Iglesia de la Inmaculada Concepción de María. Estas deberían tener la función de protección; sin embargo, se permite el acceso de personas quienes visitan el manantial, y por tener una creencia religiosa arrojan monedas al agua las cuales pueden afectar su calidad. Debe ser necesaria la construcción una zona de protección que tenga tal función, o dado el caso se debe prohibir arrojar monedas al agua.

La superficie de la ZP II que ocupa sobre todo las zonas planas del Valle de Toluca. Ocupa en 30.4% de la zona de captura potencial, y se calcula en 23.1 km.<sup>2</sup> El caudal natural medido del manantial fue de 200 l/seg, incluido el volumen a agua asignado.

El uso de suelo de la ZP II es principalmente destinado a la agricultura y al desarrollo urbano aguas arriba en un 56% y 24% respectivamente, el pastizal ocupa 17.2% (Figura 4.41). Ésta ZP II del manantial Ojo de Agua presenta mayor presencia de asentamientos urbanos a diferencia de las otras zonas de captura.

En esta zona se debe prestar atención, por la posibilidad de favorecer la entrada de agentes químicos contaminantes al flujo preferencial de agua subterránea. Las localidades que se sitúan dentro de los límites de la ZP II deben establecer las medidas necesarias para evitar o minimizar la degradación de la calidad del agua que llega al manantial.

Por otro lado, la ZP III es ocupada de igual manera por el uso agrícola, lo que acentúa aún más la posibilidad de implementar medidas de protección para el manantial.

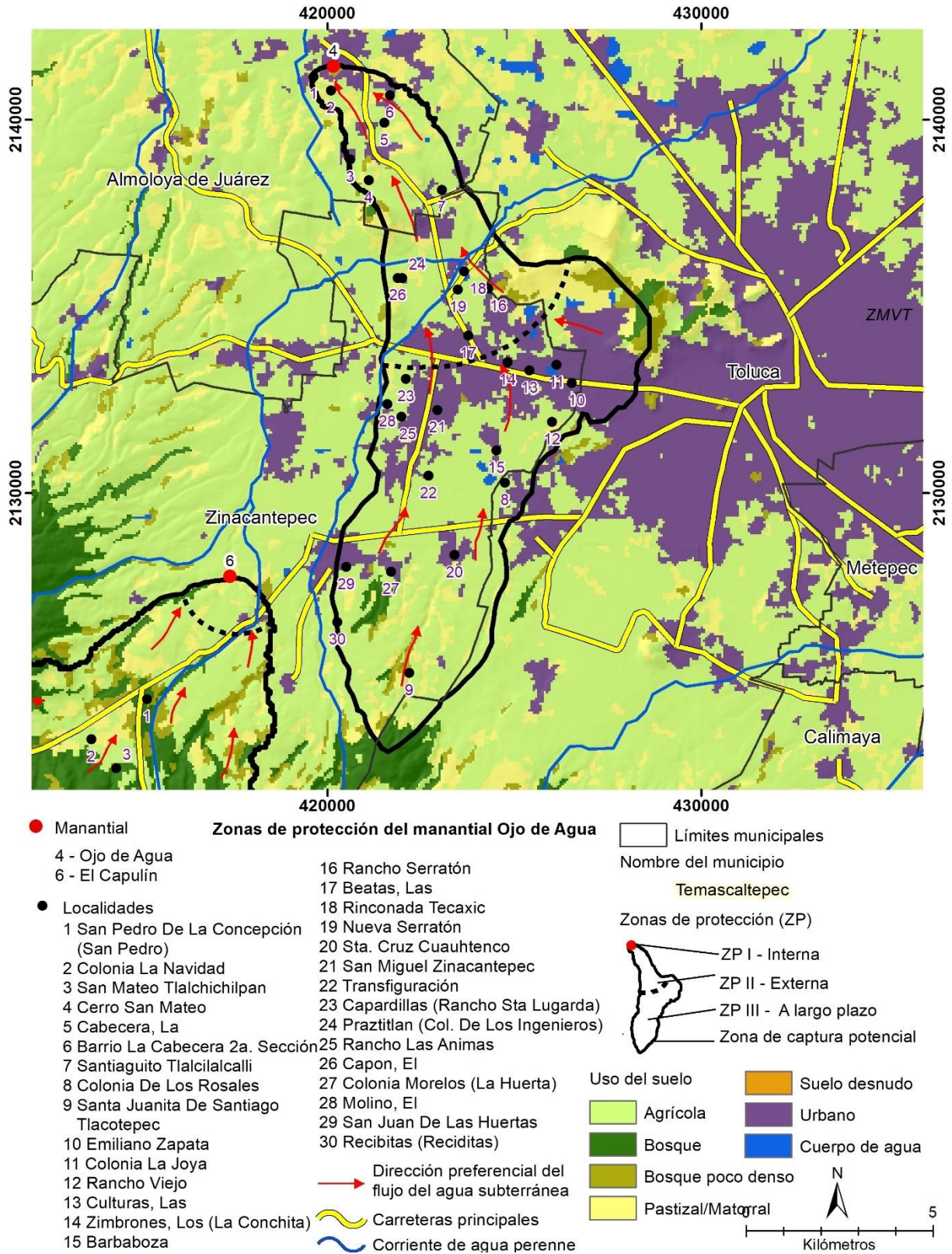


Figura 4.41. Zona de captura potencial para el manantial Ojo de Agua, Almoloya de Juárez.

#### **4.5.3.4. Zonas de protección del manantial Los Fresnos**

La ZP I del manantial Los Fresnos es inexistente, cuenta únicamente con la caja de captación, lo que puede facilitar la contaminación por agentes externos. No obstante, aguas arriba comienza una transición de ocupación del uso suelo.

Las ZP II ocupa aproximadamente el 18% de la zona de captura potencial (1.4 km<sup>2</sup>), cuya área aporta el agua suficiente para que en un año el flujo de agua subterránea llegue al manantial; su cual es de 20 l/seg, incluido el volumen a agua asignado.

La ZP II está ocupada por bosque denso en un 37.7%, suelo agrícola con invernaderos en un 30.5% ya que la característica principal del municipio es el cultivo de flor, y por suelo urbano en un 32%,

La intensidad de la floricultura en el suelo es superior al del resto de las zonas de captura, aquí se utiliza mayor cantidad de químicos favoreciendo la entrada contaminante al flujo de agua subterránea que puede alcanzar el manantial (Figura 4.42).

La ZP III que ocupa la mayor cantidad de superficie del área de captura, es ocupada de igual manera por uso agrícola y urbano, lo que acentúa aún más la posibilidad de implementar medidas de protección para el manantial, a pesar de que en las zonas altas esté inmerso de bosques.



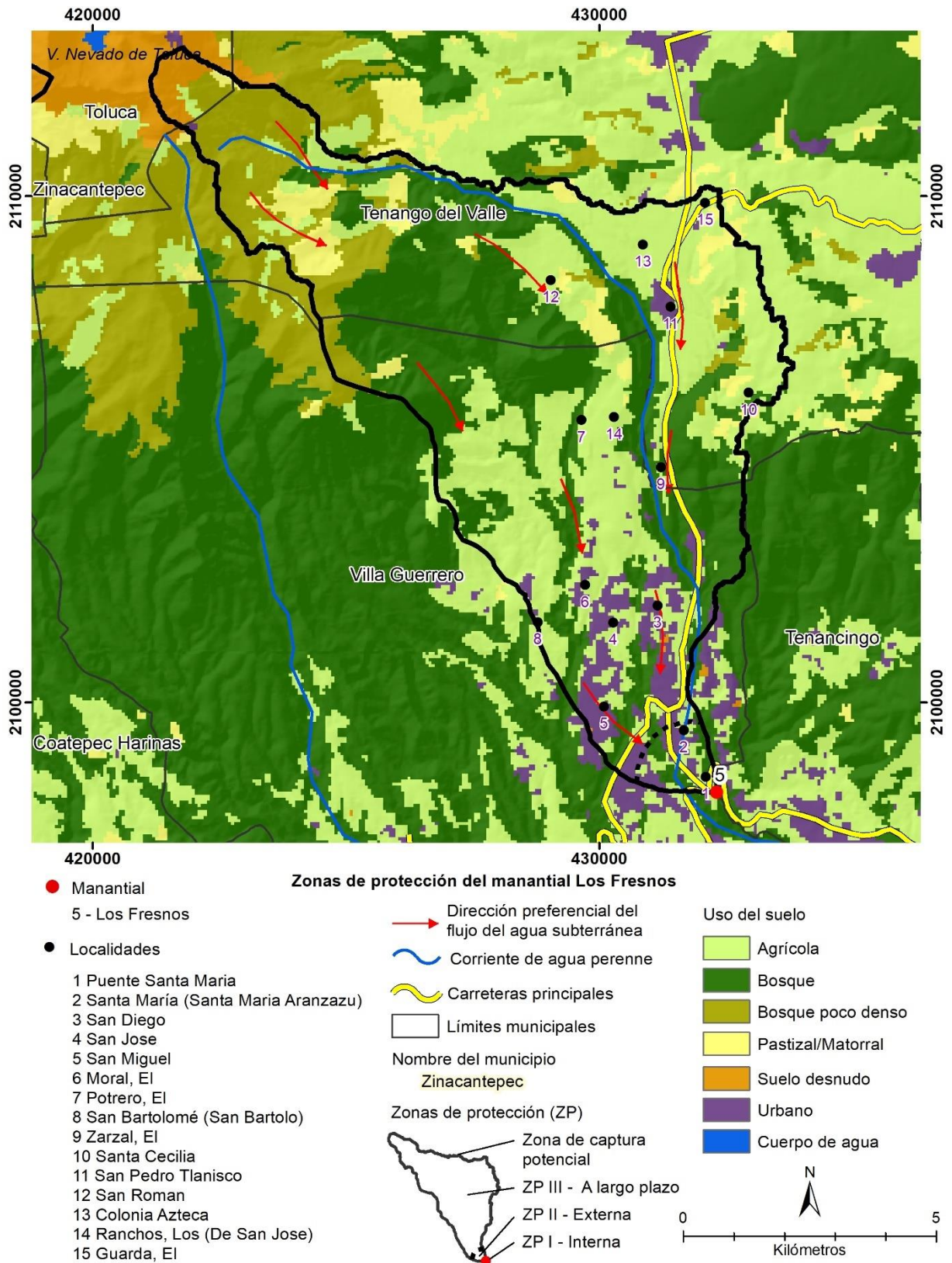


Figura 4.42. Zona de captura potencial para el manantial Los Fresnos, Villa Guerrero.

#### 4.5.3.5. Zonas de protección del manantial El Capulín

La ZP I del manantial El Capulín tampoco existe como tal, cuenta únicamente con la caja de captación, sin embargo, ésta cuenta con tapas que fácilmente pueden ser abiertas o removidas y favorecer el acceso a contaminantes externos.

Por su parte, la ZP II que ocupa aproximadamente el 4% del total de la zona de captura potencial (2.3 km<sup>2</sup>), y aporta el agua suficiente para que en un año el flujo de agua subterránea llegue al manantial. El caudal medido es de 35 l/seg que incluye el caudal asignado para uso urbano.

El relieve puede ser un factor que determine el tránsito lento del flujo del agua subterránea. La ZP II está ocupada principalmente por cultivos, que ocupan el 68.14%; mientras que el pastizal representa una menor parte, en 12.9%. Ésta área a diferencia del resto, es más susceptible a la contaminación del agua, por lo que debe ser atendida en el sentido de medidas de protección (Figura 4.43).

La ZP III que ocupa la mayor cantidad de superficie del área de captura, es ocupada de igual manera por uso agrícola, lo que resalta también la posibilidad de implementar medidas de protección para el manantial, a pesar de que en las zonas altas hay bosques.

Finalmente, es importante resaltar que los límites definidos para las zonas de protección I, II y III pueden variar, ya que la dinámica del balance de agua anual influirá en la delimitación de éstas, lo que las hace de igual manera dinámicas en espacio y tiempo.

Es importante señalar que hay algunos manantiales que se localizan dentro de las zonas de captura potencial, pero sus caudales son pequeños, por lo que hidráulicamente tienen poca influencia.

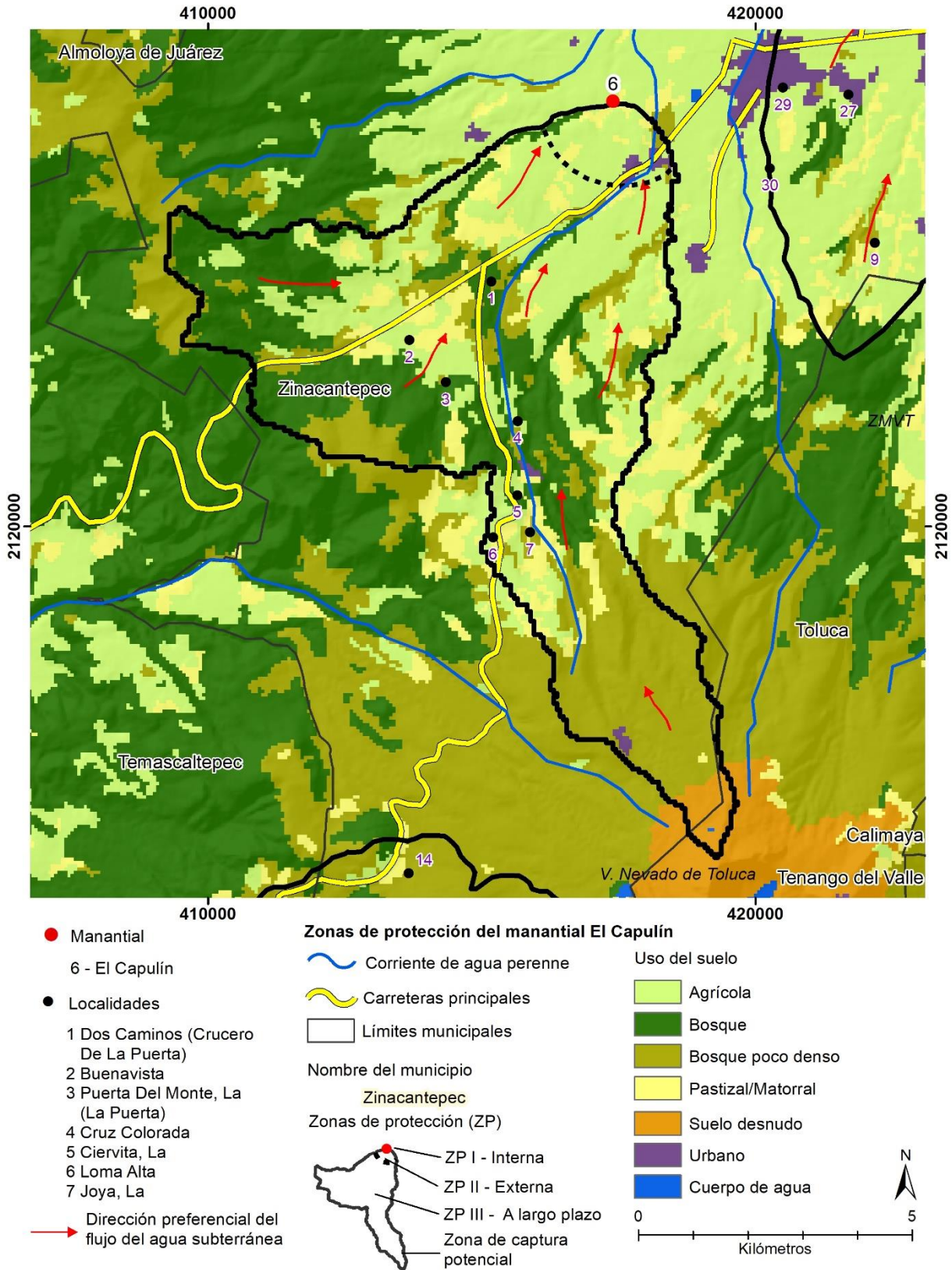


Figura 4.43. Zona de captura potencial para el manantial El Capulín, Zinacantepec.

#### 4.6. Proyección de escenarios futuros en la delimitación de las zonas de protección

Con la finalidad de hacer un diagnóstico de la posible variabilidad futura en las estrategias de protección de los manantiales se realizó la proyección de futuros escenarios que contemplaron tanto variables físicas, climáticas y sociales.

##### 4.6.1. Proyección de escenarios de cambio del uso del suelo

Los resultados fueron obtenidos secuencialmente de acuerdo con cada una de las tareas realizadas y la metodología propuesta. Primero se hizo un análisis del cambio del uso del suelo de la zona de estudio y posteriormente de las zonas de captura potencial.

##### 4.6.1.1. Análisis de cambios de los usos del suelo en la entidad

Se analizaron los mapas de cambio del uso de suelo entre los años 1986 y 2016 (Figura 4.44 y Figura 4.27 - escurrimiento superficial) para posteriormente hacer su proyección al año 2030 y 2050.

##### a) Cambios del uso del suelo

En la Tabla 4.30 se puede observar los porcentajes de superficie por cada uso de suelo para los dos periodos comparados. El uso agrícola urbano tuvo los mayores cambios. El uso agrícola disminuyó notablemente en superficie, pasó de 50.7% a 41% del total la superficie; mientras que el uso urbano aumentó, pasando de 3% a 8.4% de ocupación del suelo del total de la entidad.

Tabla 4.30. Área ocupada por uso del suelo para el año 1986 y 2016 en la entidad.

| No. | Uso del suelo     | 1986            |      | 2016            |      |
|-----|-------------------|-----------------|------|-----------------|------|
|     |                   | Km <sup>2</sup> | %    | Km <sup>2</sup> | %    |
| 1   | Agrícola          | 6123.8          | 50.7 | 4957.1          | 41.0 |
| 2   | Pastizal/Matorral | 1390.0          | 11.5 | 1985.0          | 16.4 |
| 3   | Bosque            | 2913.4          | 24.1 | 3543.3          | 29.3 |
| 4   | Bosque poco denso | 860.1           | 7.1  | 430.0           | 3.6  |
| 5   | Urbano            | 364.8           | 3.0  | 1015.8          | 8.4  |
| 6   | Agua              | 90.3            | 0.7  | 142.3           | 1.2  |
| 7   | Suelo desnudo     | 346.5           | 2.9  | 15.5            | 0.1  |
|     |                   |                 | 100  |                 | 100  |

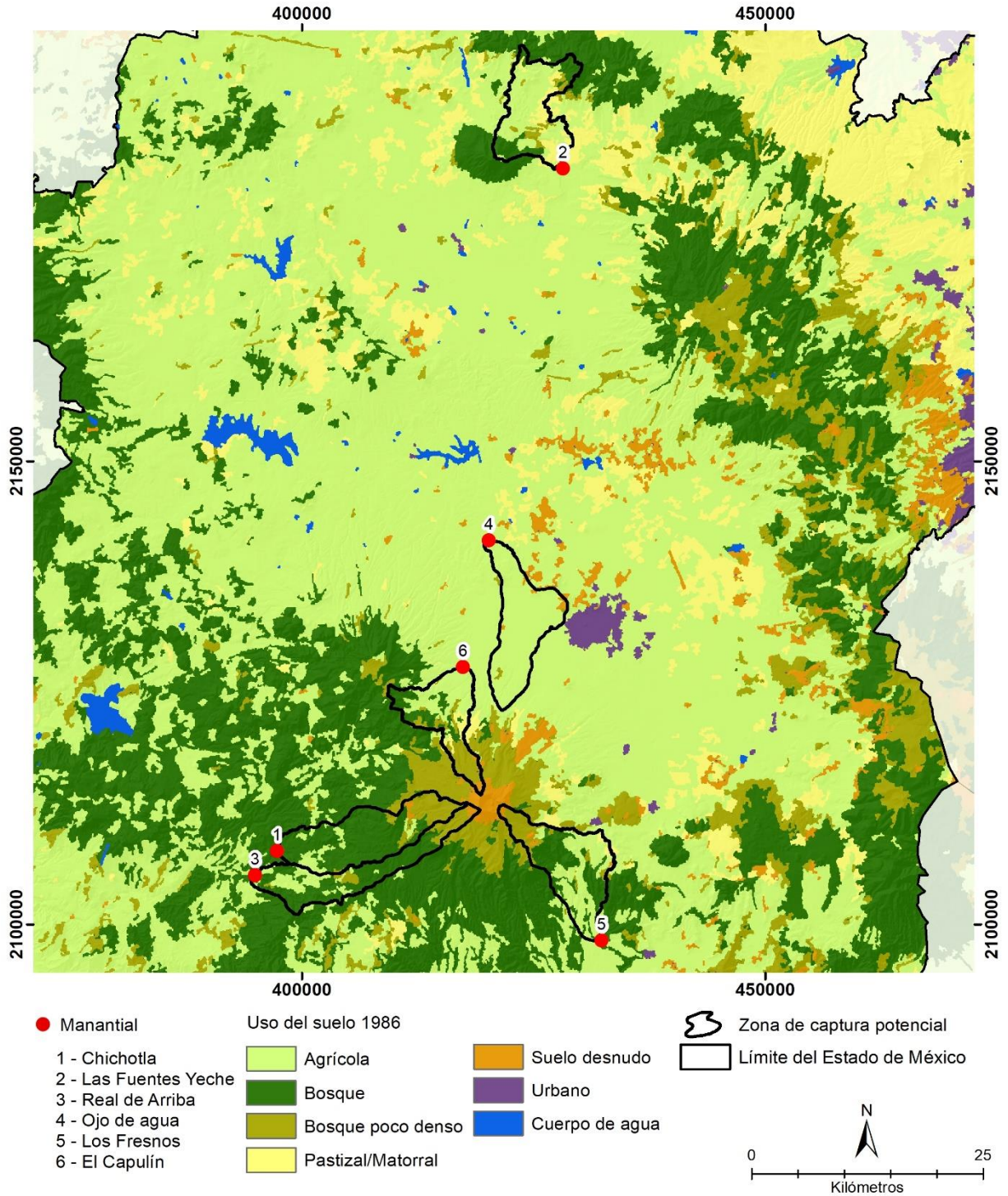


Figura 4.44. Mapa del uso de suelo para el año 1986 y zonas de captura potencial.

Se obtuvieron los cambios del uso del suelo a partir de: a) ganancias y pérdidas por categoría, b) cambios netos por categoría y c) persistencia o contribución al cambio neto experimentado de la transición de una categoría específica.

### a) Ganancias y pérdidas por categoría

Se identificaron los usos del suelo que presentaron los mayores cambios. Se demostró que en general los usos de suelo ganaron más área de la que perdieron. En la Tabla 4.31 y Figura 4.45 se puede ver la cantidad de área perdida y ganada. Los usos de suelo que sustituyeron a otros y que ganaron más área fueron: uso urbano, bosque y el pastizal/ matorral, reemplazaron a otras categorías; mientras que recíprocamente, los usos que redujeron su superficie más de la que ganaron fueron: suelo desnudo, bosque poco denso y el uso agrícola. El uso agrícola sobre todo fue sustituido por otros usos y disminuyó drásticamente su área, aunque ganó 1,055.9 km<sup>2</sup>, perdió a su vez 2,222.6 km<sup>2</sup>.

Tabla 4.31. Pérdidas y ganancias por categoría de uso de suelo entre 1986 y 2016

| No. | Categoría (uso)   | Pérdidas (km <sup>2</sup> ) | Ganancias (km <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 1   | Agrícola          | -2,222.6                    | 1,055.9                      |
| 2   | Pastizal/Matorral | -780.2                      | 1,375.2                      |
| 3   | Bosque            | -443.9                      | 1,073.8                      |
| 4   | Bosque poco denso | -619.0                      | 188.8                        |
| 5   | Urbano            | -58.6                       | 709.6                        |
| 6   | Agua              | -11.8                       | 63.8                         |
| 7   | Suelo desnudo     | -332.3                      | 1.2                          |

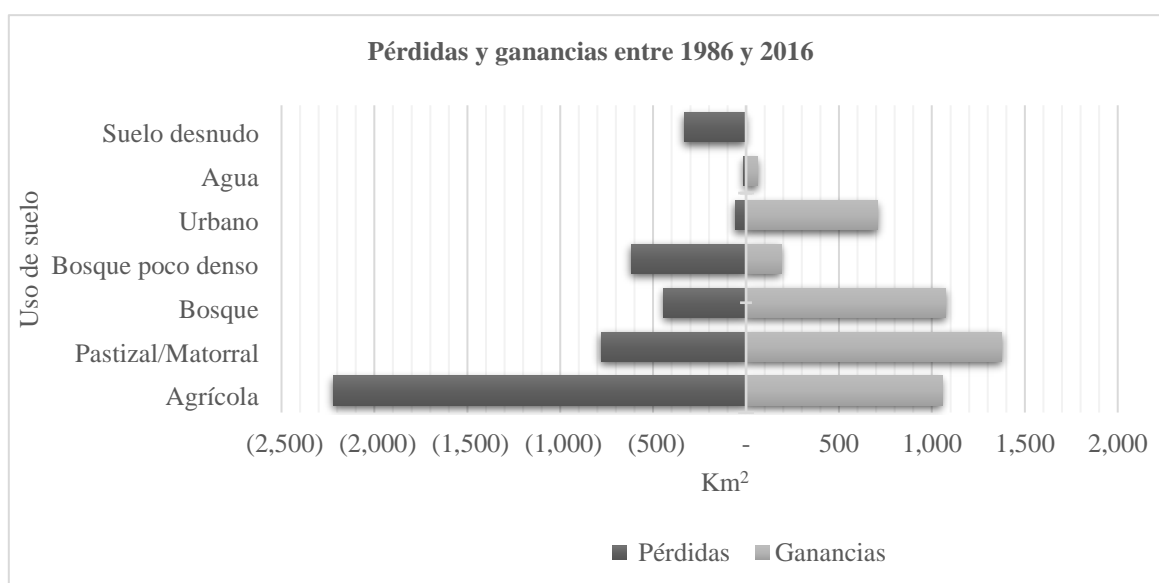


Figura 4.45. Gráfica de pérdidas y ganancias por categoría de uso de suelo entre 1986 y 2016.

### b) Cambios netos por categoría

La Tabla 4.32 muestran más claramente los cambios de la superficie de un periodo a otro, cuánto cambio tuvo en total cada uso y ver si perdió más de lo que ganó o viceversa. El uso urbano, el bosque y el pastizal/ matorral ganaron aproximadamente 600 km<sup>2</sup> cada uno; fue el uso urbano el que más área ganó, mientras que el suelo desnudo, bosque poco denso y el uso agrícola, por ejemplo, perdieron más superficie: 331 km<sup>2</sup> y casi 1,166 km<sup>2</sup> respectivamente (Tabla 4.32 y Figura 4.46).

Tabla 4.32. Cambio neto por categoría entre 1986 y 2016.

| No. | Categoría (uso)   | Cambios Netos (km <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------------|----------------------------------|
| 1   | Agrícola          | -1,166.7                         |
| 2   | Pastizal/Matorral | 595.0                            |
| 3   | Bosque            | 629.9                            |
| 4   | Bosque poco denso | -430.1                           |
| 5   | Urbano            | 651.0                            |
| 6   | Agua              | 519.8                            |
| 7   | Suelo desnudo     | -331.0                           |

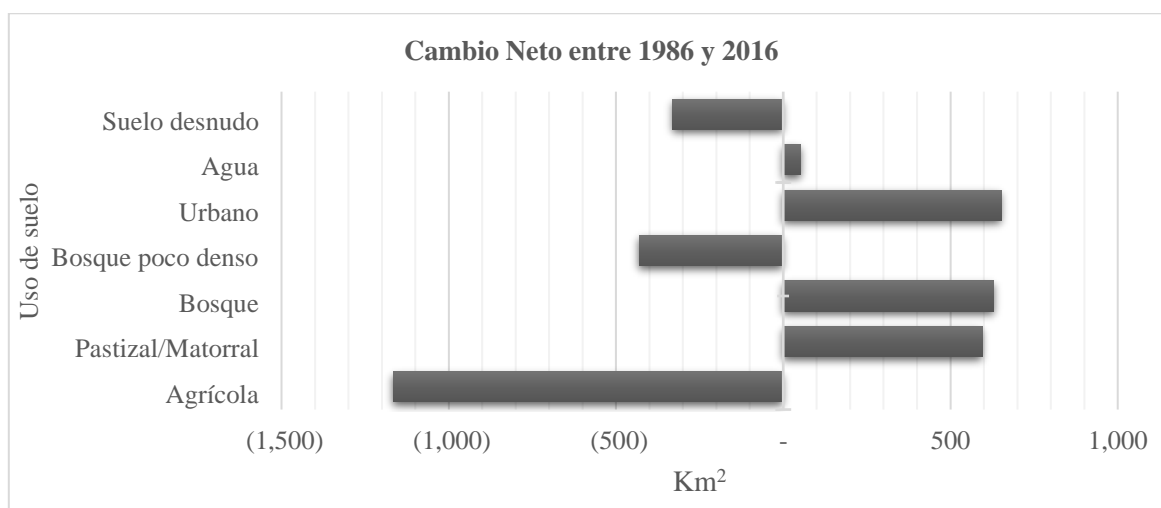


Figura 4.46. Gráfica del cambio neto por categoría entre 1986 y 2016.

### c) Contribuciones al cambio neto por categoría

En esta etapa se estimaron las contribuciones que una categoría tuvo por parte de otra. El uso urbano, el bosque y el pastizal/ matorral fueron las categorías que presentaron las principales ganancias de área, por lo tanto, tuvieron las mayores contribuciones al cambio neto.

Las contribuciones más notorias al cambio neto para el uso de suelo urbano fueron dadas por: el suelo desnudo, el pastizal/matorral y el suelo agrícola. Sobre todo, en el uso agrícola más de 525 km<sup>2</sup> de cultivos contribuyeron al cambio de suelo urbano, o sea, dicha cantidad de hectáreas de cultivo pasaron a ser urbanas (Tabla 4.33 y Figura 4.47).

Tabla 4.33. Contribuciones al cambio neto en el uso de suelo urbano

| No. | Categoría (uso)   | Contribuciones al Cambio Neto en Urbano (km <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------------|--|
| 1   | Agrícola          | 525.7  |
| 2   | Pastizal/Matorral | 54.9   |
| 3   | Bosque            | 2.8  |
| 4   | Bosque poco denso | 10.0   |
| 5   | Urbano            | -  |
| 6   | Agua              | 1.1  |
| 7   | Suelo desnudo     | 56.6   |

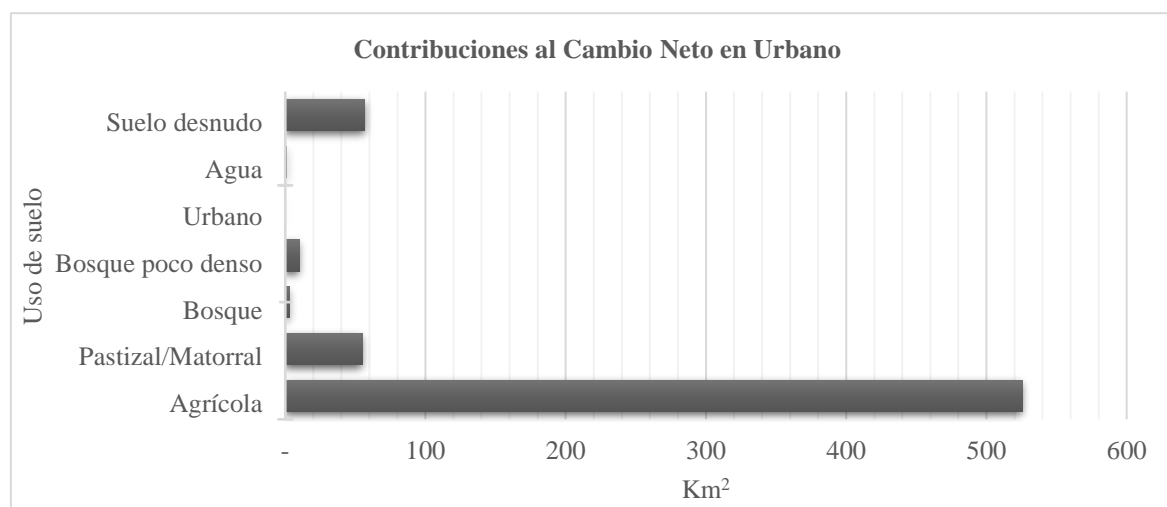


Figura 4.47. Gráfica de contribuciones al cambio neto en el uso de suelo urbano.



Para el uso agrícola se puede observar que las contribuciones fueron negativas (Tabla 4.34 y Figura 4.48). Las demás categorías no contribuyeron a los cultivos, sino al contrario.

Las pérdidas en superficie del uso agrícola fueron dadas sobre todo por el uso urbano (como ya se mencionó en el párrafo anterior) y por el pastizal en aproximadamente 525 km<sup>2</sup> y 645 km<sup>2</sup> respectivamente; mientras que las coberturas que contribuyeron al cambio neto del uso agrícola fueron muy bajas, dadas por el suelo desnudo y bosque poco denso en menos de 100 km<sup>2</sup>.

Tabla 4.34. Contribuciones al cambio neto en el uso de suelo agrícola.

| No. | Categoría (uso)   | Contribuciones al Cambio Neto en Agrícola (km <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------------|--|
| 1   | Agrícola          | -  |
| 2   | Pastizal/Matorral | -645.1   |
| 3   | Bosque            | -80.1  |
| 4   | Bosque poco denso | 37.9   |
| 5   | Urbano            | -525.7   |
| 6   | Agua              | -35.5  |
| 7   | Suelo desnudo     | 81.6   |

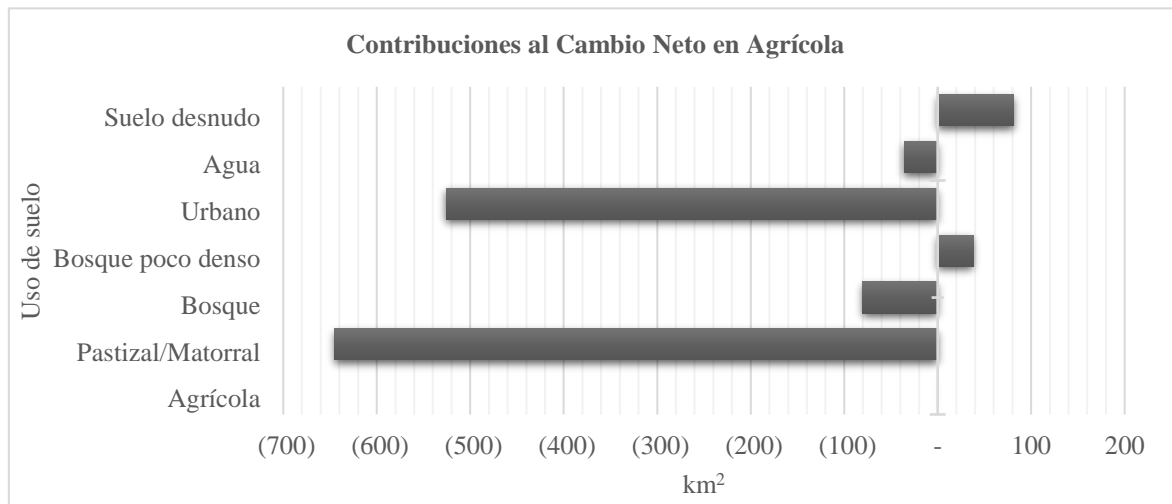


Figura 4.48. Gráfica de contribuciones al cambio neto en el uso de suelo agrícola

Por su parte, las coberturas que contribuyeron al cambio neto del pastizal/matorral fueron el suelo desnudo, el bosque poco denso y sobre todo el agrícola en aproximadamente en 93 km<sup>2</sup>, 51 km<sup>2</sup> y 655 km<sup>2</sup> respectivamente.

Mientras que las pérdidas en superficie fueron mínimas, dadas por la cobertura urbana y de bosque, en aproximadamente 54 km<sup>2</sup> y 131 km<sup>2</sup> hectáreas respectivamente (los números negativos representan lo que no contribuyó a la transición de dicho uso, sino al contrario) (Tabla 4.35 Figura 4.49)

Tabla 4.35. Contribuciones al cambio neto en el uso desuelo de pastizal

| No. | Categoría (uso)   | Contribuciones al Cambio Neto en Pastizal/Matorral (km <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------------|---|
| 1   | Agrícola          | 645.1   |
| 2   | Pastizal/Matorral | -   |
| 3   | Bosque denso      | -131.3  |
| 4   | Bosque poco denso | 51.8  |
| 5   | Urbano            | -54.9   |
| 6   | Agua              | -9.3  |
| 7   | Suelo desnudo     | 93.6  |

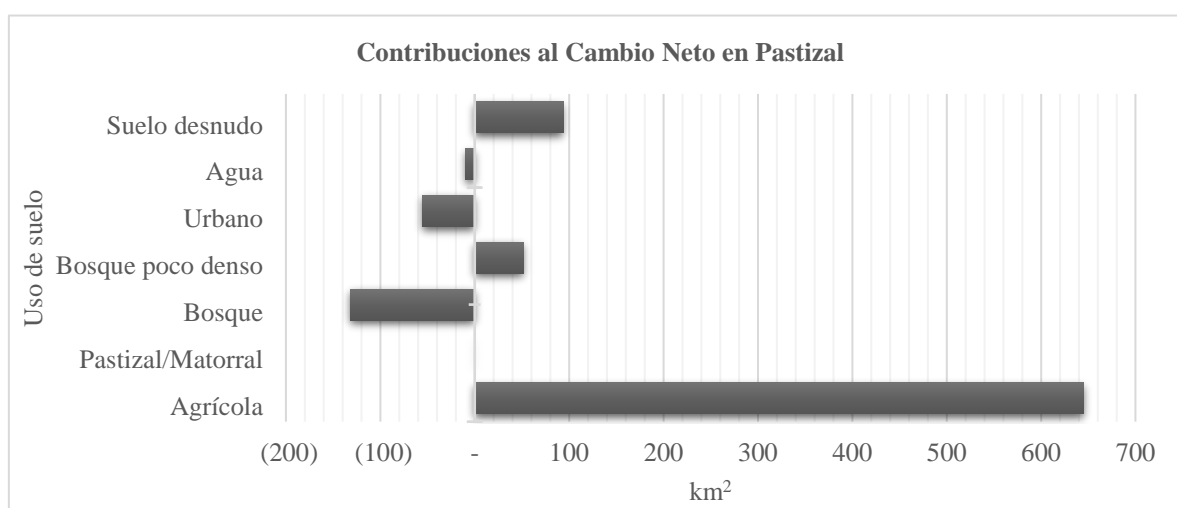


Figura 4.49. Gráfica de contribuciones al cambio neto en el uso de suelo de pastizal.

Finalmente, otra de las categorías que tuvo un cambio considerable fue el bosque. La categoría que contribuyó sobre todo al cambio neto de la cobertura boscosa fue el bosque poco denso en aproximadamente 366 km<sup>2</sup>. Esto se debe posiblemente a zonas reforestadas (Tabla 4.36 y Figura 4.50).

Tabla 4.36. Contribuciones al cambio neto en el uso de suelo de bosque

| No. | Categoría (uso)   | Contribuciones al Cambio Neto en Bosque (km <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------------|--|
| 1   | Agrícola          | 80.1   |
| 2   | Pastizal/Matorral | 131.3  |
| 3   | Bosque            | -  |
| 4   | Bosque poco denso | 366.5  |
| 5   | Urbano            | -2.8   |
| 6   | Agua              | -0.7   |
| 7   | Suelo desnudo     | 55.5   |

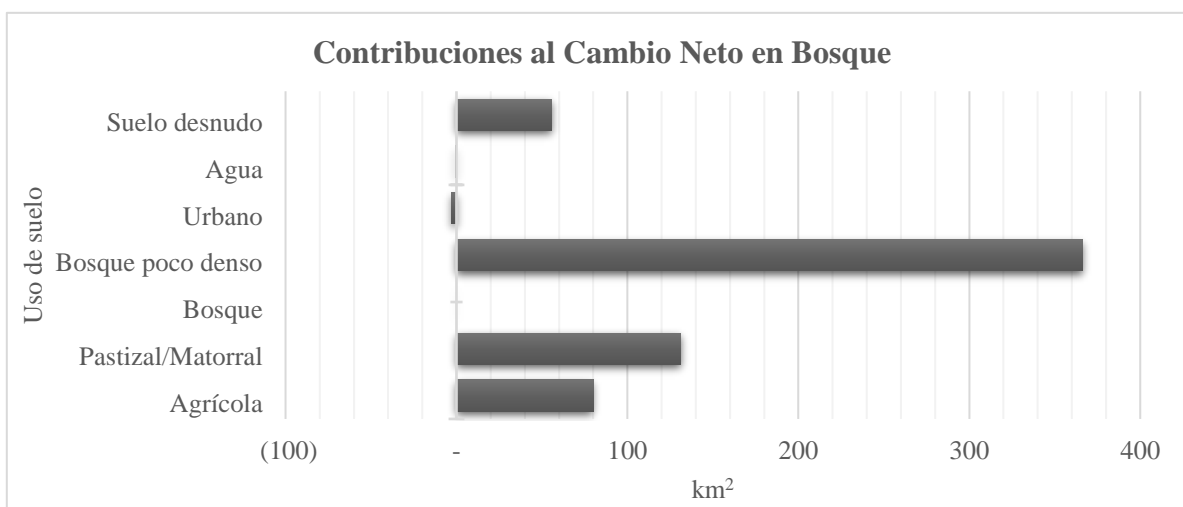


Figura 4.50. Gráfica de contribuciones al cambio neto en el uso de suelo de bosque.

Es importante mencionar que la clasificación de los usos del suelo de 1986 puede crear incertidumbre en algunos casos, como fue para el uso urbano y agrícola de la zona sur de la entidad, donde se localiza la zona de captura de Los Fresnos. La calidad de las imágenes LANDSAT de ese año no permitió hacer una distinción entre la reflectancia del uso urbano y agrícola. La razón es debido a que existen zonas de agrícolas bajo la técnica de invernaderos que, al ser tapadas, éstas muestran una reflectancia similar a la de las casas que conforman el uso urbano, y por lo tanto, el resultado de la imagen no da una distinción entre ambas.

#### 4.6.1.2. Modelación del potencial de transición de las coberturas

Se identificó el potencial de la transición de la superficie. Las transiciones consideradas fueron cuatro: agrícola a pastizal/matorral, agrícola a urbano, agrícola a bosque, pastizal/matorral a urbano.

Estas transiciones fueron agrupadas en un submodelo y se tomaron en cuenta debido a que en general la transición del uso agrícola tuvo mayor cambio en superficie. Las transiciones mayores a 10 km<sup>2</sup> se muestran en la Tabla 4.37.

Para la prueba y selección de variables de sitio y explicativas con el test Cramer's V, se hizo una selección y correlación de variables que tuvieran cierta incidencia en la predicción del cambio del uso de suelo (Tabla 4.38).

Tabla 4.37. Transiciones de los cambios de uso del suelo

| Transición                            | Área km <sup>2</sup> | Porcentaje % |
|---------------------------------------|----------------------|--------------|
| Agrícola a Pastizal/Matorral          | 1148.4               | 25.7         |
| Agrícola a Urbano                     | 546.5                | 12.2         |
| Pastizal/Matorral a Agrícola          | 503.3                | 11.3         |
| Bosque poco denso a Bosque denso      | 433.3                | 9.7          |
| Agrícola a Bosque denso               | 416.6                | 9.3          |
| Bosque a Agrícola                     | 336.6                | 7.5          |
| Pastizal/Matorral a Bosque denso      | 164.6                | 3.7          |
| Bosque poco denso a Agrícola          | 109.3                | 2.4          |
| Suelo desnudo a Pastizal/Matorral     | 93.6                 | 2.1          |
| Pastizal/Matorral a Urbano            | 87.4                 | 2.0          |
| Suelo desnudo a Agrícola              | 82.3                 | 1.8          |
| Agrícola a Bosque poco denso          | 71.4                 | 1.6          |
| Bosque a Bosque poco denso            | 66.8                 | 1.5          |
| Bosque poco denso a Pastizal/Matorral | 63.9                 | 1.4          |
| Suelo desnudo a Urbano                | 56.6                 | 1.3          |
| Suelo desnudo a Bosque denso          | 55.8                 | 1.2          |
| Agrícola a Agua                       | 39.1                 | 0.9          |
| Suelo desnudo a Bosque poco denso     | 37.0                 | 0.8          |
| Bosque a Pastizal/Matorral            | 33.3                 | 0.7          |
| Urbano a Pastizal/Matorral            | 32.5                 | 0.7          |
| Urbano a Agrícola                     | 20.8                 | 0.5          |
| Pastizal/Matorral a Agua              | 12.8                 | 0.3          |
| Pastizal/Matorral a Bosque poco denso | 12.2                 | 0.3          |
| Bosque poco denso a Urbano            | 11.1                 | 0.2          |
| Otras                                 | 33.2                 | 0.7          |

Tabla 4.38. Variables explicativas seleccionadas en la predicción del cambio del uso de suelo

|   | Variable  | Valor Cramer's V del conjunto | Valor de P |
|---|---|-------------------------------|------------|
| 1 | MDE   | 0.4946                        | 0          |
| 2 | Pendiente en grados                                   | 0.2311                        | 0          |
| 3 | Precipitación anual                                   | 0.3394                        | 0          |
| 4 | Temperatura promedio anual                            | 0.4945                        | 0          |
| 5 | Distancia a cuerpos de agua                           | 0.2327                        | 0          |
| 6 | Distancia a zona urbana                               | 0.3046                        | 0          |
| 7 | Probabilidad de evidencia del suelo urbano            | 0.3148                        | 0          |
| 8 | NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) | 0.4891                        | 0          |

De las variables evaluadas 8 fueron seleccionadas: la pendiente, la elevación del terreno (MDE), la distancia a cuerpos de agua, la temperatura media anual, la precipitación anual, el NDVI, la distancia a zonas urbanas, y la probabilidad de evidencia del suelo urbano pues tuvieron una relación explicativa que incidió en la determinación de los cambios del usos del suelo. Las variables tuvieron una V de Cramer mayor a 0.15 y un peso en 0, Las imágenes resultantes se muestran en miniatura en la Figura 4.51 y Figura 4.52.

### **1. MDE**

El MDE representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. La altitud tiene una correlación con otras variables y son interdependientes. Tienen una relación con el cambio altitudinal, la temperatura, precipitación, vegetación que influyen en el cambio de uso del suelo.

En un patrón general, cuanto menor es la altitud, mayor la temperatura y viceversa, y a su vez diferente con los cambios latitudinales, la vegetación se verá influida y también la ocupación del suelo por parte del hombre.

### **2. Pendiente del terreno**

La topografía es uno de los aspectos fundamentales a tomar en cuenta en el proceso de desarrollo urbano, en el cual la pendiente juega un papel fundamental para el desarrollo y la ocupación del suelo.

Entre más inclinado esté el terreno más inaccesible es para el hombre y por consecuencia tendería a ser deshabitado, contrario a aquellas superficies en las que sus pendientes son planas y suaves. Sin embargo, en algunas regiones el crecimiento urbano ocupa cada vez más zonas más inclinadas, la población exponencialmente se están habitando cada vez más aquellas zonas con mayor pendiente.

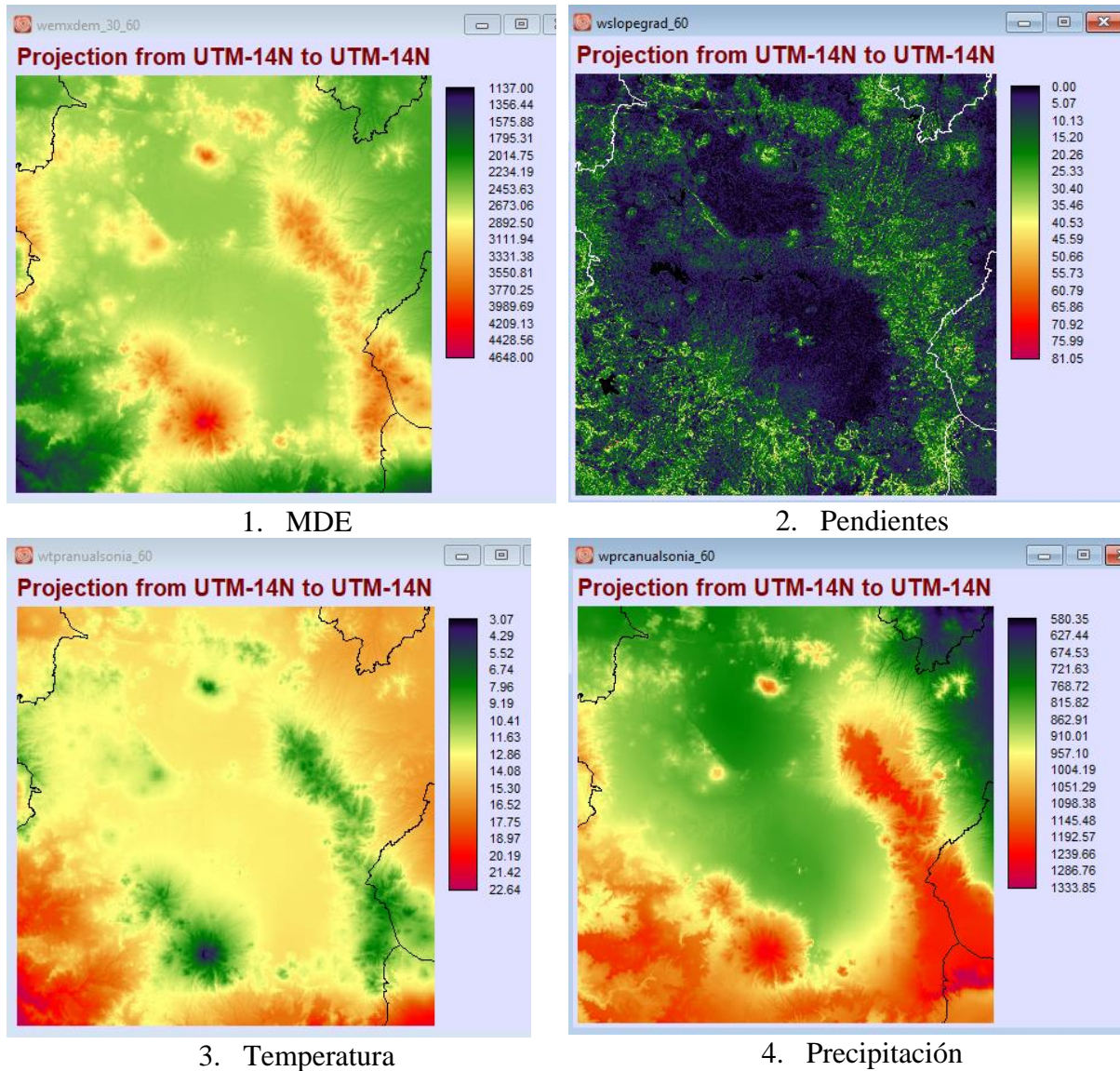


Figura 4.51. Imágenes de MDE, pendiente, temperatura y precipitación anual del área de estudio.

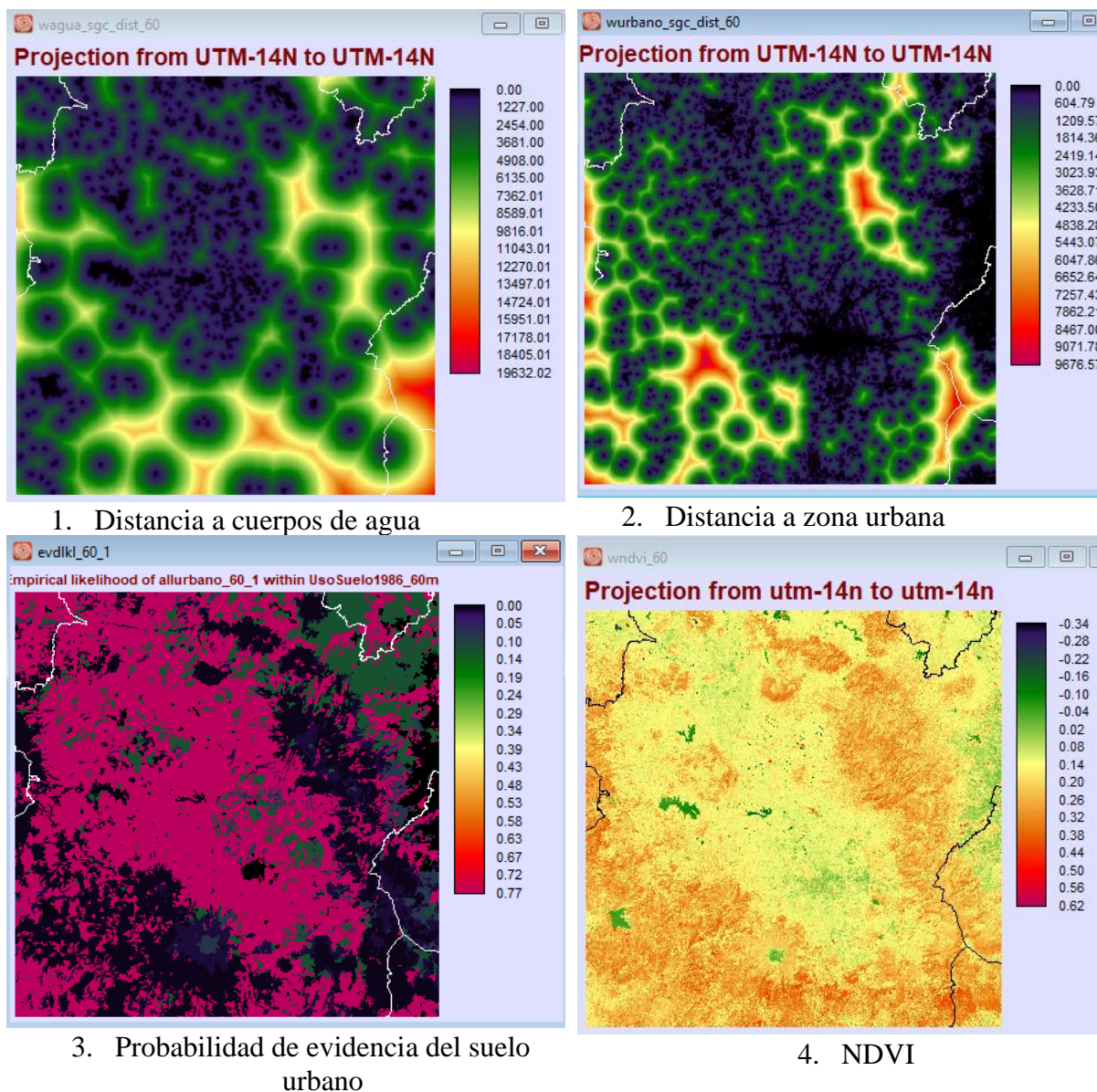


Figura 4.52. Imágenes de la distancia a cuerpos de agua y zonas urbanas, de probabilidad de evidencia y de NDVI del área de estudio.

### 3. *Temperatura y precipitación*

La temperatura y precipitación de la región son variables (además de la humedad, la evaporación, insolación, presión atmosférica y viento) que pueden formar un ambiente apropiado para el desarrollo poblacional.

Las condiciones favorables han permitido que la población se adapte a una región determinada y lleve a cabo actividades socioeconómicas, incluso cuando existen cambios estacionales o condiciones que parecen no ser habitables.

Por el contrario, la temperatura y precipitación extremas, sobre todo, dificultan el desarrollo de asentamientos humanos. Las alteraciones en los patrones de lluvia y temperatura anuales en un futuro pueden afectar las actividades de la población y el consecuente el desarrollo de los núcleos poblacionales, contrariamente a que si permanecieran los mismos patrones meteorológicos que favorecieran el crecimiento demográfico.

#### ***4. Distancia a cuerpos de agua y zonas urbanas***

Se consideró la distancia a cuerpos de agua y zonas urbanas debido a la proximidad que tienen respecto a los posibles cambios del uso del suelo. Los valores altos corresponden a la probabilidad de ocupación del uso del suelo en el futuro.

#### ***5. NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada)***

Se calculó el NDVI para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, con base a la medición de la intensidad de la radiación de dos bandas (IRC-infrarrojo cercano y R-rojo del Landsat 8) del espectro electromagnético que la vegetación emite. Son excelentes indicadores del estado del cultivo.

Los valores resultantes cercanos a 1 correspondieron a una vegetación más vigorosa, contrariamente a lo que sucedió con los valores menores. El NDVI indica qué zonas son más posibles al cambio de uso de suelo.

Con las variables seleccionadas se ejecutó el submodelo de transición mediante la Red Neuronal Perceptrón Multicapa (MLP), la cual obtuvo una tasa de precisión de 80.59%, valor que se considera aceptable, lo que favorece los resultados del análisis (Figura 4.53).

Por lo tanto, se hace necesario emplear este tipo de información del uso del suelo tomando en consideración la relación existente entre los manantiales y el grado de afectación que ciertas actividades antrópicas pueden ejercer sobre las fuentes de agua subterránea.



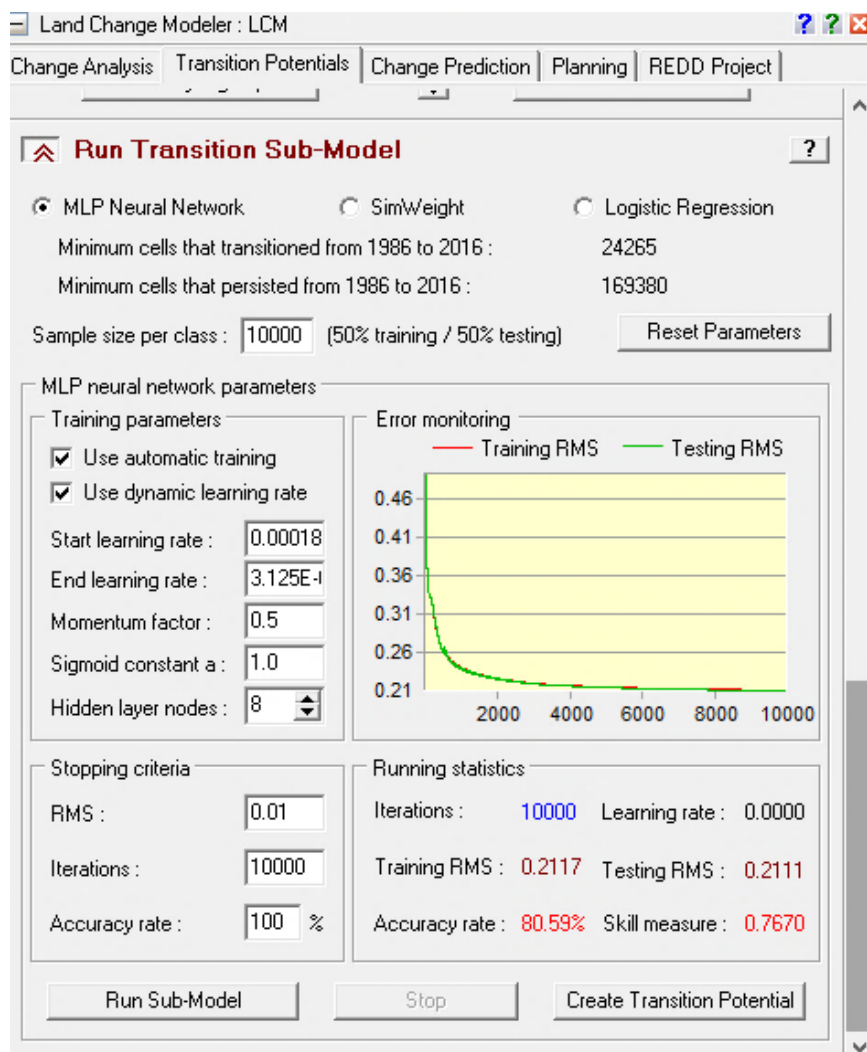


Figura 4.53. Proceso y tasa de Precisión de la Red Neuronal Perceptrón Multicapa (MLP).

#### 4.6.1.3. Predicción de los cambios de uso del suelo

Finalmente, para la etapa de predicción de cambios se determinó la cantidad de cambios del uso del suelo que ocurrirá para futuros años a partir del análisis de los cambios ocurridos entre los años 1986 y 2016.

Los resultados mostraron los futuros escenarios para los años 2030 y 2050. Ambos periodos muestran los posibles cambios de uso de suelo que puede haber a corto y mediano plazo (Tabla 4.39).

Tabla 4.39. Área ocupada por uso del suelo en la entidad para el año 1986, 2016 y para escenarios al año 2030 y 2050.

| No. | Uso del suelo     | 1986            |      | 2016            |      | 2030            |      | 2050            |      |
|-----|-------------------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
|     |                   | Km <sup>2</sup> | %    | Km <sup>2</sup> | %    | Km <sup>2</sup> | %    | Km <sup>2</sup> | %    |
| 1   | Agrícola          | 6123.8          | 50.7 | 4957.1          | 41.0 | 3762.6          | 31.1 | 2970.1          | 24.6 |
| 2   | Pastizal/Matorral | 1390.0          | 11.5 | 1985.0          | 16.4 | 2779.2          | 23.0 | 3066.9          | 25.4 |
| 3   | Bosque            | 2913.4          | 24.1 | 3543.3          | 29.3 | 3687.0          | 30.5 | 3933.9          | 32.5 |
| 4   | Bosque poco denso | 860.1           | 7.1  | 430.0           | 3.6  | 430.0           | 3.6  | 430.0           | 3.6  |
| 5   | Urbano            | 364.8           | 3.0  | 1015.8          | 8.4  | 1274.6          | 10.5 | 1532.9          | 12.7 |
| 6   | Agua              | 90.3            | 0.7  | 142.3           | 1.2  | 142.3           | 1.2  | 142.3           | 1.2  |
| 7   | Suelo desnudo     | 346.5           | 2.9  | 15.5            | 0.1  | 13.2            | 0.1  | 12.9            | 0.1  |
|     |                   |                 | 100  |                 | 100  |                 | 100  |                 | 100  |

En general, en las proyecciones de los posibles escenarios se puede notar una diferencia de cambio de los usos del suelo, sobre todo del uso agrícola, urbano y pastizal/matorral. Se nota una pérdida de superficie para el uso agrícola, del 41% de su área existente para el año 2016, ésta se redujo a 31% en 2030 y después a 24% en los escenarios proyectados a 2050.

Sin embargo, algunos usos del suelo tuvieron ganancias de área, como fueron el pastizal/matorral y el uso urbano. Se prevé que la extensión superficial del pastizal/matorral sea mayor para los años proyectados, aumentando de 16.4% a 25.4% en 2050. La ganancia de superficie de pastizal está correlacionada con la pérdida de las zonas agrícolas, ya que extensas áreas que eran cultivadas ya no lo están siendo, debido al cambio de actividades económicas, resultado de la continua transformación y expansión del crecimiento de la población y las zonas urbanas.

Respecto al uso de suelo urbano se observa un cambio gradual en la ocupación de su superficie, pasó a ocupar de 8.4% en 2016 a 12.7% 2050, a pesar de que de 1986 a 2016 casi se triplicó su área (de 3% a 8.4%). Éstas sustituyeron a muchas de las áreas de cultivos. El resto de las áreas prácticamente no tienen cambios considerables en su extensión superficial.

#### 4.6.1.2. Análisis de cambios de los usos del suelo de las zonas de captura potencial

A partir del análisis de los cambios de los usos del suelo ocurridos entre los años 1986 y 2016 (Figura 4.44 y Figura 4.54), se obtuvieron los mapas de predicción para los años 2030 y 2050 (Figura 4.55 y Figura 4.56).

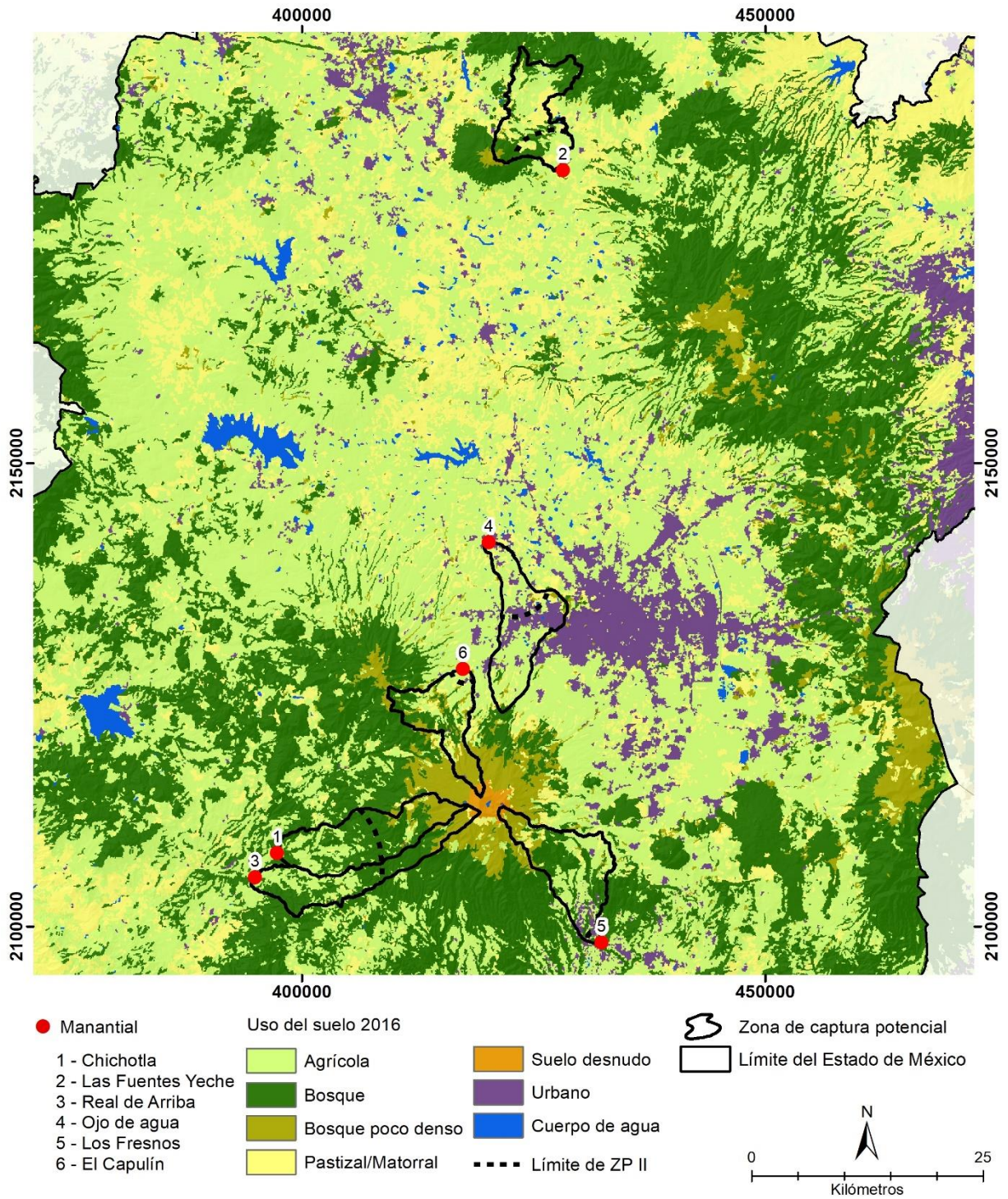


Figura 4.54. Mapa del uso de suelo para el año 2016, zonas de captura potencial y límite de la ZP II.

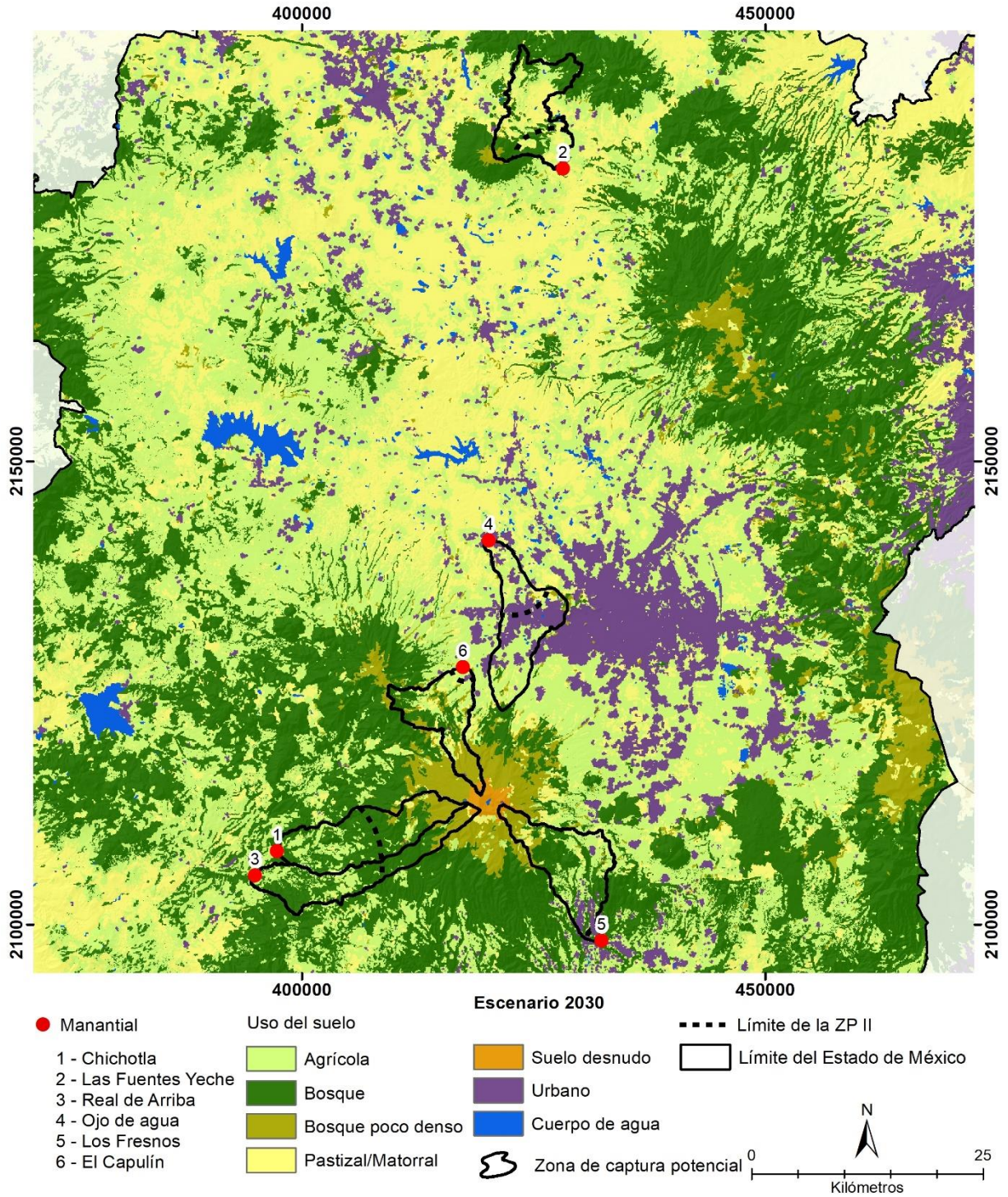


Figura 4.55. Mapa del uso de suelo para el año 2030, zonas de captura potencial y límite de la ZP II.

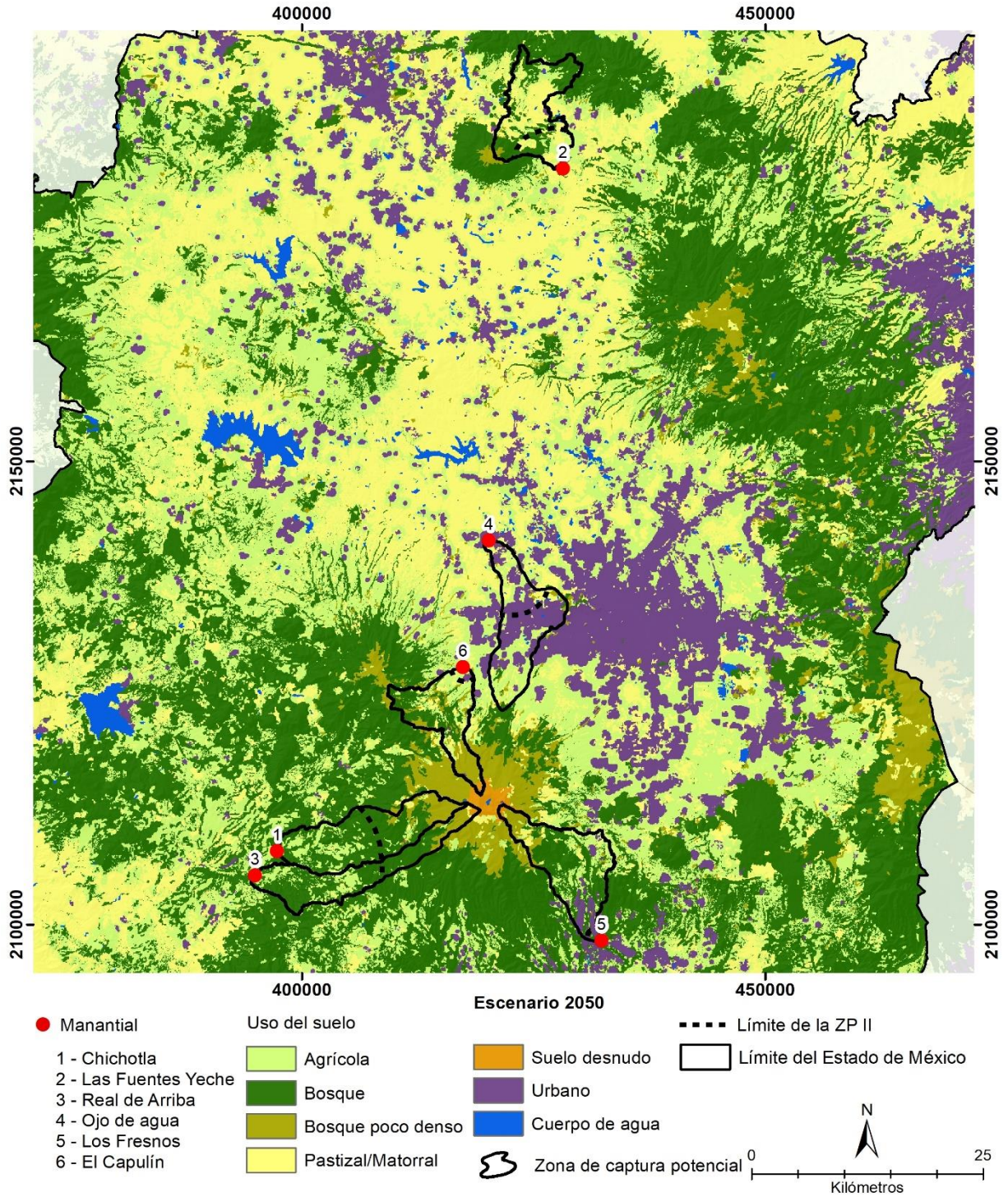


Figura 4.56. Mapa del uso de suelo para el año 2050, zonas de captura potencial y límite de la ZP II.

De los usos del suelo de las seis zonas de captura mostradas para el periodo de 1986 a 2016, se puede notar un cambio notable en dos zonas en particular: la zona de captura del manantial Chichotla y del Ojo de Agua. En el resto de las zonas de captura los cambios fueron menos notables

El caso del manantial Chichotla, los mayores cambios se dieron en el uso de suelo de bosque denso y agrícola. Para 1986, la mayor parte de su superficie era ocupada por bosque denso en un 68.87%, y para 2016 ésta se redujo a 60.85%, mientras que las zonas agrícolas pasaron de ocupar el doble de superficie, de 10.37% a 22.95%. El cambio se dio principalmente debido a que extensas zonas de bosque se ocuparon para ser cultivadas.

Para el caso de la zona de captura potencial del manantial Ojo de Agua, los cambios se dieron sobre todo en los usos agrícola, pastizal y urbano. De 1986 a 2016 se puede notar que el uso de suelo agrícola disminuyó del 95.9% al 54.2 % del total de la zona de captura; el pastizal aumentó de 0.26% a 12.07%; mientras que el uso de suelo urbano cambió drásticamente, de ocupar el 0.02% paso a ocupar el 27.71%. Una parte de la superficie que era ocupada por cultivos dejó de ser cultivada, para ser ocupada por zonas urbanas y por zonas de pastizales y suelo desnudo.

En el resto de las zonas de captura potencial se dieron principales cambios en el uso agrícola y uso urbano. La zona agrícola de Las Fuentes Yeche, Los Fresnos y el Capulín disminuyó, para ser ocupada por otros usos; mientras que en Real de Arriba aumentó (al igual que la zona del manantial Chichotla que está contigua). Por ejemplo, la zona de captura potencial Los Fresnos aumentó notoriamente, pasó a ocupar en 2016 el 6.6 % de la superficie.

En las zonas de captura potencial del manantial Chichotla, Real de Arriba y Las Fuentes Yeche el uso de suelo urbano es prácticamente imperceptible.

Por otro lado, el uso de suelo urbano de las zonas de captura potencial Los Fresnos y El Capulín de los manantiales aumentaron más notoriamente, debido al crecimiento poblacional que se ha generado hasta la actualidad.

En la Tabla 4.40 y la Figura 4.57 se puede observar el área que ocupan los distintos usos de suelo, tanto de los años 1986 y 2016, como de los años proyectado 2030 y 2050.

Tabla 4.40. Cambio de los usos del suelo para el año 1986, 2016 y proyecciones al 2030 y 2050 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM).

| Manantial           | Uso del suelo     | 1986            |       | 2016            |       | 2030            |       | 2050            |       |
|---------------------|-------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|                     |                   | Km <sup>2</sup> | %     | Km <sup>2</sup> | %     | Km <sup>2</sup> | %     | Km <sup>2</sup> | %     |
| 1. Chichotla        | Agrícola          | 9.10            | 10.37 | 20.15           | 22.95 | 15.92           | 18.13 | 10.97           | 12.49 |
|                     | Pastizal/Matorral | 0.22            | 0.25  | 1.74            | 1.98  | 1.92            | 2.18  | 2.13            | 2.42  |
|                     | Bosque denso      | 60.45           | 68.87 | 53.41           | 60.85 | 57.46           | 65.45 | 62.19           | 70.83 |
|                     | Bosque poco denso | 16.79           | 19.13 | 12.38           | 14.11 | 12.38           | 14.10 | 12.38           | 14.10 |
|                     | Urbano            | 0.02            | 0.02  | 0.06            | 0.07  | 0.06            | 0.07  | 0.07            | 0.08  |
|                     | Suelo desnudo     | 1.19            | 1.36  | 0.03            | 0.04  | 0.03            | 0.04  | 0.03            | 0.04  |
| 2. Las Fuentes Yече | Agrícola          | 38.32           | 53.75 | 27.05           | 38.03 | 25.11           | 35.21 | 20.79           | 29.16 |
|                     | Pastizal/Matorral | 12.92           | 18.13 | 16.49           | 23.18 | 17.83           | 25.01 | 20.93           | 29.36 |
|                     | Bosque denso      | 14.55           | 20.42 | 26.25           | 36.90 | 26.74           | 37.50 | 27.82           | 39.02 |
|                     | Bosque poco denso | 5.49            | 7.71  | 1.29            | 1.81  | 1.29            | 1.81  | 1.29            | 1.81  |
|                     | Urbano            | 0.00            | 0.00  | 0.06            | 0.08  | 0.17            | 0.24  | 0.30            | 0.42  |
|                     | Agua              | 0.00            | 0.00  | 0.00            | 0.00  | 0.15            | 0.22  | 0.15            | 0.22  |
| 3. Real de Arriba   | Agrícola          | 13.05           | 19.52 | 18.67           | 27.93 | 14.68           | 21.97 | 9.53            | 14.27 |
|                     | Pastizal/Matorral | 0.29            | 0.43  | 1.56            | 2.34  | 1.59            | 2.38  | 1.62            | 2.43  |
|                     | Bosque denso      | 42.15           | 63.06 | 39.34           | 58.86 | 43.30           | 64.82 | 48.42           | 72.48 |
|                     | Bosque poco denso | 9.98            | 14.93 | 6.43            | 9.63  | 6.43            | 9.63  | 6.43            | 9.63  |
|                     | Urbano            | 0.00            | 0.00  | 0.02            | 0.03  | 0.02            | 0.03  | 0.02            | 0.03  |
|                     | Suelo desnudo     | 1.37            | 2.05  | 0.82            | 1.22  | 0.82            | 1.22  | 0.82            | 1.22  |
| 4. Ojo de Agua      | Agrícola          | 73.05           | 95.94 | 41.29           | 54.23 | 29.58           | 38.87 | 20.78           | 27.31 |
|                     | Pastizal/Matorral | 0.20            | 0.26  | 9.19            | 12.07 | 9.86            | 12.96 | 11.76           | 15.45 |
|                     | Bosque denso      | 0.03            | 0.03  | 1.57            | 2.06  | 1.57            | 2.06  | 1.59            | 2.09  |
|                     | Bosque poco denso | 0.86            | 1.13  | 2.37            | 3.11  | 2.37            | 3.11  | 2.37            | 3.11  |
|                     | Urbano            | 0.01            | 0.02  | 21.10           | 27.71 | 32.14           | 42.23 | 39.02           | 51.27 |
|                     | Agua              | 0.00            | 0.00  | 0.62            | 0.81  | 0.62            | 0.81  | 0.62            | 0.81  |
| 5. Los Fresnos      | Suelo desnudo     | 1.99            | 2.61  | 0.00            | 0.00  | 0.01            | 0.01  | 0.01            | 0.01  |
|                     | Agrícola          | 31.80           | 41.11 | 28.38           | 36.69 | 23.68           | 30.64 | 18.63           | 24.10 |
|                     | Pastizal/Matorral | 2.27            | 2.94  | 4.19            | 5.42  | 4.23            | 5.47  | 4.37            | 5.65  |
|                     | Bosque denso      | 28.46           | 36.80 | 30.48           | 39.42 | 33.06           | 42.77 | 36.30           | 46.96 |
|                     | Bosque poco denso | 12.54           | 16.22 | 8.14            | 10.53 | 8.14            | 10.53 | 8.14            | 10.53 |
|                     | Urbano            | 0.00            | 0.00  | 5.12            | 6.61  | 7.80            | 10.09 | 9.56            | 12.37 |
|                     | Agua              | 0.01            | 0.01  | 0.00            | 0.00  | 0.00            | 0.00  | 0.00            | 0.00  |
| 6. El Capulín       | Suelo desnudo     | 2.26            | 2.92  | 1.03            | 1.33  | 0.42            | 0.54  | 0.33            | 0.43  |
|                     | Agrícola          | 23.67           | 41.04 | 17.53           | 30.39 | 16.87           | 29.24 | 15.84           | 27.46 |
|                     | Pastizal/Matorral | 4.06            | 7.03  | 6.48            | 11.23 | 6.48            | 11.23 | 6.48            | 11.23 |
|                     | Bosque denso      | 14.13           | 24.49 | 16.53           | 28.65 | 16.74           | 29.02 | 17.40           | 30.15 |
|                     | Bosque poco denso | 14.23           | 24.66 | 15.66           | 27.15 | 15.66           | 27.14 | 15.66           | 27.14 |
|                     | Urbano            | 0.03            | 0.06  | 0.45            | 0.79  | 0.89            | 1.55  | 1.27            | 2.20  |
|                     | Agua              | 0.00            | 0.00  | 0.01            | 0.01  | 0.01            | 0.01  | 0.01            | 0.01  |
| Suelo desnudo       | 1.57              | 2.72            | 1.03  | 1.78            | 1.03  | 1.78            | 1.03  | 1.78            |       |

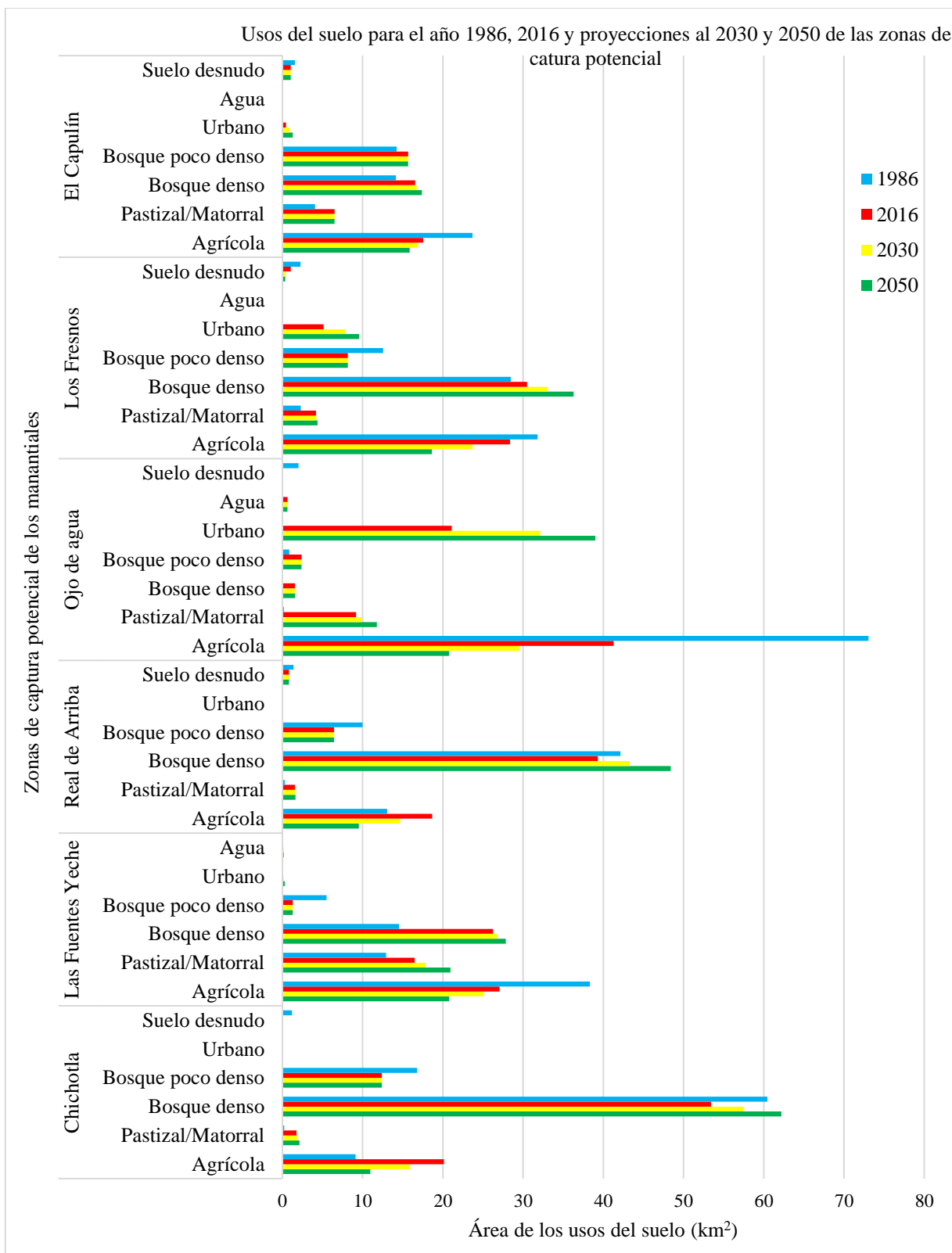


Figura 4.57. Gráfica de usos del suelo para el año 1986, 2016 y proyectados a 2030 y 2050 de las zonas de captura potencial



Los cambios de los usos del suelo no son lineales, pero siguen una tendencia general con base a las variables explicativas antes expuestas, y siguen más o menos los mismos patrones de cambio generados desde 1986 hasta la actualidad, aunque hay sus excepciones.

De los resultados obtenidos, se pueden destacar que la zona de captura potencial del manantial Chichotla y del Ojo de Agua han tenido y tendrán los mayores cambios a futuro, sobre todo en las zonas agrícolas y urbanas.

La superficie de cultivos de la zona de captura del manantial Chichotla era de 10.3% en 1986, y pese a que este uso aumentó a 22.9% para 2016, para los años proyectados se predice que disminuirán a 12.5%.

En el caso de la zona de captura del manantial Ojo de Agua, para 1986 ésta era ocupada prácticamente en su totalidad por zonas agrícolas, en un 95%. La superficie ocupada por este uso decreció en 2016 a 54% y se proyecta que para 2050 disminuirá aún más al 27%. El decremento de este uso tiene una correlación con el incremento de los pastizales y zonas urbanas, que se predice ocuparán el 15% y el 51% respectivamente de la zona de captura del manantial.

En general, el uso de suelo agrícola de las zonas de captura potencial tenderá a decrecer para los años proyectados, pese a que en el año 2016 algunas incrementaron su superficie cultivada (Chichotla y Real de Arriba).

Respecto al uso urbano, en todas las zonas de captura potencial incrementará la mancha urbana. El caso más relevante es el Ojo de Agua en 51%; sin embargo, también en Los Fresnos se ve una tendencia de incremento gradual.

Tras los resultados del análisis de cambios, se pudo observar que la cobertura que sufrió más cambios fue la agrícola, que transitó sobre todo al uso urbano y a pastizal/matorral.

Los cambios en los usos del suelo se darán posiblemente a consecuencia de las actividades económicas de la población dentro del sistema de desarrollo de las ciudades, pues las actividades de producción de alimentos en el campo se están sustituyendo cada vez más por actividades del sector industrial y económico terciario.

Por otro lado, además de existir cambios proyectados de los usos del suelo también pueden existir cambios en los límites definidos para las zonas de protección de manantiales, ya que van en función del tiempo de llegada de agua al manantial. Por esta razón las zonas de protección II y III variarán conforme a la dinámica del balance de agua anual, lo que hará que límites establecidos de igual manera sean dinámicos espacial y temporalmente hablando. La ZI no tendrá variaciones notables, debido a que en algunos casos sus límites perimetrales ya están establecidos

De los casos estudiados, las ZP II que resultan ser más afectadas son la del manantial Ojo de Agua y El Capulín. En el primero caso, la ZP II es ocupada en un 56.8% por el uso agrícola, mientras que, para el segundo, es ocupada en un 68.1% (Tabla 4.41). Estas ZP II deben ser consideradas como prioritarias, debido a las posibles fuentes de contaminación que pueden afectar la calidad del agua, donde también se puede ver afectado su caudal a largo plazo, debido al cambio en las condiciones naturales de las zonas de aportación de los manantiales.

Los cambios de uso del suelo a través del tiempo aunados a la dinámica espacio temporal de las zonas de protección, son factores determinantes para la implementación de medidas a corto y mediano plazo con la finalidad de establecer medidas para prevenir daños ambientales y sociales, y preservar los recursos hídricos subterráneos.

Tabla 4.41. Extensión superficial de los usos del suelo en las ZP II para el año 2016 de las zonas.

| Manantial           | Zona de captura km <sup>2</sup> | ZP II km <sup>2</sup> | % ZP II | Uso del suelo     | ZP II km <sup>2</sup> | %     |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------|---------|-------------------|-----------------------|-------|
| 1. Chichotla        | 87.8                            | 45.5                  | 51.7    | Agrícola          | 17.88                 | 38.91 |
|                     |                                 |                       |         | Pastizal/Matorral | 0.64                  | 1.39  |
|                     |                                 |                       |         | Bosque denso      | 27.43                 | 59.69 |
|                     |                                 |                       |         | Urbano            | 0.01                  | 0.22  |
| 2. Las Fuentes Yече | 71.3                            | 16.2                  | 22.7    | Agrícola          | 4.27                  | 25.94 |
|                     |                                 |                       |         | Pastizal/Matorral | 3.01                  | 18.33 |
|                     |                                 |                       |         | Bosque denso      | 8.17                  | 49.71 |
|                     |                                 |                       |         | Bosque poco denso | 0.99                  | 6.02  |
|                     |                                 |                       |         | Urbano            | 0.01                  | 0.61  |
| 3. Real de Arriba   | 68.8                            | 44.6                  | 64.9    | Agrícola          | 18.32                 | 41.33 |
|                     |                                 |                       |         | Pastizal/Matorral | 1.12                  | 2.52  |
|                     |                                 |                       |         | Bosque denso      | 24.84                 | 56.02 |
|                     |                                 |                       |         | Bosque poco denso | 0.04                  | 0.09  |
|                     |                                 |                       |         | Urbano            | 0.02                  | 0.04  |

Tabla 4.41. Extensión superficial de los usos del suelo en las ZP II para el año 2016 de las zonas de captura potencial de los manantiales (continuación).

| Zona de captura potencial del manantial | Zona de captura potencial km <sup>2</sup> | ZP II km <sup>2</sup> | % ZP II | Uso del suelo     | ZP II km <sup>2</sup> | %     |
|---|---|-----------------------|---------|-------------------|-----------------------|-------|
| 4. Ojo de Agua                          | 76.1                                      | 23.1                  | 30.4    | Agrícola          | 13.42                 | 56.80 |
|   |   |                       |         | Pastizal/Matorral | 4.07                  | 17.22 |
|   |   |                       |         | Bosque denso      | 0.03                  | 0.12  |
|   |   |                       |         | Bosque poco denso | 0.53                  | 2.24  |
|   |   |                       |         | Urbano            | 5.58                  | 23.62 |
|   |   |                       |         | Suelo desnudo     | 0.19                  | 0.82  |
| 5. Los Fresnos                          | 77.3                                      | 1.4                   | 1.8     | Agrícola          | 0.50                  | 30.50 |
|   |   |                       |         | Bosque denso      | 0.62                  | 37.47 |
|   |   |                       |         | Urbano            | 0.53                  | 32.03 |
| 6. El Capulín                           | 57.7                                      | 2.3                   | 4.0     | Agrícola          | 1.78                  | 68.14 |
|   |   |                       |         | Pastizal/Matorral | 0.33                  | 12.83 |
|   |   |                       |         | Bosque            | 0.14                  | 5.24  |
|   |   |                       |         | Bosque poco denso | 0.12                  | 4.41  |
|   |   |                       |         | Urbano            | 0.24                  | 9.38  |

#### 4.6.2. Proyección de escenarios de variabilidad climática para la estimación de las zonas de protección

Con los escenarios se pudo observar la variabilidad climática mediante la estimación del balance hídrico proyectado para el año 2030 y 2050. De este modo se obtuvo la infiltración y se estimó la superficie de las zonas de protección de manantiales a mediano y largo plazo.

##### 4.6.2.1. Temperatura

El incremento de temperatura aquí expuesto influye en el comportamiento del resto de las variables climáticas.

Según los escenarios proyectados, la temperatura de las zonas de captura potencial de los manantiales oscila entre los 10.1°C y 12.8°C aproximadamente, siendo la de El Capulín la que presenta la temperatura media más baja las.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la temperatura media incrementará aproximadamente 2°C para 2030 y 3°C para 2050, lo cual indica que las tendencias de temperatura irán incrementando a través del tiempo (Tabla 4.42).

Si esta tendencia fuera acertada, implicaría problemas tanto de carácter ambiental como social, a corto y mediano plazo en las zonas de captura y en el resto de la entidad, pues según las organizaciones internacionales, se estima que un aumento de temperatura de 2°C y hasta 4°C se proyectaría para 2100, lo que traería como consecuencia cambios negativos globales.

Es importante mencionar que los resultados tienen cierto grado de incertidumbre; sin embargo, es importante tomarlos en cuenta para vislumbrar los posibles escenarios e implementar medidas de mitigación.

Tabla 4.42. Temperatura media anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM). Elaboración propia con base en datos de CLICOM (Ordoñez, 2015) y CCAFS (2014).

| No. | ZCPM             | 1980-2010 (°C) | 2030 (°C) |             |         |             | 2050 (°C) |             |         |             |
|-----|------------------|----------------|-----------|-------------|---------|-------------|-----------|-------------|---------|-------------|
|     |                  |                | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio |
| 1   | Chichotla        | 12.3           | 14.2      | 16.1        | 14.3    | 16.5        | 15.0      | 22.6        | 15.6    | 27.4        |
| 2   | Las Fuentes Yече | 12.3           | 14.6      | 18.0        | 14.6    | 18.4        | 15.4      | 24.5        | 16.0    | 29.5        |
| 3   | Real de Arriba   | 12.8           | 14.8      | 15.3        | 14.8    | 15.7        | 15.6      | 21.5        | 16.2    | 26.1        |
| 4   | Ojo de Agua      | 12.7           | 14.7      | 15.8        | 14.7    | 16.2        | 15.5      | 22.1        | 16.1    | 26.8        |
| 5   | Los Fresnos      | 12.2           | 14.1      | 16.2        | 14.2    | 16.7        | 14.9      | 22.7        | 15.5    | 27.7        |
| 6   | El Capulín       | 10.1           | 12.1      | 20.4        | 12.2    | 20.9        | 12.9      | 28.3        | 13.5    | 34.2        |

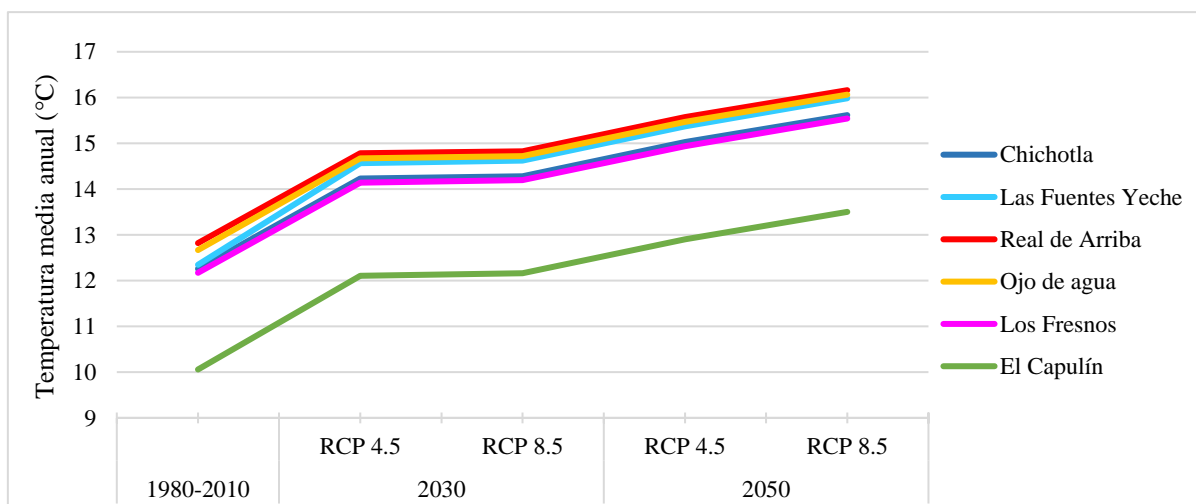


Figura 4.58. Gráfica de la temperatura media anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050, con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM). Elaboración propia con base en datos de CLICOM (Ordoñez, 2015) y CCAFS (2014).

#### 4.6.2.2. Precipitación

El aumento de la temperatura media se ve reflejado en los patrones de precipitación, ya que estos últimos disminuirán para el año 2050. Se puede observar un decremento en las lluvias que van desde 47 mm (4.3%) para la zona de captura potencial del manantial Chichotla hasta 81 mm (9.9%) en la zona de captura potencial del manantial Las Fuentes Yече para 2030 con respecto al periodo base (1980-2010) (Tabla 4.43).

Las zonas de captura potencial del manantial Ojo de Agua y Las Fuentes Yече son las que presentan las menores precipitaciones con una diferencia de hasta 250 mm - 300 mm respecto al resto. Se pronostica que para el año 2050 en un estado crítico de contaminantes, las precipitaciones aumenten para las zonas de captura potencial de los manantiales Chichotla, Real de Arriba y Los Fresnos; mientras que sucederá lo contrario en el resto de los casos.

Es posible notar que los patrones de precipitación no siguen una tendencia lineal ascendente o descendente, sino que fluctúan en el tiempo dependiendo del RCP considerado; por ejemplo, con los RCP 4.5 tienden a bajar mientras que con los RCP 8.5.

Tabla 4.43. Precipitación promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM). Elaboración propia con base en datos de CLICOM (Ordoñez, 2015) y CCAFS (2014).

| No. | ZCPM             | 1980-2010 (mm) | 2030 (mm) |             |         |             | 2050 (mm) |             |         |             |
|-----|------------------|----------------|-----------|-------------|---------|-------------|-----------|-------------|---------|-------------|
|     |                  |                | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio |
| 1   | Chichotla        | 1104.6         | 1057.5    | -4.3        | 1081.1  | -2.1        | 1058.1    | -4.2        | 1132.1  | 2.5         |
| 2   | Las Fuentes Yече | 816.8          | 735.8     | -9.9        | 762.6   | -6.6        | 744.0     | -8.9        | 752.0   | -7.9        |
| 3   | Real de Arriba   | 1123.6         | 1078.9    | -4.0        | 1103.8  | -1.8        | 1079.4    | -3.9        | 1183.3  | 5.3         |
| 4   | Ojo de Agua      | 808.2          | 744.5     | -7.9        | 769.0   | -4.9        | 746.2     | -7.7        | 773.9   | -4.2        |
| 5   | Los Fresnos      | 1045.3         | 988.1     | -5.5        | 1009.6  | -3.4        | 988.0     | -5.5        | 1064.6  | 1.9         |
| 6   | El Capulín       | 1045.9         | 988.3     | -5.5        | 1010.6  | -3.4        | 992.3     | -5.1        | 940.6   | -10.1       |

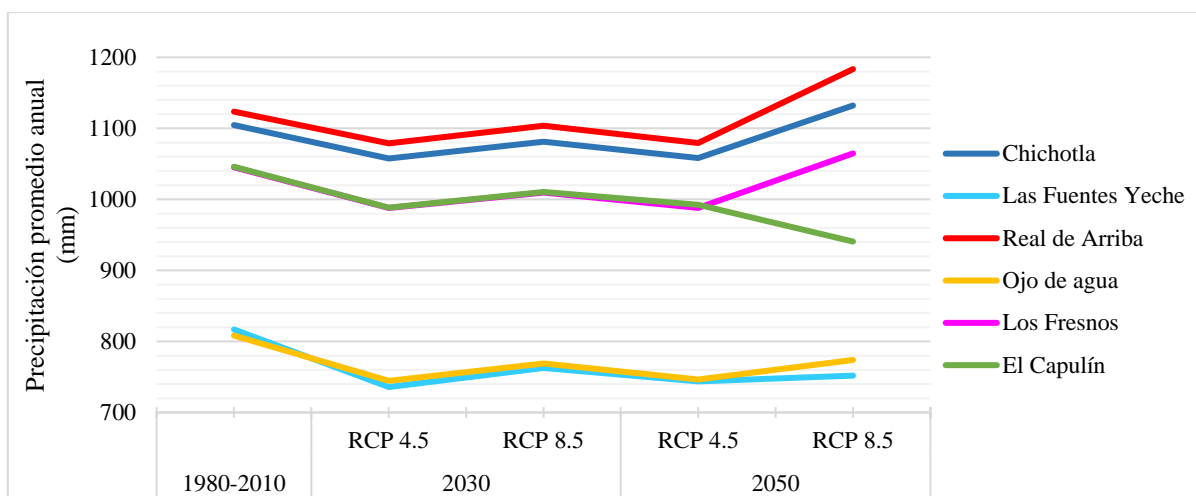


Figura 4.59. Precipitación promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM). Elaboración propia con base en datos de CLICOM (Ordoñez, 2015) y CCAFS (2014).

#### 4.6.2.3. Escurrimiento superficial

El escurrimiento anual también disminuye (Tabla 4.44). Como la precipitación es uno de los factores considerados para la estimación de ésta, se puede notar que influyó en los resultados, aunado al cambio de cobertura del uso del suelo proyectada para el año 2030 y 2050.

Tabla 4.44. Escurrimiento superficial promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM). Elaboración propia con base en datos de CLICOM (Ordoñez, 2015), CONABIO (2009), REPDA (2015) y CCAFS (2014).

| No. | ZCPM              | 1980-2010 (mm) | 2030 (mm) |             |         |             | 2050 (mm) |             |         |             |
|-----|-------------------|----------------|-----------|-------------|---------|-------------|-----------|-------------|---------|-------------|
|     |                   |                | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio |
| 1   | Chichotla         | 207.3          | 191.2     | -7.8        | 198.6   | -4.2        | 191.5     | -7.7        | 201.2   | -3.0        |
| 2   | Las Fuentes Yeche | 132.0          | 108.7     | -17.6       | 114.6   | -13.2       | 110.0     | -16.6       | 108.8   | -17.6       |
| 3   | Real de Arriba    | 214.5          | 198.5     | -7.5        | 206.7   | -3.6        | 198.4     | -7.5        | 214.7   | 0.1         |
| 4   | Ojo de Agua       | 115.6          | 99.0      | -14.3       | 104.6   | -9.5        | 100.7     | -12.8       | 103.0   | -10.9       |
| 5   | Los Fresnos       | 192.2          | 173.7     | -9.6        | 180.3   | -6.2        | 173.6     | -9.6        | 183.2   | -4.7        |
| 6   | El Capulín        | 183.8          | 165.9     | -9.7        | 172.2   | -6.3        | 166.8     | -9.2        | 154.5   | -15.9       |

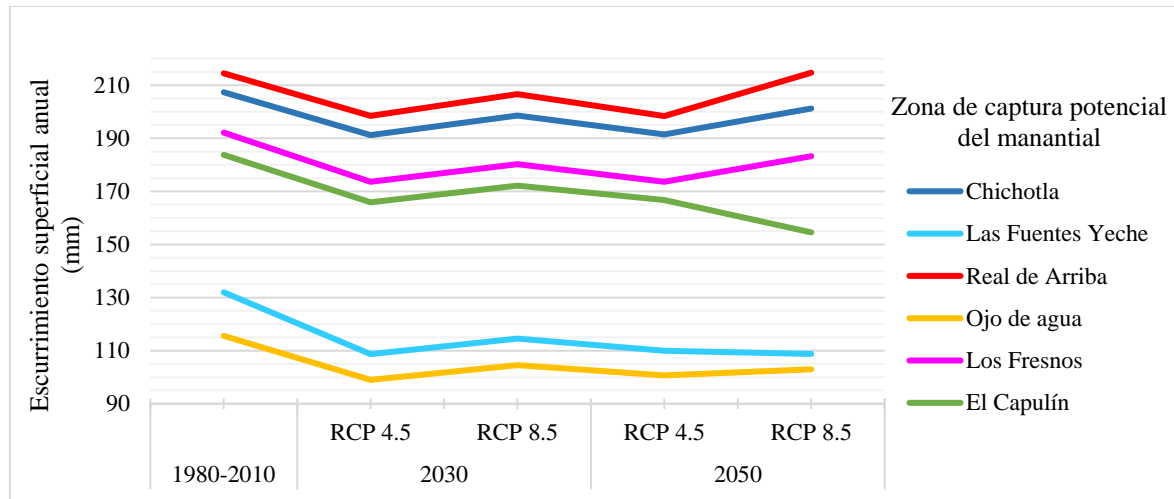


Figura 4.60. Gráfica del escurrimiento superficial anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM). Elaboración propia con base en datos de CLICOM (Ordoñez, 2015) y CCAFS (2014).

Las zonas de captura potencial con los volúmenes de escurrimiento son Las Fuentes Yeche y El Ojo de Agua.

Prácticamente en todas las zonas de captura potencial se proyecta una disminución gradual del escurrimiento superficial para ambos años y co ; esto no significa que favorezca la infiltración, pues los bajos valores son están relacionados con las bajas precipitaciones y las elevadas temperaturas.

#### 4.6.2.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración anual se ve afectada por el cambio de la temperatura. La evapotranspiración tiende a incrementar de manera gradual.

Todas las zonas de captura potencial mantienen la misma tendencia de evapotranspiración incrementando hacia el 2050.

De manera general, los valores resultantes indican que las proyecciones para ambos años con RCP 4.5 tienen una tendencia creciente, y lo mismo sucede con los RCP 8.5: Sin embargo, considerando el año 2030, los resultados del RCP 8.5 son más bajos que los del RCP 4.5.

La zona de captura potencial del manantial Ojo de Agua y Las Fuentes Yeche mantienen prácticamente los mismos valores de evapotranspiración, los cuales tienden a incrementar a 794.1mm y 787.3 mm respectivamente para el 2050. Pasa algo similar con Real de Arriba, Chichotla y Los Fresnos, que se proyectan en 708.3 mm, 721.5 mm y 723 mm para el mismo año. Por otro lado, zona de captura potencial de El Capulín mantiene los valores más bajos de evapotranspiración proyectada en 642.6mm (Tabla 4.45).

Tabla 4.45. Evapotranspiración promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM). Elaboración propia con base en datos de CLICOM (Ordoñez, 2015) y CCAFS (2014).

| No. | ZCPM              | 1980-2010 (mm) | 2030 (mm) |             |         |             | 2050 (mm) |             |         |             |
|-----|-------------------|----------------|-----------|-------------|---------|-------------|-----------|-------------|---------|-------------|
|     |                   |                | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio |
| 1   | Chichotla         | 610.0          | 679.2     | 11.3        | 671.5   | 10.1        | 701.4     | 15.0        | 708.3   | 16.1        |
| 2   | Las Fuentes Yeche | 680.2          | 759.5     | 11.7        | 752.6   | 10.7        | 783.3     | 15.2        | 794.1   | 16.7        |
| 3   | Real de Arriba    | 623.5          | 692.3     | 11.0        | 684.8   | 9.8         | 714.8     | 14.6        | 721.5   | 15.7        |
| 4   | Ojo de Agua       | 677.4          | 753.9     | 11.3        | 747.1   | 10.3        | 778.0     | 14.8        | 787.3   | 16.2        |
| 5   | Los Fresnos       | 619.3          | 691.8     | 11.7        | 685.1   | 10.6        | 715.6     | 15.6        | 723.0   | 16.8        |
| 6   | El Capulín        | 544.1          | 613.4     | 12.7        | 606.0   | 11.4        | 635.2     | 16.8        | 642.6   | 18.1        |

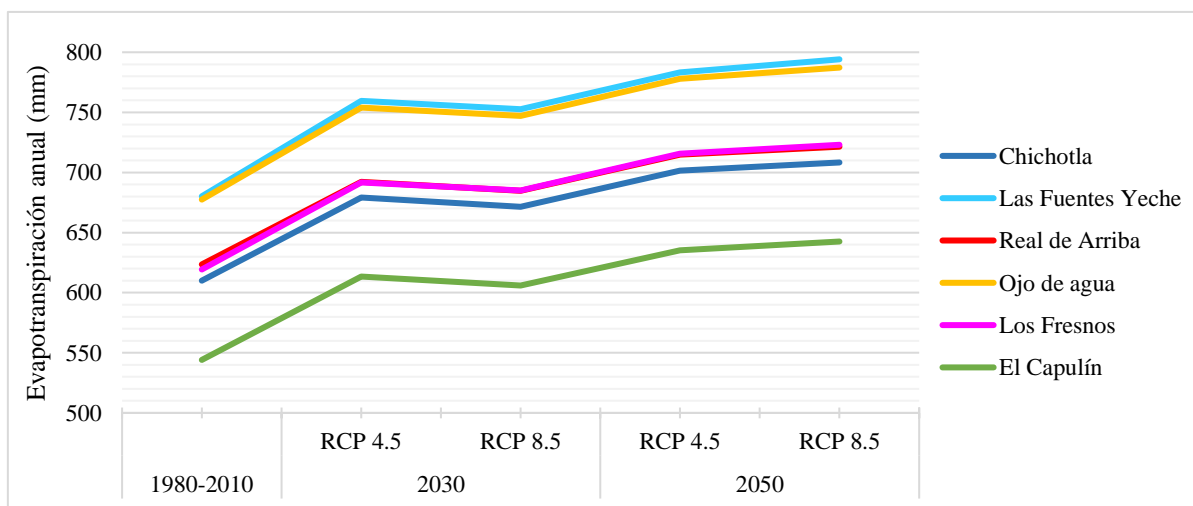


Figura 4.61. Gráfica de evapotranspiración promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM).



#### 4.6.2.5. Infiltración

Finalmente, con la variabilidad que hubo en los factores considerados para el balance hídrico en los años proyectados, la infiltración disminuyó en todas las zonas de captura potencial de los manantiales (Tabla 4.46).

Los resultados generales indican que las proyecciones con RCP 4.5 bajan más que con las de RCP 8.5. Los casos sobresalientes son las zonas de captura potencial de los manantiales Las Fuentes Yeche, El Ojo de Agua y El Capulín.

La tendencia de la infiltración indica que la cantidad de agua que penetra el suelo disminuirá en promedio hasta un 20.9% en Las Fuentes Yeche y un 16.7% en El Ojo de Agua para 2030 (RCP 4.5) y disminuirán más drásticamente para el año 2050 (RCP 8.5) con 31.7% y 27% respectivamente. Por otro lado, la infiltración de la zona de captura potencial del manantial El Capulín disminuirá un 29.2% para 2050 (RCP 8.5).

Las tendencias para la zona de captura potencial de los manantiales Chichotla, Real de Arriba y Los Fresnos son menos cambiantes, se mantienen en una disminución de infiltración del 7.6%, 1.8% y 7.9% respectivamente.

La zona de captura potencial de los manantiales Las Fuentes Yeche y El Ojo de Aguas presentaron los valores más bajos de infiltración.

Tabla 4.46. Infiltración promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM). Elaboración propia con base en datos de CLICOM (Ordoñez, 2015) y CCAFS (2014).

| No. | ZCPM              | 1980-2010 (mm) | 2030 (mm) |             |         |             | 2050 (mm) |             |         |             |
|-----|-------------------|----------------|-----------|-------------|---------|-------------|-----------|-------------|---------|-------------|
|     |                   |                | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio | RCP 4.5   | % de cambio | RCP 8.5 | % de cambio |
| 1   | Chichotla         | 486.9          | 449.3     | -7.7        | 458.5   | -5.8        | 428.4     | -12.0       | 450.0   | -7.6        |
| 2   | Las Fuentes Yeche | 272.8          | 216.5     | -20.7       | 221.3   | -18.9       | 191.2     | -29.9       | 186.3   | -31.7       |
| 3   | Real de Arriba    | 494.9          | 461.4     | -6.8        | 468.7   | -5.3        | 441.0     | -10.9       | 486.1   | -1.8        |
| 4   | Ojo de Agua       | 272.8          | 227.7     | -16.5       | 229.4   | -15.9       | 199.2     | -27.0       | 199.0   | -27.0       |
| 5   | Los Fresnos       | 445.0          | 389.5     | -12.5       | 406.8   | -8.6        | 376.1     | -15.5       | 410.0   | -7.9        |
| 6   | El Capulín        | 481.7          | 430.9     | -10.5       | 445.6   | -7.5        | 409.7     | -14.9       | 340.9   | -29.2       |

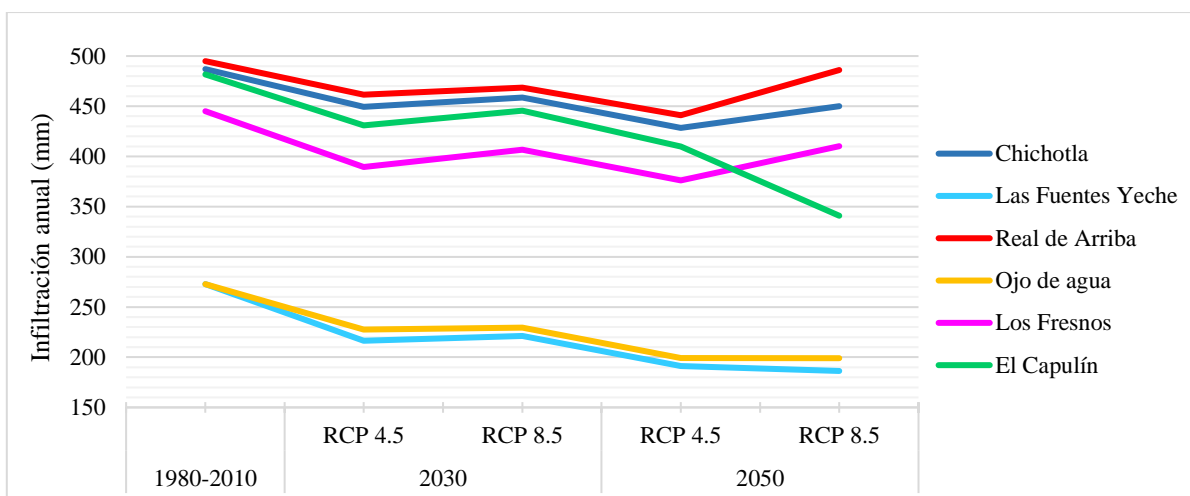


Figura 4.62. Gráfica de infiltración promedio anual para el periodo 1980-2010 y proyecciones al 2030 y 2050 con RCP de 4.5 y 8.5 de las zonas de captura potencial de los manantiales (ZCPM).

Como se puede observar, no hay un patrón que determine que la variabilidad de los factores involucrados vaya en incremento o decremento lineal, sino que hay fluctuaciones entre años, y entre RCP.

La ubicación de los manantiales y las características climáticas, físicas y socioeconómicas de las zonas de captura potenciales de los manantiales son fundamentales para determinar el comportamiento de la infiltración el agua en el suelo en el futuro.

Las condiciones mencionadas para el caso de Las Fuentes Yeche y El Ojo de Agua se diferencian del resto sobre todo por los patrones de lluvia y el tipo y uso del suelo, lo cual influye en los resultados de infiltración.

En particular, la zona de captura potencial del manantial Ojo de Agua se puede destacar debido a que aparte de que se presentan las menores precipitaciones, ésta se ve desfavorecida por el crecimiento de la mancha urbano, lo que acentúa aún más la disminución de la infiltración de en el suelo.

### 4.6.3. Escenarios de las zonas de protección

Se delimitaron las zonas de protección para los seis manantiales tomando en consideración los escenarios de la infiltración proyectados con distintos niveles de forzamientos radiativos (del sistema climático) asociados a las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero (RCP4.5 y RCP 8.5), con la finalidad de observar su comportamiento y/o dinámica espacial para el año 2030 y 2050.

Como mencionó en la metodología, para delimitar las zonas de protección de manantiales se estimó la infiltración anual dentro de las zonas de captura potencial de dichas fuentes para calcular el área de la ZP II, zona que potencialmente aporta el volumen de agua suficiente para mantener el caudal del manantial en un año. Se utilizó la infiltración debido a que aguas arriba de los manantiales no se cuenta con pozos que permitan estimar los niveles de agua subterránea, pues no tienen una conexión directa con los acuíferos profundos, ya que más bien son producto de acuíferos colgados en lo que no se encontró información disponible.

Los resultados muestran que la infiltración promedio anual de las ZP II disminuyó, por lo tanto, el área de aportación aumentó, ya que se necesita una superficie mayor que sea lo suficientemente capaz de aportar al manantial en el transcurso de un año (Tabla 4.47 y Tabla 4.48). A su vez, las ZP III disminuyeron.

Tabla 4.47. Estimación de la ZP II con base en la infiltración anual proyectada para el año 2030.

| No. | Manantial               | ZP II<br>1980-2010 |                            | ZP II proyectada 2030 |                            |                |            |                            |                |
|-----|-------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------|------------|----------------------------|----------------|
|     |                         | Ir<br>(mm)         | Área<br>(km <sup>2</sup> ) | RCP 4.5               |                            |                | RCP 8.5    |                            |                |
|     |                         |                    |                            | Ir<br>(mm)            | Área<br>(km <sup>2</sup> ) | % de<br>cambio | Ir<br>(mm) | Área<br>(km <sup>2</sup> ) | % de<br>cambio |
| 1   | Chichotla               | 251.6              | 45.4                       | 232.2                 | 48.9                       | 7.7            | 236.9      | 48.0                       | 5.8            |
| 2   | Las<br>Fuentes<br>Yeche | 62.0               | 16.2                       | 49.2                  | 19.5                       | 20.7           | 50.3       | 19.3                       | 18.9           |
| 3   | Real de<br>Arriba       | 321.1              | 44.6                       | 299.3                 | 47.7                       | 6.8            | 304.0      | 47.0                       | 5.3            |
| 4   | Ojo de<br>Agua          | 82.9               | 23.1                       | 69.2                  | 27.0                       | 16.5           | 69.8       | 26.8                       | 15.9           |
| 5   | Los<br>Fresnos          | 8.2                | 1.4                        | 7.1                   | 1.6                        | 12.5           | 7.5        | 1.5                        | 8.6            |
| 6   | El Capulín              | 19.1               | 2.3                        | 17.1                  | 2.5                        | 10.5           | 17.7       | 2.5                        | 7.5            |

Tabla 4.48. Estimación de la ZP II con base en la infiltración anual proyectada para el año 2050.

| No. | Manantial        | ZP II     |                         | ZP II proyectada 2050 |                         |             |         |                         |             |
|-----|------------------|-----------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|---------|-------------------------|-------------|
|     |                  | 1980-2010 |                         | RCP 4.5               |                         |             | RCP 8.5 |                         |             |
|     |                  | Ir (mm)   | Área (km <sup>2</sup> ) | Ir (mm)               | Área (km <sup>2</sup> ) | % de cambio | Ir (mm) | Área (km <sup>2</sup> ) | % de cambio |
| 1   | Chichotla        | 251.6     | 45.4                    | 221.4                 | 50.8                    | 11.8        | 232.5   | 48.8                    | 7.6         |
| 2   | Las Fuentes Yече | 62.0      | 16.2                    | 43.4                  | 21.0                    | 29.6        | 42.3    | 21.3                    | 31.7        |
| 3   | Real de Arriba   | 321.1     | 44.6                    | 286.1                 | 49.5                    | 10.9        | 315.3   | 45.4                    | 1.8         |
| 4   | Ojo de Agua      | 82.9      | 23.1                    | 60.6                  | 29.4                    | 27.0        | 60.5    | 29.4                    | 27.0        |
| 5   | Los Fresnos      | 8.2       | 1.4                     | 6.9                   | 1.6                     | 15.5        | 7.5     | 1.5                     | 7.9         |
| 6   | El Capulín       | 19.1      | 2.3                     | 16.3                  | 2.6                     | 14.9        | 13.5    | 3.0                     | 29.2        |

Nuevamente, los casos de mayor relevancia son las ZP II de Las Fuentes Yече y El Ojo de Agua para el 2030 en ambos RCP 4.5 donde se presentaron los mayores cambios en la superficie (entre el 15.9% y 20.7%). Esta situación se presenta igualmente para el año 2050, aunado al cambio que tiene la ZP II de El Capulín (entre 14.9% y 29.2).

A pesar de que los cambios de las ZP II aumentan, en los mapas obtenidos no se logra distinguir un cambio considerable de su área, debido a la escala de trabajo. Se generaron dos mapas proyectados correspondientes al año 2030 y 2050 con RCP de 8.5. El uso de este RCP se hizo con el fin de observar la variabilidad espacio temporal de la infiltración en un estado crítico, (resultados semejantes a los del RCP 4.5).

En ambos mapas se sobrepusieron las zonas de protección correspondientes al periodo base (1980-2010) y a los años proyectados con ambos RCP (Figura 4.63 y Figura 4.64).

Con estos resultados se puede observar la dinámica de los límites de las ZP II aguas arriba del manantial. Las ZP II que aumentan en superficie más drásticamente son de los manantiales Las Fuentes Yече y El Ojo de Agua. La variabilidad espacial es poco notoria, más aún en el resto de las ZP II, pues prácticamente son imperceptibles los cambios. Pese a que los cambios espaciales son poco notorios, es importante resaltar que los años proyectados, son muy próximos, pero en caso de seguir con las tendencias actuales, dichas zonas se verán afectadas por los cambios constantes derivados del crecimiento de la población sus actividades e impactos ambientales.

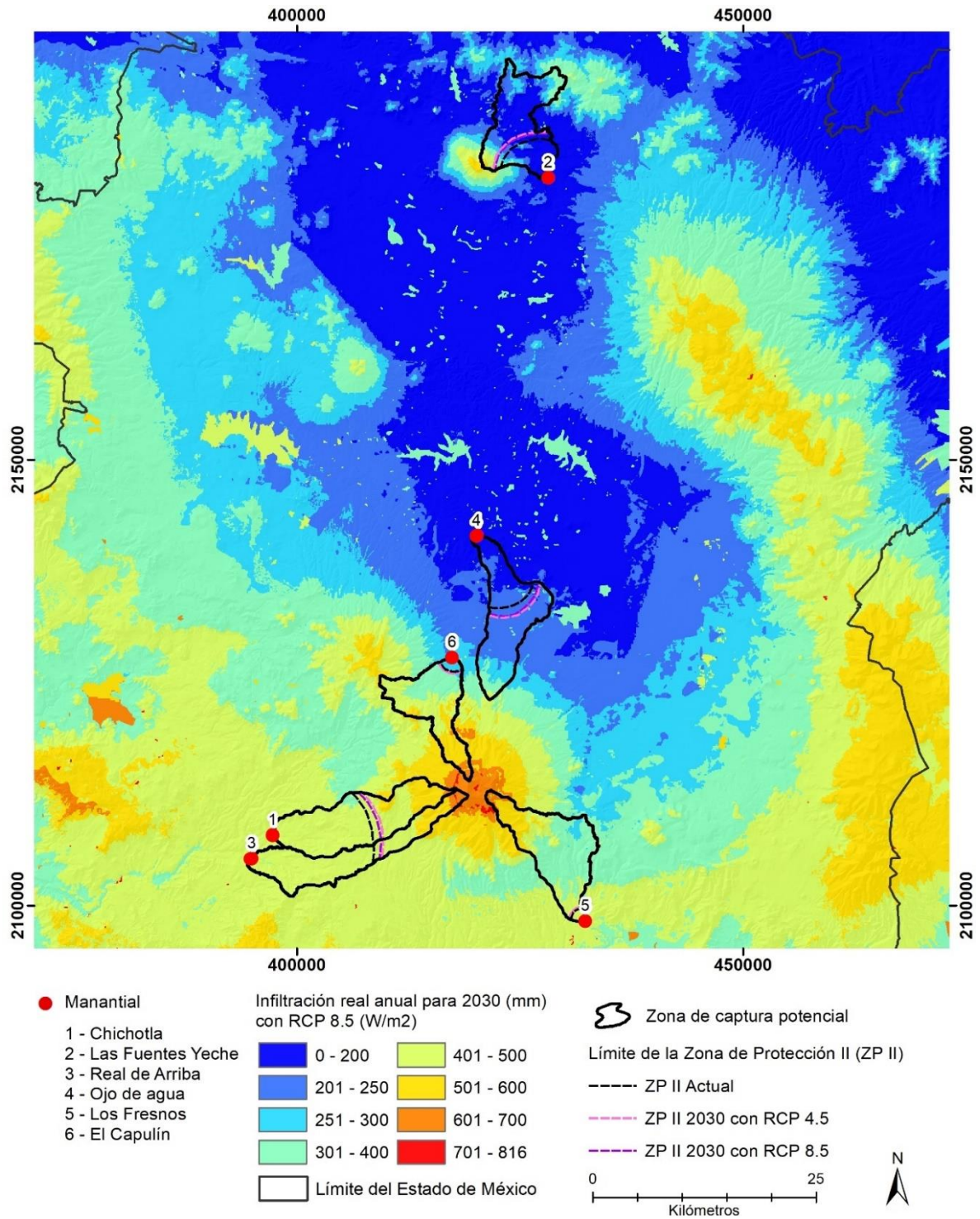


Figura 4.63. Infiltración anual proyectada a 2030 con RCP 4.5 y proyección de las ZP.

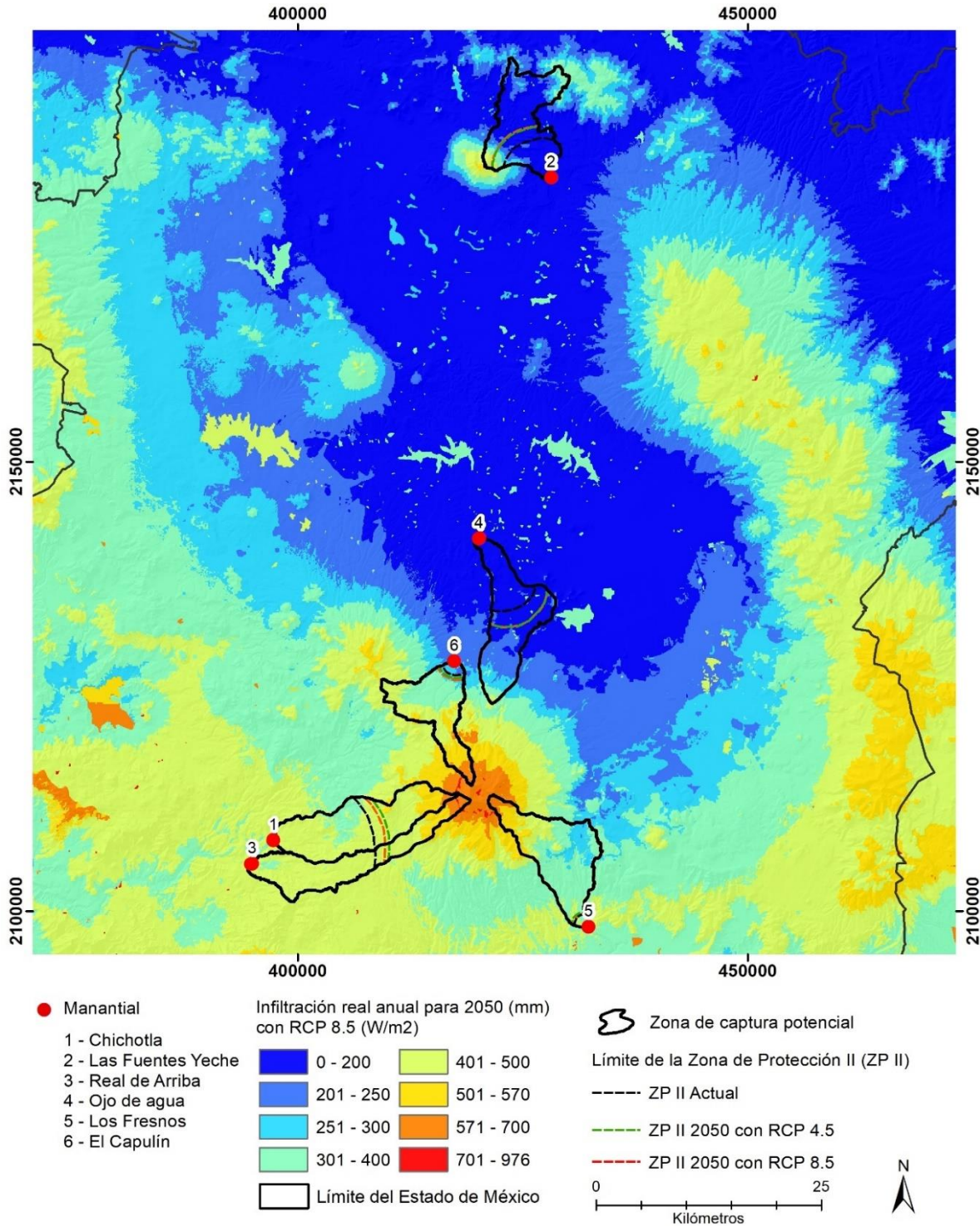


Figura 4.64. Infiltración anual proyectada a 2050 con RCP 8.5 y proyección de las ZP.

En la proyección de escenarios futuros hay que tener en cuenta el grado de incertidumbre que estos pudieran generar, debido a los datos utilizados.

Para una mejor visualización de dichas áreas, se realizó un mapa en donde se puede observar con más de detalle, la dinámica de las zonas de protección (Figura 4.65).

La importancia de llevar a cabo una delimitación de zonas con distinto grado de protección es para identificar las zonas susceptibles a efectos ambientales. Las zonas de protección de manantiales deberán ser contempladas a la hora de implementar nuevos proyectos de desarrollo urbanístico y de programas de producción del campo, ya que tanto las zonas urbanas como las agrícolas, son posibles focos de contaminación del agua subterránea.

La asignación de distintas zonas de protección, como parte de las estrategias de protección de fuentes de aguas subterráneas, conducirá a la conservación de manantiales, con el fin de mejorar el bienestar social y económico, así como mantener la calidad ambiental

Aunado a esto, la proyección de las variables climáticas y de uso de suelo, son una herramienta que permitirá vislumbrar las tendencias de los posibles

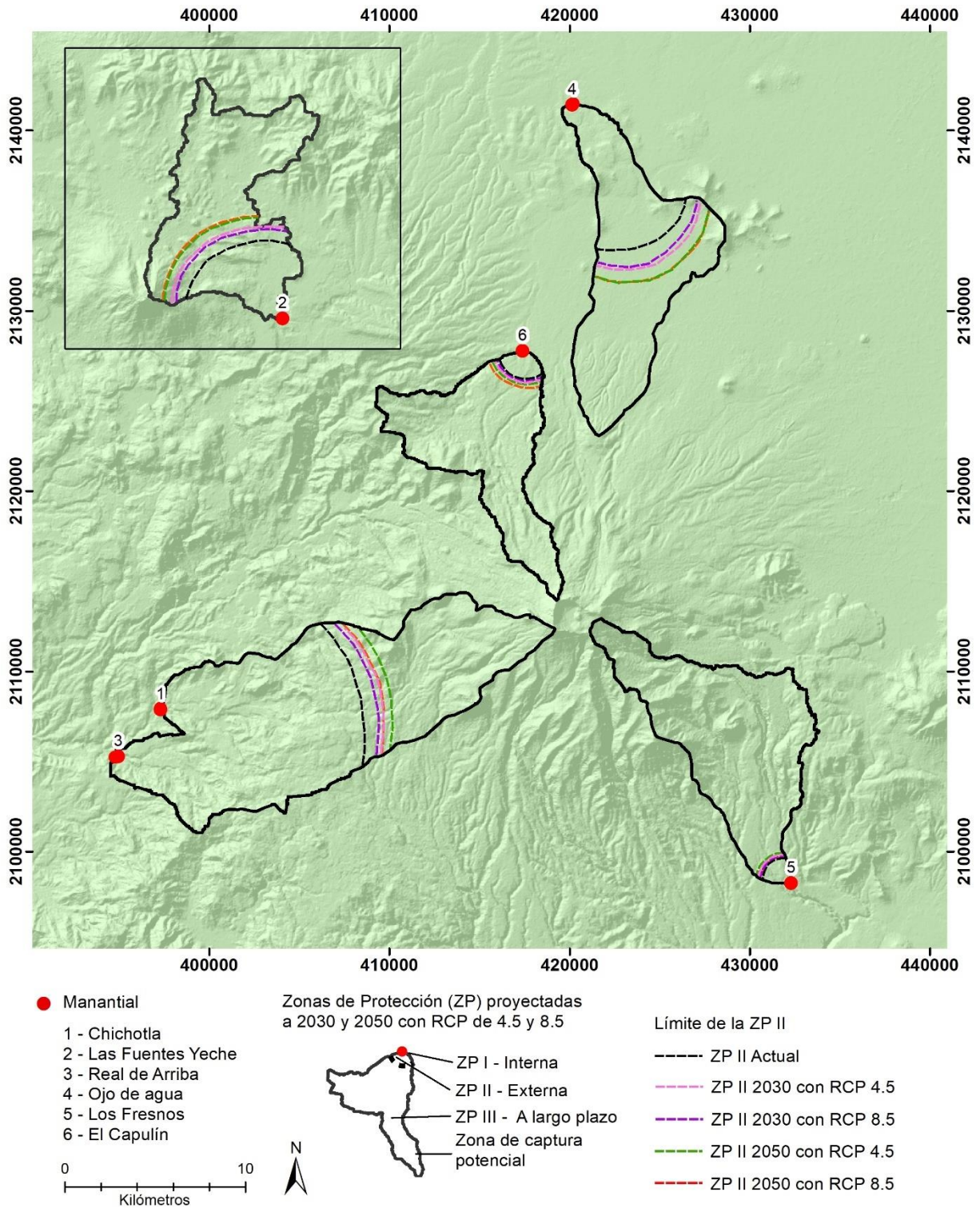


Figura 4.65. Mapa que muestra la dinámica espacio temporal de las zonas de protección.



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## Conclusiones

El presente trabajo de investigación permitió establecer una metodología para definir la protección de manantiales en el Estado de México. De dicha propuesta se derivan las conclusiones de los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos planteados.

Las conclusiones corresponden a cuatro puntos fundamentales propuestos: regionalización del área de estudio, priorización de manantiales a proteger, y delimitación de zonas de protección de manantiales y proyección de escenarios futuros como parte de las de las estrategias de protección de aguas subterráneas.

La regionalización permitió asociar grupos de manantiales a regiones con características específicas, considerando su funcionamiento hidrogeológico, las pendientes del terreno y las precipitaciones. De 30 regiones resultantes 8 fueron de interés debido a su importancia con relación al número de manantiales localizados en éstas.

De los 2937 manantiales identificados en el Estado de México, resultó importante seleccionar por cada región de interés los de mayor caudal y del uso público, por ser las principales fuentes de abastecimiento en la zona de estudio en lo que a manantiales se refiere.

De acuerdo con la metodología empleada, 27 manantiales fueron seleccionados y se lograron clasificar de acuerdo a la propuesta por Kresic (2010b) como: manantiales de gravedad, de medios fracturados y porosos volcánicos, perennes, algunos de tipo difuso y otros de tipo concentrado, y no termales, asociados a acuíferos libres; además, presentaron características físico químicas similares con valores dentro de los límites permisibles por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

El propósito de la regionalización y clasificación de manantiales fue para priorizar aquellos con mayor necesidad de protección. La priorización se llevó a cabo mediante el Análisis Multicriterio que contempló seis variables que determinaron el peso de importancia: caudal de

asignación, uso de suelo, población abastecida, conservación de la infraestructura del manantial, existencia de otras fuentes de abastecimiento e índice de marginación. Los resultados permitieron identificar seis manantiales como prioritarios a proteger: Chichotla y Real de Arriba en Temascaltepec, Las Fuentes Yeche en Jocotitlán, Ojo de Agua en Almoloya de Juárez, Los Fresnos en Villa Guerrero y El Capulín en Zinacantepec. Los seis manantiales estuvieron asociados a seis regiones, caracterizadas por medios fracturados y porosos volcánicos, tanto en zonas planas, piedemonte y sierras, con precipitaciones abundantes y suficientes.

Una vez priorizados dichos manantiales, se pudieron aplicar las técnicas necesarias para estimar zonas con distinto grado de protección. La delimitación de zonas de protección (ZP) fueron definidas mediante la delimitación de las zonas de captura potencial de los manantiales y la estimación de la infiltración.

Con la estimación de la infiltración se pudo delimitar la zona de protección II, la cual contribuye al caudal del manantial en un tiempo de 365 días; consecuentemente, se pudo calcular la zona de protección III que es el área de contribución a largo plazo). La zona de protección I es fija, ya que corresponde a los límites perimetrales que asignan los operadores de la gestión del agua.

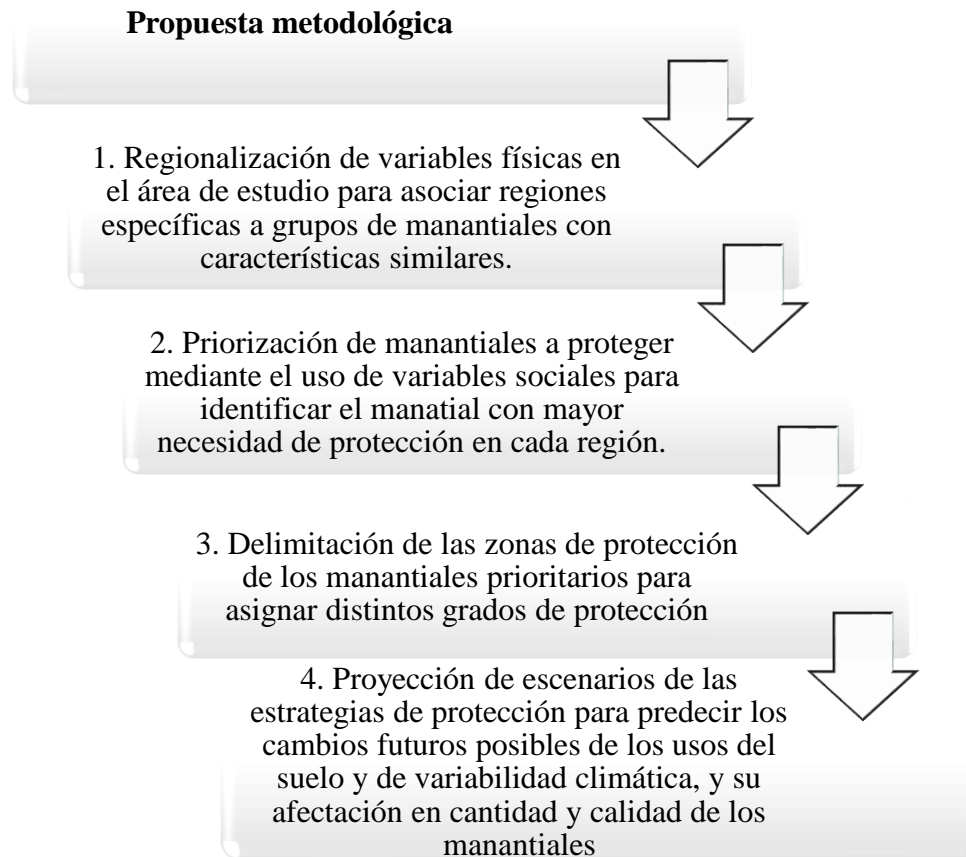
Una vez delimitadas las zonas de protección se proyectaron escenarios futuros de los posibles cambios de uso de suelo y de la variabilidad climática para 2030 y 2050. De este modo, se pudo observar que los límites de las zonas de protección son dinámicas en el corto y mediano plazo. Las ZP II aumentaron en superficie.

La zona más crítica fue la del manantial Ojo de Agua, zona en la que se prevé un cambio drástico en el uso de suelo urbano y menor infiltración anual, lo que la hace más susceptibles a daños ambientales y sociales.

Es importante resaltar que los años proyectados, son muy próximos, pero en caso de seguir con las tendencias actuales, dichas zonas se verán afectadas por los cambios constantes derivados del crecimiento de la población sus actividades e impactos ambientales.

Como consideración final, las estrategias de delimitación de zonas de protección de manantiales y proyección de escenarios futuros permitieron prever los cambios de los usos del suelo que

pueden ocurrir en un futuro y observar los cambios en el comportamiento espacial de las zonas de protección, pues de este modo se lograron identificar las zonas que son susceptibles a sufrir daños ambientales en mediano plazo. La propuesta metodológica se sintetiza en el siguiente esquema.



## Recomendaciones

Ante las limitantes existente sobre la gestión para la protección de los recursos hídricos subterráneos enfocada a manantiales en el Estado de México y de los resultados obtenidos se recomienda:

- Actualizar la base de datos de los registros de fuentes de agua del REPDA, a fin de tener información confiable sobre la ubicación y datos de volumen de asignación de agua de los manantiales.

- Se sugiere construir límites perimetrales de protección por parte del personal encargado de la gestión de los manantiales en estudio, como parte de las ZP I a fin de proteger directamente de agentes contaminantes a la captación de agua.
- Se sugiere proyectar escenarios de largo plazo con la finalidad de observar la variabilidad de los aspectos tanto climáticos, físicos como socioeconómicos y poder tener un panorama más amplio de las tendencias de las ZP.
- Considerar esta metodología para estudios similares que deseen identificar aquellos manantiales con mayor necesidad de protección y aplicar las etapas metodológicas correspondientes a las estrategias de protección de manantiales. Esta propuesta metodológica puede ser adaptada a cada área de estudio específica de acuerdo con la disponibilidad de información. Se pueden proponer e incluir otras variables.
- Incluir en los planes, programas y/o las políticas de ordenamiento territorial o de gestión de recursos hídricos la proyección de escenarios futuros que permiten prever los cambios futuros posibles de ocupación del uso del suelo que pueden afectar tanto la calidad como la cantidad del agua de los manantiales.
- Trabajar de manera conjunta entre las autoridades gubernamentales y/o instancias académicas para dar seguimiento a los manantiales prioritarios
- Dar seguimientos a los casos de estudio abordados con la finalidad de realizar futuros trabajos de investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agua para todos, 2014. *Agenda Nacional. Fin a la destrucción y sobreexplotación de cuencas y aguas subterráneas*. México: Agua para todos, agua para la vida.
- Allen, R. G., 1996. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(2), pp. 97-106.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and drainage paper 56 ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) .
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., 2006. *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje 56 ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- Alvarado, A., 2009. *Análisis multicriterio para identificar y jerarquizar fuentes de agua*. Toluca: Tesis de Maestría, UAEMex-CIRA.
- Alvarado, C. & Barahona, M., 2017. Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 9(1), pp. 23-33.
- Aparicio, F., 2005. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México D. F. : Limusa.
- Arellano, F. y otros, 2009. *Estudio hidrogeológico para la caracterización y delimitación de las zonas de recarga de las fuentes Milano y El Cairo*. Costa Rica: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados-HIDROGEOLOGÍA LTDA.
- Armenta, G. E., Dorado, J., Rodríguez, A. O. & Ruíz, J. F., 2015. *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).
- Arreguín, F. I., 2011. *El Agua Subterránea en México*. México: CONAGUA.
- Arumí, J. L. y otros, 2014. Caracterización de dos grupos de manantiales en el río Diguillín, Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), pp. 151-158.
- Banzato, C., Governa, M., Petricig, M. & Vigna, B., 2015. The Importance of Monitoring for the Determination of Aquifer Vulnerability and Spring Protection Areas. *Engineering Geology for Society and Territory* , Volumen 5, pp. 1379-1385.
- Barquín, J., 2005. Patrones de biodiversidad en manantiales: implicaciones para la gestión de las aguas subterráneas. *Locustella*, Issue 4, pp. 37-49.
- Barquín, J. & Scarsbrook, M., 2008. Management and conservation strategies for coldwater springs. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(Hamilton, Nueva Zelanda), p. 580–591.

Benítez, C., Arias, W. & Quiroz, J., 1980. *Manual de Conservación de suelos y agua*. Lima, Perú: Manual de conservación de suelos y agua.

Biava, F. y otros, 2014. Delineation of Protection Zones for the Main Discharge Area of the Gran Sasso Aquifer (Central Italy) through an Integrated Geomorphological and Chronological Approach. *Journal of Water Resource and Protection*, Volumen 6, pp. 1816-1832.

Cap-Net, 2010. *Gestión de aguas subterráneas en la GIRH. Manual de capacitación*. México: PNUD-WG MTE-Cap-Net.

Castillo, A., 2008a. Causas de la desaparición de manantiales: el silencio de la ausencia. En: *Manantiales de Andalucía*. Sevilla, España: Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, pp. 198-199.

Castillo, A., 2008b. *Manantiales de Andalucía*. Sevilla, España: Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

Castro, R. & Castillo, E., 2004. *Telesat, aplicaciones para la enseñanza de los cambios y análisis de los recursos naturales*. En *4ª Jornada de Educação em Sensoriamento Remoto no Âmbito do Mercosul*. São Leopoldo, RS, Brasil: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO.

CCAFS, 2014. *Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS)-Climate data: Spatial downscaling data*. [En línea] Available at: <http://ccafs-climate.org/> [Último acceso: 22 mayo 2018].

CGIAR-CSI, 2009. *Global Aridity Index (Global-Aridity) and Global Potential Evapo-Transpiration (Global-PET) Methodology and Geospatial Dataset Description*. 2 ed. Washington, DC, United States: Consortium for Spatial Information.

CGIAR-CSI, 2016. *Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)*. [En línea] Available at: <http://www.cgiar-csi.org/data> [Último acceso: 18 noviembre 2017].

Chávez, R., Lara, F. & Sención, R., 2006. El agua subterránea en México: condición actual y retos para un manejo sostenible. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), pp. 115-126.

Civita, M., 2008. An improved method for delineating source protection zones for karst springs based on analysis of recession curve data. *Hydrogeology Journal*, Volumen 16, p. Hydrogeology Journal.

CONABIO, 2008. *Regionalización*. [En línea] Available at: <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/regionalizacion.html> [Último acceso: 15 noviembre 2015].

CONABIO, 2009. *Uso de suelo y vegetación*. [En línea] Available at: <https://www.gob.mx/conabio> [Último acceso: 2 agosto 2017].

CONAGUA, 2007. *Estadísticas del agua en México*. México, D. F.: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA, 2007. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Delimitación de las zonas de protección de pozos para agua*. 2007 ed. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA, 2012. *Atlas digital del agua en México 2012. Sistema Nacional de Información del Agua*. [En línea]

Available at: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/>  
[Último acceso: 9 octubre 2015].

CONAGUA, 2015. *Disponibilidad del agua subterránea por acuífero*. México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA, 2015. *Registro Público de Derechos de Agua*. [En línea]  
Available at: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>  
[Último acceso: 20 septiembre 2015].

CONAGUA, 2016. *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA, 2016. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Captación en pozos profundos*. México: Comisión Nacional del Agua.

CONANP, 2011. *Historia*. [En línea]  
Available at: [http://www.conanp.gob.mx/quienes\\_somos/historia.php](http://www.conanp.gob.mx/quienes_somos/historia.php)  
[Último acceso: 03 12 2014].

Conant, J. & Fadem, P., 2011. La protección del agua comunitaria. En: *Guía comunitaria para la salud ambiental*. California, EE.UU: Hesperian, pp. 64-101.

CONAPO, 2006. *Índices de marginación 2005*. México: Consejo Nacional de Población.

CONAPO, 2010. *Índice de marginación en el Estado de México 2010*. México: Consejo Nacional de Población.

CONAPO, 2016. *Consejo Nacional de Población*. [En línea]  
Available at: [http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones\\_Datos](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos)  
[Último acceso: 12 noviembre 2016].

Dávila, J., 2011. *Diccionario geológico*. Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

De León, R. V. & Sánchez, G. d. I. N., 2017. Caracterización de los escenarios como herramienta para la planeación pública del agua: El caso mexicano. *Gestión y Política Pública*, XXVI(1), pp. 53-103.

DEP, 2007. *Florida Springs Initiative: Program Summary and Recommendation*. Florida: Department of Environmental Protection (DEP).

Department of Environmental Protection, 2002. *Protecting Florida's Springs, Land Use Planning Strategies and Best Management Practices*. s.l.:Florida Departments of Community Affairs and Environmental.

Department of Environmental Protection, 2008. *Protecting Florida's Springs: An Implementation Guidebook*. Florida: Florida Department of Community Affairs.

DOF, 2002. *Norma Oficial Mexicana 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*. México: Diario Oficial de la Federación.

Drobne, S. & Lisec, A., 2009. Multi-attribute Decision Analysis in GIS: Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging. *Informatica*, Volumen 33, p. 459–474.

Eastman, 2016. *IDRISI TerrSet. Geoespacial Monitoring and Modeling System*. Massachusetts, United States: Clark Labs at Clark University.

EEG, 2006. Capítulo 3. descripción e interpretación del Sendero Las Golondrinas. En: *Municipalidad de Esquipulas. Sendero de Educación Ambiental. Parque regional Municipal Montecristo*. Chiquimula, Guatemala: Embajada de España en Guatemala-Cooperación Española, pp. 11-24.

Elhatip, H. & Afşin, M., 2001. Roles of hydrogeochemical evaluations in estimating protection zones of Koçpınar springs in Aksaray, central Anatolia, Turkey. *Environmental Geology*, Volumen 40, pp. 1010-1016.

Environment Agency, 2009. *Groundwater Source Protection Zones: Review of Methods*. Reino Unido: Environment Agency.

Escuela del Agua, 2015. *Escuela del Agua A. C.* [En línea] Available at: <http://escueladelagua.org.mx/proyectos.php> [Último acceso: 11 abril 2015].

Esquivel, J. M., 2008. *Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas como herramienta para facilitar su uso sustentable: manantiales de Almoloya de Juárez, Estado de México. Tesis de Licenciatura*. Toluca: UAEMex.

Esquivel, J. M., 2011. *Uso de los SIG para el rediseño de las redes existentes de monitoreo de cantidad y calidad del agua subterránea: acuífero del Valle de Toluca. Tesis de maestría*. Toluca: UAEMex.

Esquivel, J. M., 2015. *Diseño óptimo de redes dinámicas de monitoreo de agua subterránea mediante el uso de SIG y escenarios hidrogeológicos*. Toluca: UAEMex.

Esteller, M. V., Rodríguez, R., Cardona, A. & Padilla, L., 2012. Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: study cases from Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, Volumen 184, p. 5725–5741.

Expósito, J., Gárfias, J. M., Franco, R. & Esteller, M. V., 2007. Delimitación de perímetros de protección de pozos en un acuífero libre con conductividad hidráulica vertical variable. *Ingeniería hidráulica en México*, 22(2), pp. 55-67.



Expósito, J. L., 2012. *Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea*. Toluca: UAEMex.

FAO, 2009. *Guía para la Descripción de Suelos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO, 2012. *FRA, 2015. Términos y definiciones. Documento de Trabajo de la Evaluación de los Recursos Forestales No. 180*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO, 2015. *Agua. Capítulo 1. Generalidades*. [En línea] Available at: [ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO\\_training/FAO\\_training/general/x6705s/x6705s01.htm](ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6705s/x6705s01.htm) [Último acceso: 13 octubre 2015].

FCIHS, 2016. *Tipos y funcionamiento de los manantiales*. Barcelona: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.

Fernández, A. y otros, 2014. *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica*. México: UNAM-INECC.

Foster, S. y otros, 2002. *Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington, D.C: Banco Mundial.

Gallardo, M., 2014. *Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Galleani, L., Vigna, B., Banzato, C. & Lo Russo, S., 2011. Validation of a Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas: The VESPA index. *Journal of Hydrology*, p. 233–245.

García, E. y otros, 2012. Calidad de agua de manantiales urbanos en la ciudad de Tijuana. *Revista Aristas*, pp. 34-40.

García, J. A., 2011. *Sistemas de captaciones de agua en manantiales y pequeñas quebradas*. Yuto, Argentina: INTA.

Gárfias, J., Expósito, J. & Llanos, H., 2008. Delimitación de las zonas de protección mediante métodos analíticos y un modelo numérico de agua. *Boletín Geológico y Minero*, 119(1), pp. 7-20.

Genchi, S. A., Carbone, M. E., Piccolo, M. C. & Perillo, G. M. E., 2011. Clasificación geomorfológica automatizada en terrazas del Noreste del Macizo Norpatagónico, Argentina. *Geofocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, Issue 11, pp. 182-206.

GHI, 2012. *Glosario Hidrológico Internación*. Suiza: Organización Meteorológica Mundial-Organización de las Naciones Unidas para la Educación y la Ciencia.

Gil, J., 2015. *Recursos hidrogeológicos*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

- Goldscheider, N., 2010. Delineation of spring protection zones. En: N. Kresic & Z. Stevanovic, edits. *Groundwater Hydrology of Springs*. Oxford, Reino Unido: Butterworth Heinemann, p. 305–338.
- González Abraham, A., Fagundo-Castillo, J. R., Carrillo Rivera, J. J. & Rodríguez Estrella, R., 2012. Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), pp. 319-333.
- González Cortés, J. C., Cabrera González, A. & Ayala Gómez, J. M., 2006. Flujo, calidad de agua y uso potencial de los manantiales de la microcuenca Atécuaro, Morelia, Michoacán, México. *Biológicas*, Issue 8, pp. 31-46.
- Hanich, L. y otros, 2008. A multicriteria approach for well drilling in productive zones of fissured systems. *Hydrogeology Sciences Journal*, 53(1), pp. 192-203.
- Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), pp. 96-99.
- He, Q. y otros, 2010. The use of nitrate, bacteria and fluorescent tracers to characterize groundwater recharge and contamination in a karst catchment, Chongqing, China. Volumen 18, p. 1281–1289.
- Herrera, J. B., 2008. Acuíferos y aguas subterráneas. En: *Manantiales de Andalucía*. Sevilla: Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, pp. 22-31.
- IFOMEGEM, 2014. *Carta Geológica del Estado de México escala 1:250,000*. Juriquilla: Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México.
- IGME, 2009a. *Perímetro de protección de los manantiales "Fuente Marbella, Fuenfría y Zarzadilla" de abastecimiento a Luque, Baena y Zuheros (Córdoba)*. España: Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME, 2009b. *Perímetro de protección del manantial "Fuente Bernabé" de abastecimiento al municipio de Carcabuey (Córdoba)*. Córdoba: Instituto Geológico y Minero de España.
- INECC, 2012. *Vegetación y uso de suelo*. Metepec: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INECC, 2017. *Escenarios de cambio climático*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INEGI, 1963. *VIII Censo General de Población y Vivienda 1960, Estado de México. Tabulados Básicos*. Toluca: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-DGE.
- INEGI, 1970. *IX Censo General de Población y Vivienda 1970, Estado de México. Tabulados Básicos México*. Toluca: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-DGE.
- INEGI, 1983. *X Censo General de Población y Vivienda 1980, Estado de México. Tabulados Básicos*. Toluca: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática .

INEGI, 1991. *XI Censo General de Población y Vivienda 1990, Estado de México. Tabulados Básicos*. Toluca: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INEGI, 2001. *XII Censo General de Población y Vivienda 2000, Estado de México. Tabulados Básicos*. Toluca: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INEGI, 2008. *Climas de México escala 1:1 000 000*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI, 2009. *Fisiografía escala 1:1 000 000*. [En línea] Available at: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/fisiografia/> [Último acceso: 06 febrero 2015].

INEGI, 2011. *XIII Censo General de Población y Vivienda 2010. Estado de México*. Toluca: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI, 2015. *Marco Geoestadístico 2014 versión 6.2 (DENUE 01/2015)*. México, D. F.: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI, 2015. *Marco Geoestadístico Nacional*. [En línea] Available at: <http://www.inegi.org.mx> [Último acceso: 6 febrero 2016].

INEGI, 2016. *Encuesta Intercensal 2015. Estado de México*. Toluca: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC, 2000. *Escenarios de emisiones: Resumen para responsables de políticas*. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPCC, 2013b. *Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida-Grupo de trabajo 1 del Quinto Informedel IPCC*. Madrid: Fundación Biodiversidad.

IPCC, 2013. *Quinto Informe del IPCC. Cambio Climático 2013: Bases Físicas*. Bélgica: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IPCC, 2014. *El Quinto Reporte de Evaluación del IPCC: ¿Qué implica para latinoamérica?*. Bélgica: rupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Jenness, J., 2006. *Topographic Position Index*. s.l.:s.n.

Jenness, J., 2013. *Jenness Enterprises*. [En línea] Available at: [http://www.jennessent.com/arcgis/land\\_facets.htm](http://www.jennessent.com/arcgis/land_facets.htm) [Último acceso: 28 noviembre 2015].

Kresic, N., 2010a. Sustainability and management of springs. En: N. Kresic & Z. Stevanovic, edits. *Groundwater Hydrology of Springs*. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, pp. 1-30.

Kresic, N., 2010b. Types and classifications of springs. En: N. Kresic & Z. Stevanovic, edits. *Groundwater Hydrology of Springs*. Oxford, Reino Unido: Butterworth Heinemann, pp. 31-86.

Kreye, R., Wei, M. & Reksten, D., 1996. *Defining the source area of water supply springs*. British Columbia: Ministry of Environment, Lands and Parks.

LAN, 2014. *Ley de Aguas Nacionales*. Última reforma publicada DOF ed. México: Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión.

Leonarte, T. M., 2005. *Calidad de las aguas subterráneas de Gerona y La Fe*. Nueva Gerona, Isla de la Juventud: Empresa Integral de Recursos Hidráulicos.

Liniger, H. & Weingartner, R., 1998. Montañas y recursos hídricos. *Unasylva*, 49(4).

López, S., 2010. *Sobreexplotación del agua subterránea en el acuífero del Valle de Toluca*. Toluca: UAEMex.

López, B. y otros, 2013. Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), pp. 9-26.

López, G., 2010b. *Estudio de fuentes, manantiales y pequeños espacios del agua en la cuenca media de los ríos Júcar y Cabriel*. La Mancha: El Lebrillo Cultural.

López, J. A. y otros, 1996. *Guía para la elaboración de perímetros de protección de las aguas minerales y termales*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.

López, R., Becerril, G., Benítez, C. & Cuevas, S., 2009. Medio físico biológico y social. En: *La diversidad biológica del Estado de México. Estudio del Estado*. D. F: Secretaría del Medio Ambiente, pp. 49-62.

Manzano, L. R., 2007. *Diseño de base de geodatos censales demográficos e implementación geomática de indicadores e índices hídricos*. Toluca: UAEM.

Marín, A. I. & Andreo, B., 2010. Delineating Source Protection Zones of Karst Springs. The Case Study of Villanueva del Rosario Spring (Southern Spain). *Environmental Earth Sciences*, pp. 317-322.

Martín del Campo, M. A., Esteller, M. V., Expósito, J. L. & Hirata, R., 2014. Impacts of urbanization on groundwater hydrodynamics and hydrochemistry of the Toluca Valley aquifer (Mexico). *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(5), pp. 2979-2999.

Martínez Santos, P., Díaz Alcaide, S., Castaño Castaño, S. & Hernández Espriú, A., 2014. Modelling discharge through artesian springs based on a high-resolution piezometric network. *Hydrological Process*, 28(1), p. 2251–2261.

Martínez, C., 2002. *Propuesta metodológica para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos detríticos y su implementación en el territorio español: aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Segovia)*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

Martínez, C. & García, Á., 2003. *Perímetros de Protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación del territorio*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Meinzer, O. E., 1923. *Outline of groundwater hydrology*. Water Supply Paper 494 ed. United States: United States Geological Survey.

- Monistrol, O., 2007. El trabajo de campo en investigación cualitativa. *Nure Investigación*, Issue 28.
- Morell, I., 2008. Los manantiales. En: *Manantiales de Andalucía*. Sevilla, España: Agencia Andaluza del Agua, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, pp. 28-35.
- NAS, 1995. *Mexico City's Water Supply: Improving the Outlook for Sustainability*. Washington, D.C.: National Academy of Sciences.
- Navarro, J. O., Nava, E., Troyo, E. & Cadena, J. L., 2012. Tasas de erosión e índices geomorfológicos en tres cuencas costeras al sur de la península de Baja California, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(2), pp. 229-241.
- NEH, 2012. Springs and wells. En: *National Engineering Handbook Hydrology Chapters NEH Part 650 Engineering Field Handbook*. Estados Unidos: s.n.
- Noyola, M. C. y otros, 2009. Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), pp. 395-410.
- OMS, 1993. *Estándares europeos de la calidad del agua potable*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud (OMS).
- ONU, 2017. *Escenarios hidrológicos mundiales en el 2050: explorar los futuros alternativos de los recursos hídricos del planeta y su uso en el 2050*. París: Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos.
- OPS, 2004. *Guía para el diseño y construcción de captación de manantiales*. Lima: Organización Panamericana de la Salud.
- Ordoñez, J. J., 2011. *¿Qué es una cuenca hidrológica?*. primera ed. Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ordoñez, R., 2015. *Modelado espacio temporal de desfase y amplitud de la variabilidad climática en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago*. Tesis de Maestría.. Toluca: CIRA-UAEMex.
- Oropeza, O., 2010. *Atlas regional. Pendiente del terreno*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Oviedo, B. E., 2010. *Generación de escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de modelos globales - guía para tomadores de decisiones*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Pacheco, J., Calderón, L. & Cabrera, A., 2004. Delineación de la zona de protección hidrogeológica para el campo de pozos de la planta Mérida I en la ciudad de Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería*, 8(1), pp. 7-16.
- Paris, M., Tujchneider, O., Pérez, M. & D'Elia, M., 2014. Protección de pozos de abastecimiento. Indicadores de la calidad del agua subterránea. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4), pp. 5-22.
- Pasotti, P., 2014. *Rocas sedimentarias*. Ciudad de Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario.

- Pastor Montaña, M., 2007. *Generación de una propuesta de estrategia de conservación en las serranías montañosas costeras de Chile Central*. Santiago: Universidad de Chile.
- PEDU, 2006. *Plan Estatal de Desarrollo Urbano*. D. F.: Gobierno del Estado de México.
- Peña, F., Sulca, P. & Carpio, J. M., 2012. *Comportamiento hidrogeológico de las rocas volcánicas en la parte alta de la cuenca del río Quilca-Vitor-Chili*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico- INGEMMET.
- PNUD, 2014. *Índice de Desarrollo Humano Municipal en México: nueva metodología*. México: PNUD.
- Pochon, A. y otros, 2008. Groundwater protection in fractured media: a vulnerability-based approach for delineating protection zones in Switzerland. *Hydrogeology Journal*, Volumen 16, p. 1267–1281.
- Qian, J. y otros, 2006. Fractured-karst spring-flow protections: a case study in Jinan, China. *Hydrogeology Journal*, Volumen 14, p. 1192–1205.
- Red Campo, 2015. *Red Campo. Red para el Desarrollo Rural Sustentable A. C.* [En línea] Available at: <http://www.redcampo.org/index-9.html> [Último acceso: 11 abril 2015].
- REPDA, 2015. *Base de datos del Registro Público de Derechos de Agua*. [En línea] Available at: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115> [Último acceso: 03 Agosto 2015].
- Rocha, E., 2011. Parámetros y características de las aguas naturales. En: *Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de aguas*. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Rodríguez García, R., Martínez Muñoz, C., Hernández Vizcaino, D. d. L. V. J. & Acevedo de Pedro, M. L., 2003. Calidad del agua de fuentes de manantial en la zona básica de salud de Sigüenza. *Revista Española de de Salud Pública*, 77(3), pp. 423-432.
- Sabon, T., 2005. *Delineation of wellhead and springhead protection areas for the Kaibab Paiute Indian Reservation, Arizona*. Arizona: Northern Arizona University.
- SADS, 2013. *Landsat 8: el nuevo satélite para observar la Tierra*. Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable-Jefatura de Gabinete de Ministros.
- Samani, Z., 2000. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), pp. 265-267.
- Sánchez, F. J., 2010. *Evapotranspiración*. España: Universidad de Salamanca.
- Sánchez, K. & Velásquez, S. P. M. y. R. H., 2004. *Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica*. Sarapiquí, Costa Rica: Recursos Naturales y Ambiente..

- Santana, G., Santana, M., Antonio, X. & Campos, J., 2011. *Metodología para determinar la distribución espacial y tendencia de la diabetes mellitus utilizando Sistemas de Información Geográfica sobre Análisis Cluster*. Toluca: UAEMex.
- SDU, 2007. *Mapa de usos del suelo del Estado de México escala 1:250000*. Toluca: Secretaría de Desarrollo Urbano.
- Secretaría de Salud, 1994. *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*. s.l.:s.n.
- Shen, N., Pang, A., Li, C. & Liu, K., 2010. Study on Ecological Compensation Mechanism of Xin'an Spring Water Source Protection Zone in Shanxi Province, China. *Procedia Environmental Sciences* 2, p. 1063–1073.
- Silva García, J. T. y otros, 2016. Manantiales de la cuenca del río Duero Michoacán: operación, calidad y cantidad. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(1), pp. 55-68.
- Silva, T. y otros, 2010. Vulnerabilidad acuífera como herramienta de política ambiental para la protección de manantiales en Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(1), pp. 5-16.
- SMA, 2014a. *Distribución de las Regiones Hidrográficas y sus Subcuencas en el Estado de México*. Metepec: Secretaría de Medio Ambiente.
- SMA, 2014b. *Localización y caracterización de Manantiales en el Estado de México*. [En línea] Available at: [http://portal2.edomex.gob.mx/sma/parques\\_areas\\_naturales/manantiales\\_del\\_estado/index.htm](http://portal2.edomex.gob.mx/sma/parques_areas_naturales/manantiales_del_estado/index.htm)
- SMA, 2014. *Localización y caracterización de Manantiales en el Estado de México*. [En línea] Available at: [http://portal2.edomex.gob.mx/sma/parques\\_areas\\_naturales/manantiales\\_del\\_estado/index.htm](http://portal2.edomex.gob.mx/sma/parques_areas_naturales/manantiales_del_estado/index.htm)
- SMN, 2015. *Base de datos del CLICOM*. México: Servicio Meteorológico Nacional.
- Tayong, A., 2005. *Spring water tapping*. Buea, Cameroon: African Institute for Development.
- Thorntwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), pp. 55-94.
- Todd, D. K., 1980. *Groundwater hydrology*. Nueva York: John Wiley.
- Trček, B. & Zojer, H., 2010. Recharge of springs. En: *Groundwater Hydrology of Springs*. Estados Unidos: Butterworth Heinemann, p. 87–127.
- UNESCO, 2009. *Manual de Educación para la Sostenibilidad*. París: Organización las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- UNESCO, 2014. *El agua subterránea en un medio ambiente cambiante*. Montevideo: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura 2009-2014.

USGS, 2015. *The water cycle*. [En línea] Available at: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html#springs> [Último acceso: 18 noviembre 2015].

USGS, 2016. *Earthexplorer. Imágenes Satelitales*. [En línea] Available at: <http://earthexplorer.usgs.gov/> [Último acceso: septiembre 2016].

USGS, 2016. *Earthexplorer. U.S. Geological Survey*. [En línea] Available at: <http://earthexplorer.usgs.gov/> [Último acceso: 10 marzo 2016].

Vargas, A., 2002. Manantiales de una parte del Valle Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, Volumen 27, pp. 39-52.

Vega, M., 2014. Establece la Conagua zonas de protección para manantiales en la región oriente. *La Unión de Morelos*, 22 agosto.

Velázquez, A. y otros, 2017. Determinación de vulnerabilidad de acuíferos usando método SINTACS por aplicación de plaguicidas en suelos agrícolas en Villa Guerrero, Estado de México. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(2), pp. 111-129.

Weiss, A., 2001. *Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation*. Seattle: The Nature Conservancy.

Zhang, Q., 2015. An assessment of groundwater resource vulnerability to pollution in the Jiangjia spring basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 74(2), pp. 985-995.

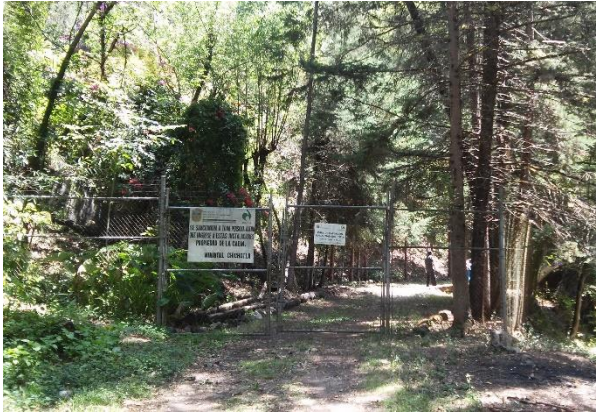
Zinck, J. A., 2012. *Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. Enschede, The Netherlands: University of Twente.

Zuñiga, H., 2011. *La inestabilidad natural del suelo y del terreno en el Ordenamiento del Territorio municipal: Ensayo Técnico*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.



## ANEXO 1. FOTOGRAFÍAS DEL CONTEXTO DE LOS MANANTIALES

Manantial Chichotla, Temascaltepec (Región 1)



Manantial Los Álamos I, Valle de Bravo (Región 1)



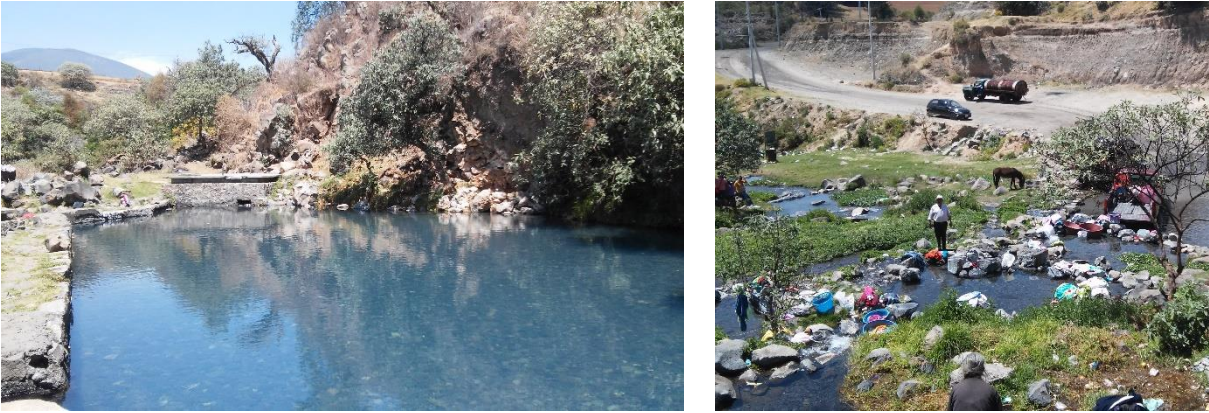
Manantial Las Huertas, Tenancingo (Región 1)



Manantial Las Fuentes, Jocotitlán (Región 2)



Manantial Las Fuentes Yече, Jocotitlán (Región 2)



Manantial Agua Fría, Valle de Bravo (Región 2)



Manantial San Pedrito, Tenango del Valle (Región 2)



Manantial Real de Arriba (El Fresno), Temascaltepec (Región 3)



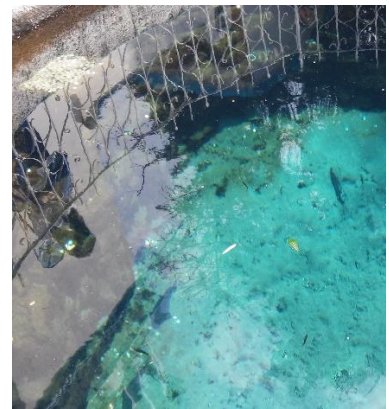
Manantial Atlihuayan, Malinalco (Región 3)



Manantial Real de Arriba (La Peña), Temascaltepec (Región 3)



Manantial Ojo De Agua, Almoloya de Juárez (Región 4)



Manantial El Sabino, Malinalco (Región 4)



Manantial La Rastra, Ixtapan del Oro (Región 5)



Manantial El Durazno, Valle de Bravo

(Región 5)



Manantial Los Fresnos, Villa Guerrero (Región 6)



Los Terrones III, Malinalco



Manantial El Durazno, Villa Guerrero

(Región 6)



Manantial El Capulín, Zinacantepec (Región 5)



Manantial Ojo de Agua y Nedeni, Jiquipilco (Región 6)



Manantial Ojo de la Virgen, Calimaya (Región 6)



Manantial La Ciénega, Calimaya (Región 6)



## ANEXO 2. FICHAS DESCRIPTIVAS DEL INVENTARIO DE MANANTIALES

| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización   |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <p><b>1. Localización</b><br/>                     Nombre del manantial: <b>La Ciénega 05 de abril de 2016</b><br/>                     Localidad o paraje: Zaragoza de Guadalupe, Paraje Las Jarillas<br/>                     Municipio: <b>Calimaya</b><br/>                     Coordenadas: Altitud 3081 msnm<br/>                     Latitud N 19° 8'0.44" Longitud W 99°40'46.75<br/>                     Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br/>                     Contacto: Pedro Valle Aguilar, asesor de la 8° regiduría, Agua Potable y Alcantarillado. Maurilio Guadarrama romero, Área servicios Públicos.</p> | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/>                     El manantial cercado por una malla. Hay 6 cajas (de cemento) de captación de los veneros, donde 4 aportan el agua a la caja del almacenaje principal. Por gravedad, luego, se tiene la bomba de distribución; con aproximadamente 2.5 km de red de drenaje para la localidad de Calimaya solamente. Se lleva a los tanques, de ahí se clora y se bombea.</p>          |   |   |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/>                     Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Del volcán Nevado de Toluca.</u><br/>                     Naturaleza de las rocas por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/>                     Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                     Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> <u>Depósitos aluviales</u><br/>                     Depósitos lacustres<br/>                     Otros <u>Conglomerados</u></p>                               | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/>                     Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/>                     Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/>                     Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/>                     Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/>                     NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/>                     Abastecimiento industrial<br/>                     Riego (indicar)<br/>                     Rural ganadero<br/>                     Sin uso<br/>                     Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br/>                     NS/NC</p>   | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/>                     Se agota excepcionalmente<br/>                     Se agota con frecuencia<br/>                     Prácticamente siempre agotado<br/>                     NS/NC</p>   |
| <p><b>4. Descripción</b><br/>                     (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>En las faldas del volcán, a 30 minutos de la cabecera, por terracería, cerca de la piscifactoría donde sus afluentes pasan a un costado de los manantiales.</u></p>   | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/>                     Fuente rural<br/>                     Lavadero<br/>                     Abrevadero<br/>                     Tanque de regulación<br/>                     Área recreativa (albercas)<br/>                     Planta de envasado<br/>                     Balneario<br/>                     Ninguna<br/>                     Otras (indicar)<br/>                     NS/NC</p>             | <p><b>8. Acceso</b><br/>                     Sin restricciones, ni dificultad<br/>                     Sin restricciones, pero complicado<br/> <u>Con restricciones</u><br/> <u>Con autorización y permiso</u></p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/>                     Deficiente<br/>                     Aceptable<br/>                     Bueno<br/> <u>Muy bueno</u><br/>                     NS/NC</p>  |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/>                     Urbano<br/>                     Industrial<br/> <u>Rural</u><br/> <u>Bosque</u><br/> <u>Pastizal</u><br/> <u>Riego (indicar) papa, maíz</u><br/>                     Sin uso<br/>                     Otros (indicar)<br/>                     NS/NC</p>  | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/>                     Pozos (indicar)<br/>                     Manantiales (indicar)<br/> <u>Manantial La Virgen para Calimaya, y otras localidades</u></p>   | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/>                     (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> <u>Científico / didáctico</u><br/> <u>Medicinal</u><br/>                     Paisajístico / pintoresco<br/>                     Medio ambiente<br/>                     Recreativo / turístico / uso público<br/>                     Histórico / sociocultural<br/>                     Económico<br/>                     Arraigo / aprecio popular<br/>                     Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/>                     Ninguna<br/>                     Contaminación (indicar tipo) <u>Posible contaminación de fungicidas por la siembra de papa sobre todo aguas arriba</u><br/>                     Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/>                     Abandono, suciedad y vertidos<br/>                     Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/>                     Usos inadecuados y/o desordenados (indicar)<br/>                     Otros (indicar)<br/>                     NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, de filtración (difuso), permanente y frío</u></p>  |   |



| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización   |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: <b>Ojo de la Virgen 05 de abril</b><br/> Localidad o paraje: Zaragoza de Guadalupe, Las Jarillas<br/> Municipio: <b>Calimaya</b><br/> Coordenadas: Altitud 3183 msnm<br/> Latitud N 19° 7'43.02" Longitud W 99°41'2.36"<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br/> Contacto: Pedro Valle Aguilar, asesor de la 8° regiduría, Agua Potable y Alcantarillado. Maurilio Guadarrama romero, Área servicios Públicos.</p> |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> El manantial cercado por una malla. Hay 3 de captación. Por gravedad, luego por bombeo se lleva a los tanques, de ahí se clora y se bombea. <u>Surte agua a Calimaya, Zaragoza y la Huerta.</u></p>  |   |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Del volcán Nevado de Toluca.</u><br/> Naturaleza de las rocas por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> <u>Depósitos aluviales</u><br/> Depósitos lacustres<br/> Otros <u>Conglomerados</u></p>   | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> Riego (indicar)<br/> Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC</p>   |
| <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>En las faldas del volcán, a 30 minutos de la cabecera, por terracería. A aproximadamente 100 m se encuentra el manantial La Ciénegas.</u></p>   | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> Fuente rural<br/> Lavadero<br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> Área recreativa (albercas)<br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> Otras (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>8. Acceso</b><br/> Sin restricciones, ni dificultad<br/> Sin restricciones, pero complicado<br/> <u>Con restricciones</u><br/> <u>Con autorización y permiso</u></p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> Aceptable<br/> Bueno<br/> <u>Muy bueno</u><br/> NS/NC</p>  |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> Urbano<br/> Industrial<br/> <u>Rural</u><br/> <u>Bosque</u><br/> <u>Pastizal</u><br/> <u>Riego (indicar) papa, maíz</u><br/> Sin uso<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p>  | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar)<br/> Manantiales (indicar)<br/> <u>Manantial La Ciénega</u></p>   | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcas con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> <u>Científico / didáctico</u><br/> <u>Medicinal</u><br/> Paisajístico /<br/> Pintoresco<br/> Medio ambiente<br/> Recreativo / turístico / uso público<br/> Histórico /<br/> sociocultural<br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> Ninguna<br/> Contaminación (indicar tipo): <u>Posible contaminación de fungicidas por la siembra de papa aguas arriba</u><br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar)<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, filtración (difuso), permanente y frío</u></p>   |   |

| <b>Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización</b>   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| <b>1. Localización</b><br>Nombre del manantial: <b>El sabino 07 de abril de 2016</b><br>Localidad o paraje: Cabecera municipal<br>Municipio: <b>Malinalco</b><br>Coordenadas Altitud 1680 msnm<br>Latitud N 18°56'10.50" Longitud W 99°29'49.30"<br>Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br>Contacto: Saúl Débora González, Director APAS.   |   | En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br>Hay varios veneros a cielo abierto, cercado por una maya, se canaliza hacia la caja de captación ubicada a 6 m para ser bombeada. Cauce del manantial: 90 cm de ancho por 20 cm de profundidad. Red de 12 plg. La mitad es para abasteciendo y la otra para riego aguas abajo. |  |
| <b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br>Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Cerro de los Ídolos.</u><br>Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br><u>Rocas ígneas</u><br><u>Rocas sedimentarias</u><br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Depósitos aluviales<br>Depósitos lacustres<br>Otros <u>volcánica</u> | <b>3. Tipo de surgencia</b><br><u>Manantial</u><br>Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br>Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br>Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br>Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br>NS/NC | <b>6. Uso del agua</b><br><u>Abastecimiento urbano</u><br>Abastecimiento industrial<br><u>Riego (indicar)</u><br>Rural ganadero<br>Sin uso<br>Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br>NS/NC  | <b>7. Comportamiento del caudal</b><br><u>No se agotan nunca</u><br>Se agota excepcionalmente<br>Se agota con frecuencia<br>Prácticamente siempre agotado<br>NS/NC   |
| <b>4. Descripción</b><br>(Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br><u>En la cabecera, en pendiente suave, a un lado del criadero de truchas donde se capta el agua de varios manantiales y de las casas.</u>  | <b>5. Instalaciones asociadas</b><br><u>Fuente urbana</u><br>Fuente rural<br>Lavadero<br>Abrevadero<br>Tanque de regulación<br>Área recreativa (albercas)<br>Planta de envasado<br>Balneario<br>Ninguna<br>Otras (indicar)<br>NS/NC   | <b>8. Acceso</b><br><u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br>Sin restricciones, pero complicado<br>Con restricciones<br>Con autorización y permiso   | <b>9. Estado de conservación del manantial</b><br><u>Deficiente</u><br>Aceptable<br>Bueno<br>Muy bueno<br>NS/NC  |
| <b>12. Uso del suelo circundante</b><br><u>Urbano</u><br>Industrial<br>Rural<br>Bosque<br>Pastizal<br>Riego (indicar) papa, maíz<br>Sin uso<br>Otros (indicar)<br>NS/NC   | <b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br>Pozos (indicar) <u>1</u><br>Manantiales (indicar)   | <b>10. Valores sectoriales</b><br>(marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br>Científico / didáctico<br>Medicinal<br>Paisajístico / pintoresco<br>Medio ambiente<br>Recreativo / turístico / uso público<br>Histórico / sociocultural<br>Económico<br>Arraigo / aprecio popular<br>Otro (indicar)   | <b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br>Ninguna<br>Contaminación (indicar tipo) <u>Basura</u><br>Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br>Abandono, suciedad y vertidos<br><u>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos</u><br>Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br><u>Sin drenaje, fosas sépticas</u><br>Otros (indicar)<br>NS/NC |
|   |   | <b>14. Tipo de manantial</b><br><u>De gravedad, filtración (difuso), permanente y frío</u>   |  |

**Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización**

|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| <p><b>1. Localización</b><br/>                 Nombre del manantial: <b>San Miguel I 07 de abril de 2016</b><br/>                 Localidad o paraje: Zona Arqueológica de Malinalco<br/>                 Municipio: <b>Malinalco</b><br/>                 Coordenadas Altitud 1851 msnm<br/>                 Latitud N 18°57'9.73" Longitud W 99°30'19.82"<br/>                 Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br/>                 Contacto: Saúl Débora González, Director APAS.</p>   |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/>                 Caja de captación 2.5x2.5x5 y 20 cm de profundidad del agua. Por gravedad, en tubos de conducción a otra caja.</p>  |   |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/>                 Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Cerro de los Ídolos.</u><br/>                 Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/>                 Rocas <u>ígneas</u><br/>                 Rocas <u>sedimentarias</u><br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Depósitos aluviales<br/>                 Depósitos lacustres<br/>                 Otros <u>volcánica</u></p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/>                 Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/>                 Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/>                 Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/>                 Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/>                 NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/>                 Abastecimiento industrial<br/>                 Riego (indicar)<br/>                 Rural ganadero<br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br/>                 NS/NC</p>  | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/>                 Se agota excepcionalmente<br/>                 Se agota con frecuencia<br/>                 Prácticamente siempre agotado<br/>                 NS/NC</p>   |
| <p><b>4. Descripción</b><br/>                 (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>En el cerro vecino de la zona arqueológica, cerca del manantial San Miguel II, con autorización por cuestiones de seguridad</u></p>   | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/>                 Fuente rural<br/>                 Lavadero<br/>                 Abrevadero<br/>                 Tanque de regulación<br/>                 Área recreativa (albercas)<br/>                 Planta de envasado<br/>                 Balneario<br/>                 Ninguna<br/>                 Otras (indicar)<br/>                 NS/NC</p>                                 | <p><b>8. Acceso</b><br/>                 Sin restricciones, ni dificultad<br/>                 Sin restricciones, pero complicado<br/>                 Con restricciones<br/> <u>Con autorización y permiso</u></p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/>                 Deficiente<br/>                 Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/>                 Muy bueno<br/>                 NS/NC</p>  |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/>                 Urbano<br/>                 Industrial<br/>                 Rural<br/> <u>Bosque</u><br/>                 Pastizal<br/>                 Riego (indicar) papa, maíz<br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (indicar)<br/>                 NS/NC</p>   | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/>                 Pozos (indicar)<br/>                 Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/>                 (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/>                 Científico / didáctico<br/>                 Medicinal<br/>                 Paisajístico / pintoresco<br/>                 Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/>                 Histórico / sociocultural<br/>                 Económico<br/>                 Arraigo / aprecio popular<br/>                 Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> <u>Ninguna</u><br/>                 Contaminación (indicar tipo)<br/>                 Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/>                 Abandono, suciedad y vertidos<br/>                 Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/>                 Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/>                 Otros (indicar)<br/>                 NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, permanente y frío</u></p>   |   |

| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización   |   |   |  |
|--|---|---|--|
| <b>1. Localización</b><br>Nombre del manantial: <b>San Miguel II 07 de abril de 2016</b><br>Localidad o paraje: Zona Arqueológica de Malinalco<br>Municipio: <b>Malinalco</b><br>Coordenadas Altitud 1817 msnm<br>Latitud N 18°57'9.70" Longitud W 99°30'19.80"<br>Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br>Contacto: Saúl Débora González, Director APAS.   |   | En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br>Caja de captación de 1.1x1.0 m. Por gravedad, en tubos de conducción a otra caja.   |  |
| <b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br>Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Cerro de los Ídolos.</u><br>Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br><u>Rocas ígneas</u><br><u>Rocas sedimentarias</u><br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Depósitos aluviales<br>Depósitos lacustres<br>Otros <u>volcánica</u>                              | <b>3. Tipo de surgencia</b><br><u>Manantial</u><br>Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br>Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br>Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br>Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br>NS/NC | <b>6. Uso del agua</b><br><u>Abastecimiento urbano</u><br>Abastecimiento industrial<br>Riego (indicar)<br>Rural ganadero<br>Sin uso<br>Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br>NS/NC  | <b>7. Comportamiento del caudal</b><br><u>No se agotan nunca</u><br>Se agota excepcionalmente<br>Se agota con frecuencia<br>Prácticamente siempre agotado<br>NS/NC   |
| <b>4. Descripción</b><br>(Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br><u>En el cerro vecino de la zona arqueológica, cerca del manantial San Miguel II, con autorización por cuestiones de seguridad</u><br><b>12. Uso del suelo circundante</b><br>Urbano<br>Industrial<br>Rural<br><u>Bosque</u><br>Pastizal<br>Riego (indicar) papa, maíz<br>Sin uso<br>Otros (indicar)<br>NS/NC | <b>5. Instalaciones asociadas</b><br><u>Fuente urbana</u><br>Fuente rural<br>Lavadero<br>Abrevadero<br>Tanque de regulación<br>Área recreativa (albercas)<br>Planta de envasado<br>Balneario<br>Ninguna<br>Otras (indicar)<br>NS/NC   | <b>8. Acceso</b><br>Sin restricciones, ni dificultad<br>Sin restricciones, pero complicado<br>Con restricciones<br><u>Con autorización y permiso</u>  | <b>9. Estado de conservación del manantial</b><br>Deficiente<br>Aceptable<br><u>Bueno</u><br>Muy bueno<br>NS/NC  |
|  | <b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br>Pozos (indicar)<br>Manantiales (indicar)  | <b>10. Valores sectoriales</b><br>(marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br>Científico / didáctico<br>Medicinal<br>Paisajístico / pintoresco<br>Medio ambiente<br><u>Recreativo / turístico / uso público</u><br>Histórico / sociocultural<br>Económico<br>Arraigo / aprecio popular<br>Otro (indicar) | <b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br><u>Ninguna</u><br>Contaminación (indicar tipo)<br>Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br>Abandono, suciedad y vertidos<br>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br>Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br>Otros (indicar)<br>NS/NC |
|  |   | <b>14. Tipo de manantial</b><br><u>De gravedad, permanente y frío</u>   |  |

**Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización**

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| <p><b>1. Localización</b><br/>                 Nombre del manantial: <b>El capulín 08 de abril de 2016</b><br/>                 Localidad o paraje: Ignacio Zaragoza, Las Huertas<br/>                 Municipio: <b>Zinacantepec</b><br/>                 Coordenadas Altitud 2903 msnm<br/>                 Latitud N 19°14'28.08" Longitud W 99°47'8.22"<br/>                 Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br/>                 Contacto: Jorge Luis González, Inspector de Medio Ambiente. Juan Carlos, trabajador. Carlos Ramírez Valdés, jefe.</p>    |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/>                 Caja de captación de 15x10m y 1.20 de alto. Algunas de las tapas están selladas. Una pequeña cantidad del caudal alimenta al río. Con el agua del río riegan.</p>   |  |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/>                 Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Del volcán Nevado de Toluca.</u><br/>                 Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> <u>Depósitos aluviales</u><br/>                 Depósitos lacustres<br/>                 Otros _____</p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/>                 Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/>                 Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/>                 Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/>                 Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/>                 NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/>                 Abastecimiento industrial<br/>                 Riego (indicar)<br/>                 Rural ganadero<br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br/>                 NS/NC</p>  | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/>                 Se agota excepcionalmente<br/>                 Se agota con frecuencia<br/>                 Prácticamente siempre agotado<br/>                 NS/NC</p>  |
| <p><b>4. Descripción</b><br/>                 (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>En terracería, alimenta al río</u></p>  | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/>                 Fuente rural<br/>                 Lavadero<br/>                 Abrevadero<br/>                 Tanque de regulación<br/>                 Área recreativa (albercas)<br/>                 Planta de envasado<br/>                 Balneario<br/>                 Ninguna<br/>                 Otras (indicar)<br/>                 NS/NC</p>                                 | <p><b>8. Acceso</b><br/> <u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br/>                 Sin restricciones, pero complicado<br/>                 Con restricciones<br/>                 Con autorización y permiso</p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/>                 Deficiente<br/>                 Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/>                 Muy bueno<br/>                 NS/NC</p>   |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/>                 Urbano<br/>                 Industrial<br/> <u>Rural</u><br/> <u>Bosque</u><br/>                 Pastizal<br/> <u>Riego (indicar) chile, chícharo, papa, aba, maíz</u><br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (indicar)<br/>                 NS/NC</p>   | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/>                 Pozos (indicar)<br/>                 Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/>                 (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/>                 Científico / didáctico<br/>                 Medicinal<br/>                 Paisajístico / pintoresco<br/>                 Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/>                 Histórico / sociocultural<br/>                 Económico<br/>                 Arraigo / aprecio popular<br/>                 Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/>                 Ninguna<br/>                 Contaminación (indicar tipo) <u>Posible por cultivos</u><br/>                 Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/>                 Abandono, suciedad y vertidos<br/>                 Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/>                 Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/>                 Otros (indicar)<br/>                 NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, permanente y frío</u></p>   |  |

| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización  |   |  |   |
|---|---|--|---|
| <b>1. Localización</b><br>Nombre del manantial: <b>Ojo del agua 08 de abril de 2016</b><br>Localidad o paraje: Cabecera municipal<br>Municipio: <b>Almoloya de Juárez</b><br>Coordenadas Altitud 2604 msnm<br>Latitud N 19°21'52.80" Longitud W 99°45'35.50"<br>Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br>Contacto: --   |   | En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br>Emerge en donde se localiza el estanque de peces. Parte del gua se destina a la cabecera con su caja de captación y la otra al balneario.  |   |
| <b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br>Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: --<br>Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br><u>Rocas ígneas</u><br>Rocas sedimentarias<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Depósitos aluviales<br>Depósitos lacustres<br>Otros _____<br><b>4. Descripción</b><br>(Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br><u>En la cabecera, en el patio de la parroquia, está un estanque de peces donde emerge el agua del manantial. De ahí, parte del gua se destina al balneario y de ahí sigue su curso al río que se junta con un drenaje.</u><br><b>12. Uso del suelo circundante</b><br>Urbano<br>Industrial<br>Rural<br>Bosque<br>Pastizal<br>Riego (indicar)<br>Sin uso<br>Otros (indicar)<br>NS/NC | <b>3. Tipo de surgencia</b><br><u>Manantial</u><br>Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br>Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br>Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br>Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br>NS/NC<br><b>5. Instalaciones asociadas</b><br><u>Fuente urbana</u><br>Fuente rural<br><u>Lavadero</u><br>Abrevadero<br>Tanque de regulación<br><u>Área recreativa (albercas)</u><br>Planta de envasado<br><u>Balneario</u><br>Ninguna<br>Otras (indicar)<br>NS/NC<br><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br>Pozos (indicar)<br>Manantiales (indicar) | <b>6. Uso del agua</b><br><u>Abastecimiento urbano</u><br>Abastecimiento industrial<br>Riego (indicar)<br>Rural ganadero<br>Sin uso<br>Otros ( <u>Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.</u> ) (indicar):<br><u>Balneario, recreativo-baño</u><br>NS/NC<br><b>8. Acceso</b><br><u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br>Sin restricciones, pero complicado<br>Con restricciones<br>Con autorización y permiso<br><b>10. Valores sectoriales</b><br>(marcas con una X sólo los que posean cierto interés)<br>Científico / didáctico<br>Medicinal<br>Paisajístico / pintoresco<br>Medio ambiente<br>Recreativo / turístico / <u>uso público</u><br>Histórico / sociocultural<br>Económico<br>Arraigo / aprecio popular<br>Otro (indicar)<br><b>14. Tipo de manantial</b><br><u>De fondo o artesiano, permanente y frío</u> | <b>7. Comportamiento del caudal</b><br><u>No se agotan nunca</u><br>Se agota excepcionalmente<br>Se agota con frecuencia<br>Prácticamente siempre agotado<br>NS/NC<br><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br>Deficiente<br><u>Aceptable</u><br>Bueno<br>Muy bueno<br>NS/NC<br><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br>Ninguna<br>Contaminación (indicar tipo) <u>por materia orgánica de los peces y metales (monedas)</u><br>Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br>Abandono, suciedad y vertidos<br>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br>Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br>Otros (indicar)<br>NS/NC |

| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización   |  |  |  |
|--|--|--|--|
| <b>1. Localización</b><br>Nombre del manantial: <b>Las Huertas 12 de abril de 2016</b><br>Localidad o paraje: Monte de Pozo<br>Municipio: <b>Tenancingo</b><br>Coordenadas Altitud 2450 msnm<br>Latitud N 19° 0'16.80" Longitud W 99°36'38.00"<br>Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br>Contacto:   |  | En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br>No se logró dar con las cajas de captación, no se encontró el camino, quedamos cercanos a él.  |  |
| <b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br>Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: --<br>Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br>Rocas ígneas<br>Rocas sedimentarias<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Depósitos aluviales<br>Depósitos lacustres<br>Otros _____<br><b>4. Descripción</b><br>(Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br><u>A 25 minutos de la cabecera, en el cerro, 15 minutos caminando. Manantial en conflicto con Santa Ana.</u><br><b>12. Uso del suelo circundante</b><br>Urbano<br>Industrial<br>Rural<br><u>Bosque</u><br>Pastizal<br>Riego (indicar)<br>Sin uso<br>Otros (indicar)<br>NS/NC | <b>3. Tipo de surgencia</b><br><u>Manantial</u><br>Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br>Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br>Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br>Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br>NS/NC<br><b>5. Instalaciones asociadas</b><br><u>Fuente urbana</u><br>Fuente rural<br>Lavadero<br>Abrevadero<br>Tanque de regulación<br>Área recreativa (albercas)<br>Planta de envasado<br>Balneario<br>Ninguna<br>Otras (indicar)<br>NS/NC<br><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br>Pozos (indicar)<br>Manantiales (indicar) | <b>6. Uso del agua</b><br><u>Abastecimiento urbano</u><br>Abastecimiento industrial<br>Riego (indicar)<br>Rural ganadero<br>Sin uso<br>Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br><u>NS/NC</u><br><b>8. Acceso</b><br>Sin restricciones, ni dificultad<br><u>Sin restricciones, pero complicado</u><br>Con restricciones<br>Con autorización y permiso<br><b>10. Valores sectoriales</b><br>(marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br>Científico / didáctico<br>Medicinal<br>Paisajístico / pintoresco<br>Medio ambiente<br><u>Recreativo / turístico / uso público</u><br>Histórico / sociocultural<br>Económico<br>Arraigado / aprecio popular<br>Otro (indicar)<br><b>14. Tipo de manantial</b><br><u>De gravedad, filtración (difuso), permanente y frío</u> | <b>7. Comportamiento del caudal</b><br><u>No se agotan nunca</u><br>Se agota excepcionalmente<br>Se agota con frecuencia<br>Prácticamente siempre agotado<br>NS/NC<br><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br>Deficiente<br>Aceptable<br><u>Bueno</u><br>Muy bueno<br>NS/NC<br><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br>Ninguna<br>Contaminación (indicar tipo)<br>Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br>Abandono, suciedad y vertidos<br>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br>Usos inadecuados y/o desordenados (indicar): <u>destrucción de la caja de almacenamiento por un conflicto.</u><br>Otros (indicar)<br>NS/NC |

| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización   |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: Las <b>Fuentes 14 de abril de 2016</b><br/> Localidad o paraje: Las <b>Fuentes</b><br/> Municipio: <b>Jocotitlán</b><br/> Coordenadas      Altitud 2600 msnm<br/> Latitud N 19°42'8.49"      Longitud W 99°47'35.35"<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br/> Contacto: Sr. Leopoldo Velázquez, Organismo de Agua Potable y auxiliares</p>   |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> Protegido por una pequeña caja de protección donde emana el manantial, se dirige a los lavaderos y a 4 cárcamos grandes (4x4x1.5 m aprox) y 2 pequeños (2x2x1.5). Por bombeo 9 litros por segundo /24 hrs.</p>   |   |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Cerro de Jocotitlán.</u><br/> Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> Rocas sedimentarias<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Depósitos aluviales<br/> Depósitos lacustres<br/> Otros _____</p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento</u><br/> <u>urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> Riego (indicar)<br/> Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> Otros (Piscicultura, <u>balneario, recreativo-baño, etc.</u>) (indicar):<br/> <u>Albercas, Lavaderos</u><br/> NS/NC</p>   | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC</p>   |
| <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>En la cabecera, en las faldas del Cerro de Joco. Dentro del Parque recreativo. Próximo a la Planta de Tratamiento de Agua por drenaje fluvial, para agricultura</u></p>   | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> Fuente rural<br/> <u>Lavadero</u><br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> <u>Área recreativa (albercas)</u><br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> Otras (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>8. Acceso</b><br/> <u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br/> Sin restricciones, pero complicado<br/> Con restricciones<br/> Con autorización y permiso</p>   | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/> Muy bueno<br/> NS/NC</p>  |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> ✓ <u>Urbano</u><br/> Industrial<br/> Rural<br/> Bosque<br/> Pastizal<br/> Riego (indicar)<br/> Sin uso<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p>  | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar) <u>1 a Santa Clara</u> (medio pueblo)<br/> Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcas con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> Científico / didáctico<br/> Medicinal<br/> Paisajístico / pintoresco<br/> Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/> <u>Histórico / sociocultural</u><br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> Ninguna<br/> Contaminación (indicar tipo) <u>Fosas sépticas en las orillas de la cabecera</u><br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> <u>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos</u><br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, permanente y frío</u></p>  |   |



| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización   |  |   |  |
|--|--|---|--|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: Las <b>Fuentes IV (Yeche) 14 de abril de 2016</b><br/> Localidad o paraje: Santiago Yeche<br/> Municipio: <b>Jocotitlán</b><br/> Coordenadas Altitud 2600 msnm<br/> Latitud N 19°43'40.46" Longitud W 99°41'6.42"<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br/> Contacto: Sr. Leopoldo Velázquez, Organismo de Agua Potable y auxiliares</p>  |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> Protegido por una caja de captación (cárcamo), seguido de un estanque abierto, una parte canalizada para riego, otra cae para lavar ropa y otra es interceptados con los tubos que van a las instalaciones de bombeo para llenar pipas. Abastece al pueblo.<br/> Gasto de 250.8litros por segundo.</p> |  |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Cerro de Jocotitlán.</u><br/> Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Depósitos aluviales<br/> Depósitos lacustres<br/> Otros <u>Conglomerados</u></p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> <u>Riego (indicar): maíz</u><br/> Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br/> <u>Pipas (venta), uso doméstico, para tomar.</u><br/> NS/NC</p>   | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC</p>  |
| <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 30 minutos de la cabecera, al SE, se llega por calle pavimentada, para bajar caminando en un tramo pequeño de terracería.</u><br/> <u>Aguas arriba hay pequeños manantiales con los que llenan garrafones de agua y sirven para abrevadero</u></p>  | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> <u>Fuente rural</u><br/> <u>Lavadero</u><br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> Área recreativa (albercas)<br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> Otras (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>8. Acceso</b><br/> <u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br/> Sin restricciones, pero complicado<br/> Con restricciones<br/> Con autorización y permiso</p>   | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/> Muy bueno<br/> NS /NC</p>  |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> ✓ <u>Urbano</u><br/> Industrial<br/> <u>Rural</u><br/> Bosque<br/> <u>Pastizal</u><br/> <u>Riego (indicar)</u><br/> Sin uso<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar)<br/> Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> Científico / didáctico<br/> Medicinal<br/> Paisajístico / pintoresco<br/> Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/> <u>Histórico / sociocultural</u><br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p>   | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> Ninguna<br/> Contaminación (indicar tipo) <u>cultivos</u><br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, permanente y frío</u></p>  |  |

| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización  |   |  |  |
|---|---|--|--|
| <b>1. Localización</b><br>Nombre del manantial: <b>La Rastra 15 de abril de 2016</b><br>Localidad o paraje: Cerro<br>Municipio: <b>Ixtapan del Oro</b><br>Coordenadas Altitud 1925 msnm<br>Latitud N 19°17'24.44" Longitud W 100°15'41.00"<br>Nombre del río/arroyo que origina (si procede): a la cascada<br>Contacto:   |   | En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br>2 cajas de concreto de captación, la principal de mayor caudal, abastece a la cabecera, con varios tubos de conducción por gravedad. Otra parte del agua se canaliza para riego.   |  |
| <b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br>Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Cerro de Jocotitlán.</u><br>Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br><u>Rocas ígneas</u><br><u>Rocas sedimentarias</u><br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Depósitos aluviales<br>Depósitos lacustres<br>Otros <u>Conglomerados</u> | <b>3. Tipo de surgencia</b><br><u>Manantial</u><br>Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br>Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br>Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br>Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br>NS/NC | <b>6. Uso del agua</b><br><u>Abastecimiento urbano</u><br>Abastecimiento industrial<br><u>Riego (indicar): maíz, aguacate</u><br>Rural ganadero<br>Sin uso<br>Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar): <u>Recreativo, albercas temporales</u><br>NS/NC  | <b>7. Comportamiento del caudal</b><br><u>No se agotan nunca</u><br>Se agota excepcionalmente<br>Se agota con frecuencia<br>Prácticamente siempre agotado<br>NS/NC   |
| <b>4. Descripción</b><br>(Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br><u>A 15 minutos de la cabecera, aguas arriba, en un centro recreativo. 3 ríos: San Jua, Xoconusco, Miahuatlan. Hay un pequeño bordo cerca en malas condiciones. Parte de agua del manantial y de 3 ríos dan a la Cascada el Salto de Chihuahua</u>                                   | <b>5. Instalaciones asociadas</b><br><u>Fuente urbana</u><br><u>Fuente rural</u><br>Lavadero<br>Abrevadero<br>Tanque de regulación<br><u>Área recreativa (albercas)</u><br>Planta de envasado<br>Balneario<br>Ninguna<br>Otras (indicar)<br>NS/NC   | <b>8. Acceso</b><br><u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br>Sin restricciones, pero complicado<br>Con restricciones<br>Con autorización y permiso   | <b>9. Estado de conservación del manantial</b><br>Deficiente<br>Aceptable<br><u>Bueno</u><br>Muy bueno<br>NS/NC  |
| <b>12. Uso del suelo circundante</b><br>✓ Urbano<br>Industrial<br><u>Rural</u><br><u>Bosque</u><br><u>Pastizal</u><br><u>Riego (indicar)</u><br>Sin uso<br>Otros (indicar)<br>NS/NC   | <b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br>Pozos (indicar)<br>Manantiales (indicar)  | <b>10. Valores sectoriales</b><br>(marcas con una X sólo los que posean cierto interés)<br>Científico / didáctico<br>Medicinal<br>Paisajístico / pintoresco<br>Medio ambiente<br><u>Recreativo / turístico / uso público</u><br><u>Histórico / sociocultural</u><br>Económico<br>Arraigo / aprecio popular<br>Otro (indicar) | <b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br>Ninguna<br>Contaminación (indicar tipo) <u>cultivos de maíz aguacate, durazno, plátano</u><br>Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br>Abandono, suciedad y vertidos<br>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br>Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br>Otros (indicar)<br>NS/NC |
|   |   | <b>14. Tipo de manantial</b><br><u>De gravedad, de filtración, permanente y frío</u>   |  |

| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización  |   |   |   |
|---|---|---|---|
| <b>1. Localización</b><br>Nombre del manantial: <b>San Pedrito 16 de abril de 2016</b><br>Localidad o paraje: Cerro el Calvario, cabecera<br>Municipio: <b>Tenango del Valle</b><br>Coordenadas Altitud msnm<br>Latitud N 19° 6'11.09" Longitud W 99°35'36.26"<br>Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br>Contacto: Marcos Martínez Castro SAPAS   |   | En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br>Caseta de protección, se bombea a la caja de almacenamiento, a 10 m arriba, donde también llegan las aguas de los otros dos manantiales y del pozo que abastece a la cabecera.  |   |
| <b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br>Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Cerro de Jocotitlán.</u><br>Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br><u>Rocas ígneas</u><br>Rocas sedimentarias<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Depósitos aluviales<br>Depósitos lacustres<br>Otros Conglomerados | <b>3. Tipo de surgencia</b><br><u>Manantial</u><br>Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br>Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br>Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br>Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br>NS/NC | <b>6. Uso del agua</b><br><u>Abastecimiento urbano</u><br>Abastecimiento industrial<br>Riego (indicar):<br>Rural ganadero<br>Sin uso<br>Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br>NS/NC  | <b>7. Comportamiento del caudal</b><br><u>No se agotan nunca</u><br>Se agota excepcionalmente<br>Se agota con frecuencia<br>Prácticamente siempre agotado<br>NS/NC  |
| <b>4. Descripción</b><br>(Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br><u>En las faltas del Cerro el Calvario, en el Parque Humbolt.</u>  | <b>5. Instalaciones asociadas</b><br><u>Fuente urbana</u><br>Fuente rural<br>Lavadero<br>Abrevadero<br>Tanque de regulación<br>Área recreativa (albercas)<br>Planta de envasado<br>Balneario<br>Ninguna<br>Otras (indicar) <u>depósitos donde estaba el agua.</u><br>NS/NC  | <b>8. Acceso</b><br><u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br>Sin restricciones, pero complicado<br>Con restricciones<br>Con autorización y permiso  | <b>9. Estado de conservación del manantial</b><br>Deficiente<br>Aceptable<br><u>Bueno</u><br>Muy bueno<br>NS/NC   |
| <b>12. Uso del suelo circundante</b><br>✓ <u>Urbano</u><br>Industrial<br><u>Rural</u><br>Bosque<br>Pastizal<br>Riego (indicar)<br>Sin uso<br>Otros (indicar)<br>NS/NC   | <b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br>Pozos (indicar) <u>1</u><br>Manantiales (indicar)<br>2 Piña Chan y León Guzmán  | <b>10. Valores sectoriales</b><br>(marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br>Científico / didáctico<br>Medicinal<br><u>Paisajístico</u> /<br><u>pintoresco</u><br>Medio ambiente<br><u>Recreativo / turístico / uso público</u><br><u>Histórico</u> /<br><u>sociocultural</u><br>Económico<br>Arraigo / aprecio popular<br>Otro (indicar) | <b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br>Ninguna<br>Contaminación (indicar tipo)<br><u>Doméstica aguas arriba</u><br>Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br>Abandono, suciedad y vertidos<br><u>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos</u><br>Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br>Otros (indicar)<br>NS/NC |
|   |   | <b>14. Tipo de manantial</b><br>De <u>gravedad, permanente y frío</u>   |   |

| <p align="center"><b>Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización</b></p>  |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: <b>Los Fresno 18 de abril de 2016</b><br/> Localidad o paraje: El Potrero de Santa María<br/> Municipio: <b>Villa Guerrero</b><br/> Coordenadas Altitud 2066 msnm<br/> Latitud N 18°58'28.80" Longitud W 99°38'33.50"<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br/> Contacto: José García Serón, Brigada Agua potable</p>                           |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> 12 cajas de captación de agua (6 grandes y 6 chicas) distribuidas alrededor y próximas al tanque de almacenamiento, donde el agua llega por gravedad para posteriormente ser bombeada a la cabecera y ser clorada con gas-cloro. Las cajas no son fáciles de visualizar, están alejadas unas de otras, y tapadas por hiervas, en pendientes muy pronunciadas. Hay más manantiales destinados al riego.</p> |   |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea:<br/> Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> Rocas sedimentarias<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Depósitos aluviales<br/> Depósitos lacustres<br/> Otros</p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> Riego (indicar):<br/> Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br/> NS/NC</p>   | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC</p>   |
| <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 30-40 minutos del poblado caminando en cañada (pendientes pronunciada). Difícil acceso, zona de riesgo por derrumbes. Arriba pasa la carretera V. Guerrero-Tenancingo. Está el río Texcaltenco</u></p>                                    | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> Fuente rural<br/> Lavadero<br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> Área recreativa (albercas)<br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> Otras (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>8. Acceso</b><br/> Sin restricciones, ni dificultad<br/> <u>Sin restricciones, pero complicado</u><br/> Con restricciones<br/> Con autorización y permiso</p>   | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> <u>Aceptable</u><br/> Bueno<br/> Muy bueno<br/> NS/NC</p>  |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> ✓ <u>Urbano</u><br/> Industrial<br/> Rural<br/> <u>Bosque</u><br/> Pastizal<br/> <u>Riego (indicar): invernaderos de flor</u><br/> Sin uso<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p>  | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar) <u>1</u><br/> Manantiales (indicar)<br/> 1 Coponial (gravedad)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> Científico / didáctico<br/> Medicinal<br/> Paisajístico / pintoresco<br/> Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/> <u>Histórico / sociocultural</u><br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p>   | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> Ninguna<br/> Contaminación (indicar tipo)<br/> <u>Doméstica aguas arriba y cultivos</u><br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> <u>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos</u><br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, permanente y frío</u></p>  |   |

| Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización  |   |   |  |
|---|---|---|--|
| <b>1. Localización</b><br>Nombre del manantial: <b>El Durazno 18 de abril de 2016</b><br>Localidad o paraje: San Bartolo<br>Municipio: <b>Villa Guerrero</b><br>Coordenadas Altitud 2440 msnm<br>Latitud N 19° 0'51.85" Longitud W 99°40'19.75"<br>Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br>Contacto: José Fuentes Mendoza, Presidente de agua Potable de San Francisco                                       |   | En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br>La caja de captación de agua está completamente sellada, sólo cuando se le hace mantenimiento la botan. Bombeada al tanque de almacenamiento en el poblado San Miguel (donde se hizo el muestreo en la tubería).                              |  |
| <b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br>Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea:<br>Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br><u>Rocas ígneas</u><br><u>Rocas sedimentarias</u><br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br>Depósitos aluviales<br>Depósitos lacustres<br>Otros <u>Conglomerados</u> | <b>3. Tipo de surgencia</b><br><u>Manantial</u><br>Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br>Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br>Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br>Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br>NS/NC | <b>6. Uso del agua</b><br><u>Abastecimiento urbano</u><br>Abastecimiento industrial<br>Riego (indicar):<br>Rural ganadero<br>Sin uso<br>Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br>NS/NC  | <b>7. Comportamiento del caudal</b><br><u>No se agotan nunca</u><br>Se agota excepcionalmente<br>Se agota con frecuencia<br>Prácticamente siempre agotado<br>NS/NC   |
| <b>4. Descripción</b><br>(Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br><u>A 10 minutos del poblado caminando en cañada Alimenta al Río Tintojo del manantial la Estrella.</u>   | <b>5. Instalaciones asociadas</b><br><u>Fuente urbana</u><br>Fuente rural<br>Lavadero<br>Abrevadero<br>Tanque de regulación<br>Área recreativa (albercas)<br>Planta de envasado<br>Balneario<br>Ninguna<br>Otras (indicar)<br>NS/NC   | <b>8. Acceso</b><br>Sin restricciones, ni dificultad<br>Sin restricciones, pero complicado<br>Con restricciones<br><u>Con autorización y permiso</u>  | <b>9. Estado de conservación del manantial</b><br>Deficiente<br>Aceptable<br><u>Bueno</u><br>Muy bueno<br>NS/NC  |
| <b>12. Uso del suelo circundante</b><br>✓ <u>Urbano</u><br>Industrial<br>Rural<br><u>Bosque</u><br>Pastizal<br><u>Riego (indicar)</u><br>Sin uso<br>Otros (indicar)<br>NS/NC  | <b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br>Pozos (indicar)<br>Manantiales (indicar)  | <b>10. Valores sectoriales</b><br>(marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br>Científico / didáctico<br>Medicinal<br>Paisajístico / pintoresco<br>Medio ambiente<br><u>Recreativo / turístico / uso público</u><br><u>Histórico</u> / <u>sociocultural</u><br>Económico<br>Arraigo / aprecio popular<br>Otro (indicar) | <b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br>Ninguna<br>Contaminación (indicar tipo):<br><u>doméstica aguas arriba y cultivos (invernaderos de flor)</u><br>Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br>Abandono, suciedad y vertidos<br><u>Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos</u><br>Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br>Otros (indicar)<br>NS/NC |
|   |   | <b>14. Tipo de manantial</b><br><u>De gravedad, permanente y frío</u>   |  |

| <b>Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización</b>   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: <b>El Durazno 19 de abril de 2016</b><br/> Localidad o paraje: El Durazno<br/> Municipio: <b>Valle de Bravo</b><br/> Coordenadas Altitud 1667 msnm<br/> Latitud N 19°12'16.20" Longitud W 100°12'2.20"<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br/> Contacto: Lic. Eduardo García, Área de agua potable y manantiales (APAS)</p>  |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> Captación a cielo abierto, canalizada con una parte abierta también y después entubada. Abastece a la población de Colorines a aproximadamente 8 km por conducción por gravedad.</p>  |  |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: Cerro el Durazno<br/> Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Depósitos aluviales<br/> Depósitos lacustres<br/> Otros <u>Conglomerados</u></p> | <p><b>3. Tipo de surgencia Manantial</b><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua Abastecimiento</b><br/> <u>urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> Riego (indicar):<br/> Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br/> NS/NC</p>  | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC</p>  |
| <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 30 minutos de la cabecera, cerca de la presa, pasando las compuertas.</u></p>  | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> Fuente rural<br/> Lavadero<br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> Área recreativa (albercas)<br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> Otras (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>8. Acceso</b><br/> <u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br/> Sin restricciones, pero complicado<br/> Con restricciones<br/> Con autorización y permiso</p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> <u>Aceptable</u><br/> Bueno<br/> Muy bueno<br/> NS/NC</p>   |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> Urbano<br/> Industrial<br/> Rural<br/> <u>Bosque</u><br/> Pastizal<br/> Riego (indicar)<br/> Sin uso<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar)<br/> Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> Científico / didáctico<br/> Medicinal<br/> Paisajístico / pintoresco<br/> Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/> Histórico / sociocultural<br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> Ninguna<br/> Contaminación (indicar tipo): <u>posible por estar a cielo abierto</u><br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |
|   |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, permanente y frío</u></p>   |  |

| <p align="center"><b>Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización</b></p>   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: <b>Los Álamos I 19 de abril de 2016</b><br/> Localidad o paraje: Acatitlan<br/> Municipio: <b>Valle de Bravo</b><br/> Coordenadas Altitud 1667 msnm<br/> Latitud N 19°10'15.96" Longitud W 100° 4'25.27"<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br/> Contacto: Lic. Eduardo García, Área de agua potable y manantiales (APAS)</p>                      |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> Tanque de captación abierta. Almacenes para rebombeo de una parte del agua para enviarla por gravedad a la población de la cabecera de Valle, la otra sigue su cauce para realimentar el río vecino</p>   |  |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea:<br/><br/> Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> Rocas sedimentarias<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Depósitos aluviales<br/> Depósitos lacustres<br/> Otros</p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> Riego (indicar):<br/> Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br/> NS/NC</p>  | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC</p>  |
| <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 30 minutos en auto de la cabecera, dentro de propiedad privada (Rancho los Torado). Se baja por un sendero. Unos 15 minutos caminando. Entrada sólo con autorización</u></p>   | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> Fuente rural<br/> Lavadero<br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> Área recreativa (albercas)<br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> Otras (indicar)<br/> <u>Rancho</u><br/> NS/NC</p>  | <p><b>8. Acceso</b><br/> Sin restricciones, ni dificultad<br/> Sin restricciones, pero complicado<br/> Con restricciones<br/> <u>Con autorización y permiso</u></p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/> Muy bueno<br/> NS/NC</p>   |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> Urbano<br/> Industrial<br/> Rural<br/> <u>Bosque</u><br/> Pastizal<br/> Riego (indicar)<br/> Sin uso<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p>   | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar)<br/> Manantiales (indicar)<br/> 5 manantiales más</p>   | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> Científico / didáctico<br/> Medicinal<br/> <u>Paisajístico</u> /<br/> <u>pintoresco</u><br/> Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/> Histórico /<br/> sociocultural<br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> <u>Ninguna</u><br/> Contaminación (indicar tipo):<br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |
|   |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, filtración, permanente y frío</u></p>   |  |

**Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización**

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| <p><b>1. Localización</b><br/>                 Nombre del manantial: <b>Agua Fría 19 de abril de 2016</b><br/>                 Localidad o paraje: Cabecera<br/>                 Municipio: <b>Valle de Bravo</b><br/>                 Coordenadas Altitud 1667 msnm<br/>                 Latitud N 19°10'15.96" Longitud W 100° 4'25.27"<br/>                 Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br/>                 Contacto: Lic. Eduardo García, Área de agua potable y manantiales (APAS)</p>   |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/>                 Caseta de captación abierta. 5 cajas de almacenamiento y bombeo. Olvidaron las llaves.</p>  |  |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/>                 Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: de los mismos cerros<br/><br/>                 Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/>                 Rocas sedimentarias<br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Depósitos aluviales<br/>                 Depósitos lacustres<br/>                 Otros</p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/>                 Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/>                 Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/>                 Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/>                 Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/>                 NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/>                 Abastecimiento industrial<br/>                 Riego (indicar):<br/>                 Rural ganadero<br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br/>                 NS/NC</p>  | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/>                 Se agota excepcionalmente<br/>                 Se agota con frecuencia<br/>                 Prácticamente siempre agotado<br/>                 NS/NC</p>  |
| <p><b>4. Descripción</b><br/>                 (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 30 minutos en auto de la cabecera, dentro de propiedad privada (Rancho los Torado). Se baja por un sendero. Unos 15 minutos caminando. Entrada sólo con autorización. Canal pluvial</u></p>   | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/>                 Fuente rural<br/>                 Lavadero<br/>                 Abrevadero<br/>                 Tanque de regulación<br/>                 Área recreativa (albercas)<br/>                 Planta de envasado<br/>                 Balneario<br/>                 Ninguna<br/>                 Otras (indicar)<br/>                 NS/NC</p>                                 | <p><b>8. Acceso</b><br/>                 Sin restricciones, ni dificultad<br/>                 Sin restricciones, pero complicado<br/>                 Con restricciones<br/> <u>Con autorización y permiso</u></p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/>                 Deficiente<br/>                 Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/>                 Muy bueno<br/>                 NS/NC</p>   |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> <u>Urbano</u><br/>                 Industrial<br/>                 Rural<br/> <u>Bosque</u><br/>                 Pastizal<br/>                 Riego (indicar)<br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (indicar)<br/>                 NS/NC</p>   | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/>                 Pozos (indicar)<br/>                 Manantiales (indicar)<br/>                 5 manantiales más</p>   | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/>                 (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/>                 Científico / didáctico<br/>                 Medicinal<br/> <u>Paisajístico</u> /<br/> <u>pintoresco</u><br/>                 Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/>                 Histórico /<br/>                 sociocultural<br/>                 Económico<br/>                 Arraigo / aprecio popular<br/>                 Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> <u>Ninguna</u><br/>                 Contaminación (indicar tipo):<br/>                 Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/>                 Abandono, suciedad y vertidos<br/>                 Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/>                 Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/>                 Otros (indicar)<br/>                 NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, filtración, permanente y frío</u></p>   |  |



**Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización**

|  |  |   |   |
|--|--|---|---|
| <p><b>1. Localización</b><br/>                 Nombre del manantial: <b>Ojo de Agua 20 de abril de 2016</b><br/>                 Localidad o paraje: Manzana 6°<br/>                 Municipio: <b>Jiquipilco</b><br/>                 Coordenadas Altitud 1667 msnm<br/>                 Latitud N 19°32'1.68" Longitud W 99°36'48.11"<br/>                 Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br/>                 Contacto: Pablo Hernández de la Cruz, Operador de rebombeo, Gabriel Pinal, Subdirector de Agua Potable y saneamiento</p> |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/>                 El manantial está cercado, cuenta con su caja de captación cerrada seguido de un estanque a cielo abierto, el agua se capta en una tubería de 6 pulgadas para ser clorada por goteo en la planta de bombeo, luego es de 3 a 2 pulgadas con 6 km de tubería, opera 8 horas al día. Otra parte del agua se dirige a los 2 tubos de 2 pulgadas para riego, otra por canales y otra fracción va a dar a la presa para riego.</p> |   |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/>                 Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea:<br/><br/>                 Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Depósitos aluviales<br/>                 Depósitos lacustres<br/>                 Otros</p>           | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/>                 Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/>                 Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/>                 Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/>                 Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/>                 NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/>                 Abastecimiento industrial<br/> <u>Riego (indicar): maíz</u><br/>                 Rural ganadero<br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br/>                 NS/NC</p>   | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/>                 Se agota excepcionalmente<br/>                 Se agota con frecuencia<br/>                 Prácticamente siempre agotado<br/> <u>NS/NC: se ha visto disminución en el caudal</u></p>  |
| <p><b>4. Descripción</b><br/>                 (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 15 minutos en auto de la cabecera, con un tramo de terracería, a un costado de la presa.</u></p>  | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> <u>Fuente rural</u><br/>                 Lavadero<br/>                 Abrevadero<br/>                 Tanque de regulación<br/>                 Área recreativa (albercas)<br/>                 Planta de envasado<br/>                 Balneario<br/>                 Ninguna<br/> <u>Otras (indicar): canales para riego</u><br/>                 NS/NC</p>                               | <p><b>8. Acceso</b><br/> <u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br/>                 Sin restricciones, pero complicado<br/>                 Con restricciones<br/> <u>Con autorización y permiso</u></p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/>                 Deficiente<br/>                 Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/>                 Muy bueno<br/>                 NS /NC</p>   |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> <u>Urbano</u><br/>                 Industrial<br/> <u>Rural</u><br/> <u>Bosque</u><br/>                 Pastizal<br/> <u>Riego (indicar): maíz</u><br/>                 Sin uso<br/> <u>Otros (indicar): Presa</u><br/>                 NS/NC</p>   | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/>                 Pozos (indicar)<br/>                 Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/>                 (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/>                 Científico / didáctico<br/>                 Medicinal<br/> <u>Paisajístico</u> /<br/> <u>pintoresco</u><br/>                 Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/>                 Histórico /<br/>                 sociocultural<br/>                 Económico<br/>                 Arraigo / aprecio popular<br/>                 Otro (indicar)</p>                | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/>                 Ninguna<br/> <u>Contaminación (indicar tipo): posible por cultivos y doméstica</u><br/>                 Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/>                 Abandono, suciedad y vertidos<br/>                 Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/>                 Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/>                 Otros (indicar)<br/>                 NS/NC</p> |
| <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, filtración, permanente y frío</u></p>   |  |   |   |

| <b>Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización</b>   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: <b>Chichotla 26 de abril de 2016</b><br/> Localidad o paraje:<br/> Municipio: <b>Temascaltepec</b><br/> Coordenadas Altitud 2039 msnm<br/> Latitud N 19° 3'37.50" Longitud W 99°58'32.00"<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br/> Contacto: Isaías Colín Salazar Agua Potable, Moisés Estrada Álvarez, Regidor de Obras Públicas</p>   |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> El manantial está cercado, propiedad de la CAEM, no se pudo acceder a las instalaciones, pero se tomó la muestra del agua del manantial con auxilio del cuidador. El agua se destina a Tejupilco. Para acceder se necesita permiso y oficio de la CAEM de Tejupilco.</p> |  |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: de los mismos cerros<br/><br/> Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Depósitos aluviales<br/> Depósitos lacustres<br/> Otros</p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> Riego (indicar):<br/> Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):<br/> NS/NC</p>   | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC:</p>   |
| <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 20 minutos en auto de la cabecera, con un tramo de 15 minutos en sendero estrecho. Pasa un río, derivado de un manantial aguas arriba</u></p>  | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> Fuente rural<br/> Lavadero<br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> Área recreativa (albercas)<br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> Otras (indicar):<br/> NS/NC</p>  | <p><b>8. Acceso</b><br/> Sin restricciones, ni dificultad<br/> Sin restricciones, pero complicado<br/> <u>Con restricciones</u><br/> <u>Con autorización y permiso</u></p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/> Muy bueno<br/> NS/NC</p>   |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> Urbano<br/> Industrial<br/> Rural<br/> <u>Bosque</u><br/> Pastizal<br/> Riego (indicar): aguacate (antes encino), durazno <u>aguas abajo.</u><br/> Sin uso<br/> Otros (indicar):<br/> NS/NC</p>  | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar)<br/> Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcas con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> Científico / didáctico<br/> Medicinal<br/> Paisajístico / pintoresco<br/> Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/> Histórico / sociocultural<br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p>                    | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> <u>Ninguna</u><br/> Contaminación (indicar tipo):<br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |
|   |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b></p>   |  |

| <b>Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización</b>  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: <b>Real de Arriba (el fresno) 26 de abril de 2016</b><br/> Localidad o paraje: <b>Real de Arriba</b><br/> Municipio: Temascaltepec<br/> Coordenadas Altitud 1915 msnm<br/> Latitud N 19° 2'11.80" Longitud W 99°59'52.40"<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br/> Contacto: Isaías Colín Salazar Agua Potable, Moisés Estrada Álvarez, Regidor de Obra Públicas, Héctor Hernández, dueño de la propiedad.</p> |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> El manantial está en propiedad privada (casa particular). Cuenta con la caja de captación con 2 desviaciones, una entubada para el abastecimiento de la cabecera y el excedente que va a los estanques (trucha y recreativo) que posteriormente va a dar al río San Andrés de los Gama</p> |  |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: de los mismos cerros<br/><br/> Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Depósitos aluviales<br/> Depósitos lacustres<br/> Otros</p>                                | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> Riego (indicar): Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> <u>Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar):</u><br/> <u>Pequeño estanque de trucha y una piscina</u><br/> NS/NC</p>  | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC:</p>   |
| <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 20 minutos en auto de la cabecera. El excedente del manantial va a dar al río San Andrés de los Gama, que pasa a un costado.</u></p>  | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> Fuente rural<br/> Lavadero<br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> <u>Área recreativa (albercas)</u><br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> <u>Otras (indicar): estanques de trucha y una pequeña alberca</u><br/> NS/NC</p>  | <p><b>8. Acceso</b><br/> Sin restricciones, ni dificultad<br/> Sin restricciones, pero complicado<br/> Con restricciones<br/> <u>Con autorización y permiso</u></p>   | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/> Muy bueno<br/> NS/NC</p>   |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> <u>Urbano</u><br/> Industrial<br/> Rural<br/> <u>Bosque</u><br/> Pastizal<br/> <u>Riego (indicar): aguacate (antes encino).</u><br/> Sin uso<br/> Otros (indicar):<br/> NS/NC</p>   | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar)<br/> Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> Científico / didáctico<br/> Medicinal<br/> Paisajístico / pintoresco<br/> Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/> Histórico / sociocultural<br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p>                                      | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> <u>Ninguna</u><br/> Contaminación (indicar tipo):<br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |
|  |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> De gravedad, permanente, frío</p>  |  |

**Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización**

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| <p><b>1. Localización</b><br/>                 Nombre del manantial: <b>Real de Arriba (La Peña) 26 de abril de 2016</b><br/>                 Localidad o paraje: <b>Real de Arriba</b><br/>                 Municipio: Temascaltepec<br/>                 Coordenadas Altitud 1927 msnm<br/>                 Latitud N 19° 2'7.75" Longitud W 99°59'47.33"<br/>                 Nombre del río/arroyo que origina (si procede): ---<br/>                 Contacto: Isaías Colín Salazar Agua Potable, Moisés Estrada Álvarez, Regidor de Obra Públicas</p>               |  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/>                 Caja de captación del manantial sin cercado.</p>  |  |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/>                 Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: de los mismos cerros<br/><br/>                 Naturaleza de las <b>rocas</b> por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/>                 Depósitos aluviales<br/>                 Depósitos lacustres<br/>                 Otros</p> | <p><b>3. Tipo de surgencia</b><br/> <u>Manantial</u><br/>                 Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/>                 Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/>                 Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/>                 Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/>                 NS/NC</p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/>                 Abastecimiento industrial<br/>                 Riego (indicar): Rural ganadero<br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar): NS/NC</p>  | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/>                 Se agota excepcionalmente<br/>                 Se agota con frecuencia<br/>                 Prácticamente siempre agotado<br/>                 NS/NC:</p>   |
| <p><b>4. Descripción</b><br/>                 (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>A 20 minutos en auto de la cabecera. Cerca para el río San Andrés de los Gama.</u></p>   | <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/>                 Fuente rural<br/>                 Lavadero<br/>                 Abrevadero<br/>                 Tanque de regulación<br/>                 Área recreativa (albercas)<br/>                 Planta de envasado<br/>                 Balneario<br/>                 Ninguna<br/>                 Otras (indicar): NS/NC</p>   | <p><b>8. Acceso</b><br/> <u>Sin restricciones, ni dificultad</u><br/>                 Sin restricciones, pero complicado<br/>                 Con restricciones<br/>                 Con autorización y permiso</p>  | <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/>                 Deficiente<br/>                 Aceptable<br/> <u>Bueno</u><br/>                 Muy bueno<br/>                 NS /NC</p>  |
| <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> <u>Urbano</u><br/>                 Industrial<br/>                 Rural<br/> <u>Bosque</u><br/>                 Pastizal<br/>                 Riego (indicar): aguacate (antes encino),<br/>                 Sin uso<br/>                 Otros (indicar): NS/NC</p>  | <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/>                 Pozos (indicar)<br/>                 Manantiales (indicar)</p>  | <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/>                 (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/>                 Científico / didáctico<br/>                 Medicinal<br/>                 Paisajístico / pintoresco<br/>                 Medio ambiente<br/> <u>Recreativo / turístico / uso público</u><br/>                 Histórico / sociocultural<br/>                 Económico<br/>                 Arraigo / aprecio popular<br/>                 Otro (indicar)</p> | <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> <u>Ninguna</u><br/>                 Contaminación (indicar tipo):<br/>                 Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/>                 Abandono, suciedad y vertidos<br/>                 Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/>                 Usos inadecuados y/o desordenados (indicar):<br/>                 Otros (indicar)<br/>                 NS/NC</p> |
|   |  | <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/>                 De gravedad, permanente, frío</p>   |  |

**Ficha descriptiva para inventario de manantiales: identificación y caracterización**

|   |  |   |   |
|---|--|---|---|
| <p><b>1. Localización</b><br/> Nombre del manantial: <b>La Ciénega 05 de abril de 2016</b><br/> Localidad o paraje: Zaragoza de Guadalupe, Paraje Las Jarillas<br/> Municipio: <b>Calimaya</b><br/> Coordenadas: Altitud 3081 msnm<br/> Latitud N 19° 8'0.44" Longitud W 99°40'46.75<br/> Nombre del río/arroyo que origina (si procede): -<br/> Contacto: Pedro Valle Aguilar, asesor de la 8° regiduría, Agua Potable y Alcantarillado. Maurilio Guadarrama romero, Área servicios Públicos.</p>  | <p>En caso de existencia de instalaciones, hacer una breve descripción de las mismas:<br/> El manantial cercado por una maya. Hay 6 cajas (de cemento) de captación de los veneros, donde 4 aportan el agua a la caja del almacenaje principal. Por gravedad, luego, se tiene la bomba de distribución; con aproximadamente 2.5 km de red de drenaje para la localidad de Calimaya solamente. Se lleva a los tanques, de ahí se clora y se bombea.</p>   |   |   |
| <p><b>2. Procedencia del agua subterránea</b><br/> Nombre del lugar o sierra de donde se supone procede el agua subterránea: <u>Del volcán Nevado de Toluca.</u><br/> Naturaleza de las rocas por donde se supone circula el agua subterránea:<br/> <u>Rocas ígneas</u><br/> <u>Rocas sedimentarias</u><br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> Rocas metamórficas (no carbonatadas)<br/> <u>Depósitos aluviales</u><br/> Depósitos lacustres<br/> Otros <u>Conglomerados</u></p> <p><b>4. Descripción</b><br/> (Localización y accesos, descripción hidrogeológica, manantiales y fuentes próximas, reseña histórica, arquitectónica, cultural, etc.)<br/> <u>En las faldas del volcán, a 30 minutos de la cabecera, por terracería, cerca de la piscifactoría donde sus afluentes pasan a un costado de los manantiales.</u></p> <p><b>12. Uso del suelo circundante</b><br/> Urbano<br/> Industrial<br/> <u>Rural</u><br/> <u>Bosque</u><br/> <u>Pastizal</u><br/> <u>Riego (indicar) papa, maíz</u><br/> Sin uso<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> | <p><b>3. Tipo de surgencia Manantial</b><br/> Galería, zanja o mina de agua (muy habitual en fuentes)<br/> Nacimiento a cauce (sugerencia puntual o difusa dentro de ríos y arroyos)<br/> Humedal (sugerencia normalmente difusa dentro de lagunas, charcos, etc.)<br/> Resumidero (normalmente manantial temporal de escaso caudal en laderas, etc.)<br/> NS/NC</p> <p><b>5. Instalaciones asociadas</b><br/> <u>Fuente urbana</u><br/> Fuente rural<br/> Lavadero<br/> Abrevadero<br/> Tanque de regulación<br/> Área recreativa (albercas)<br/> Planta de envasado<br/> Balneario<br/> Ninguna<br/> Otras (indicar)<br/> NS/NC</p> <p><b>13. Otras fuentes de abastecimiento</b><br/> Pozos (indicar)<br/> Manantiales (indicar)<br/> <u>Manantial La Virgen para Calimaya, y otras localidades</u></p> | <p><b>6. Uso del agua</b><br/> <u>Abastecimiento urbano</u><br/> Abastecimiento industrial<br/> Riego (indicar)<br/> Rural ganadero<br/> Sin uso<br/> Otros (Piscicultura, balneario, recreativo-baño, etc.) (indicar)<br/> NS/NC</p> <p><b>8. Acceso</b><br/> Sin restricciones, ni dificultad<br/> Sin restricciones, pero complicado<br/> <u>Con restricciones</u><br/> <u>Con autorización y permiso</u></p> <p><b>10. Valores sectoriales</b><br/> (marcar con una X sólo los que posean cierto interés)<br/> <u>Científico / didáctico</u><br/> <u>Medicinal</u><br/> Paisajístico / pintoresco<br/> Medio ambiente<br/> Recreativo / turístico / uso público<br/> Histórico / sociocultural<br/> Económico<br/> Arraigo / aprecio popular<br/> Otro (indicar)</p> <p><b>14. Tipo de manantial</b><br/> <u>De gravedad, de filtración (difuso), permanente y frío</u></p> | <p><b>7. Comportamiento del caudal</b><br/> <u>No se agotan nunca</u><br/> Se agota excepcionalmente<br/> Se agota con frecuencia<br/> Prácticamente siempre agotado<br/> NS/NC</p> <p><b>9. Estado de conservación del manantial</b><br/> Deficiente<br/> Aceptable<br/> Bueno<br/> <u>Muy bueno</u><br/> NS /NC</p> <p><b>11. Amenazas, impactos y presiones</b><br/> Ninguna<br/> Contaminación (indicar tipo) <u>Posible contaminación de siembra de papa sobre todo aguas arriba</u><br/> Afectación al caudal por bombeos o derivaciones<br/> Abandono, suciedad y vertidos<br/> Construcciones, obras públicas y/o desmontes próximos<br/> Usos inadecuados y/o desordenados (indicar)<br/> Otros (indicar)<br/> NS/NC</p> |