



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO FORESTAL**

**ÁREAS PRIORITARIAS MEDIANTE ESCENARIOS DE DEFORESTACIÓN  
Y SERVICIOS AMBIENTALES EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA**

**HONORIA CHÁVEZ GONZÁLEZ**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

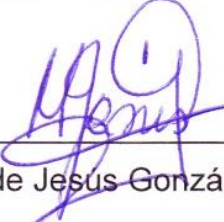
2014

La presente tesis titulada: “**Áreas prioritarias mediante escenarios de deforestación y servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla**” realizada por la Ing. **Honorio Chávez González**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:


**MAESTRA EN CIENCIAS  
FORESTAL**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO   
Dra. Patricia Hernández de la Rosa

ASESOR   
Dr. Manuel de Jesús González Guillén

ASESOR   
Dr. Miguel Jorge Escalona Maurice

ASESOR   
Dr. Mario Roberto Martínez Menez

Montecillo, Texcoco, México. Enero, 2014.

## **ÁREAS PRIORITARIAS MEDIANTE ESCENARIOS DE DEFORESTACIÓN Y SERVICIOS AMBIENTALES EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA**

Honorio Chávez González, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2014

La identificación de áreas prioritarias es una herramienta valiosa que permite orientar y optimizar los esfuerzos de estudio, conservación y aprovechamiento sustentable de recursos forestales. La presente investigación integró una metodología, mediante la combinación de diferentes técnicas cuantitativas en un ambiente de sistemas de información geográfica y sensores remotos, para la identificación de áreas prioritarias de recarga hídrica en la Unidad de Manejo Forestal Zacatlán, Puebla. El estudio se constituyó de tres componentes de investigación: (1) Análisis retrospectivo (1986-2010), actual y prospectivo (2010-2030) de cambios de uso de la tierra y riesgo de deforestación; (2) Identificación de áreas con aptitud para proveer servicios ambientales hidrológicos (recarga hídrica subterránea); y (3) Identificación de áreas prioritarias sujetas a ser conservadas, por su potencial para brindar servicios ambientales hidrológicos y su riesgo futuro de deforestación. Los resultados indican que de la superficie total de la región de estudio (269,002 ha), el 53.02% (142,636.41 ha) corresponden a uso forestal y de ésta, el 21.84% (31,152 ha) poseen riesgo de deforestación al año 2030. Por otro lado, la aptitud para la recarga hídrica subterránea se distribuye en 21,315.35 ha con aptitud alta, 169,995.01 ha con aptitud media y 75,100.09 ha con aptitud baja. Finalmente, mediante la combinación de riesgo de deforestación y aptitud de recarga hídrica subterránea, se obtuvieron 5,727 ha con prioridad alta, 9,981 ha con prioridad media y 13,313 ha con prioridad baja para la conservación del servicio ambiental hidrológico considerado. Los resultados permitieron la generación de estrategias de manejo y conservación de ecosistemas forestales, concluyendo que las áreas prioritarias deben ser la base para la implementación de políticas públicas para la conservación de los recursos forestales de la región de estudio.

Palabras clave: Cambio de uso de la tierra, riesgo de deforestación, recarga de acuíferos, evaluación multicriterio, regresión logística.

## **PRIORITY AREAS THROUGH DEFORESTATION SCENARIOS AND ENVIRONMENTAL SERVICES IN THE NORTHERN SIERRA OF PUEBLA**

Honorio Chávez González, M. C.  
Colegio de Postgraduados, 2014

The identification of priority areas is a valuable tool to guide and optimize the efforts of study, conservation and sustainable use of forest resources. This research integrated a methodology by combining different quantitative techniques in an environment of GIS and remote sensing for identify priority areas for water recharge in the Unidad de Manejo Forestal Zacatlán, Puebla. The study was integrated by three components: (1) Retrospective Analysis (1986-2010), current and prospective (2010-2030) land use change and deforestation risk, (2) Identification of areas with capacity for provide hydrological services (ground water recharge), and (3) Identification of priority areas subject to conservation, based on its potential to provide hydrological services and their future risk of deforestation. The results indicate that of the total area of the region under study (269,002 ha), 53.02% (142,636.41 ha) corresponds to forest and 21.84% (31,152 ha) have risk of deforestation by 2030. On the other hand, the suitability for ground water recharge is distributed in 21,315.35 ha, 169,995.01 ha, and 75,100.09 ha with high, medium an low recharge capacity, respectively. Finally, by combining deforestation risk and suitability of ground water recharge 5,727 ha were obtained with high, 9,981 ha with medium, and 13,313 ha with low priority for the conservation of the hydrological ecosystem service considered. The results allowed the generation of strategies for management and conservation of forest ecosystems. Finally, the determination of priority areas should be the basis to implement public policies for the conservation of forest resources in the region of study.

Keywords: Land use change, deforestation risk, aquifer recharge, multicriteria evaluation, logistic regression.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Colegio de Postgraduados, por darme la oportunidad de continuar mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

A las Líneas Prioritarias de Investigación 01 Manejo Sustentable de Recursos Naturales y 09 Geomática aplicada al estudio y manejo de los recursos naturales y sistemas agropecuarios, por el financiamiento otorgado para el desarrollo de la investigación.

### **A MI CONSEJO PARTICULAR:**

Dra. Patricia Hernández de la Rosa y Dr. Manuel de Jesús González Guillén, por la confianza brindada para la realización de esta investigación, por la invaluable dirección de la misma, y por el apoyo incondicional para la culminación de esta meta.

Dr. Miguel Jorge Escalona Maurice y Dr. Mario R. Martínez Menez, por el valioso tiempo dedicado a las asesorías, observaciones y sugerencias para la mejor culminación de este trabajo.

Al Director Técnico (Ing. Manuel Morales Martínez) y personal laboral de la A.S.M.A.R.F. (Asesores en Manejo de Recursos Forestales, S.C.), al Ing. José Antonio Guevara Montiel, Presidente de la Asociación Regional de Silvicultores de Chignahuapan-Zacatlán, S.C. y al Ing. Everit Mora Guzmán, Responsable de la Dirección Forestal de la Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial del estado de Puebla; por la valiosa información proporcionada y el apoyo brindado en el trabajo de campo.

Al personal de Presidencias Municipales, Ejidos y Comunidades de la UMAFOR Zacatlán, y especialmente a la Ing. Ma. Luisa González Ovando y Daniel Zurita Fuentes, por el invaluable apoyo brindado en las actividades de trabajo de campo.

A la Ing. Carmina Cruz Huerta, por su excelente aportación al trabajo de equipo y acompañamiento profesional a lo largo de esta investigación.

A los integrantes del panel de expertos por su valioso tiempo y conocimientos aportados en la atención a la encuesta aplicada.

Al Postgrado Forestal, su grupo de académicos, administrativos y alumnos, así como a los profesores de otros postgrados con los cuales tomé cursos, por contribuir en mi formación profesional y por el apoyo brindado durante el proceso de mis estudios de Maestría en esta institución.

## DEDICATORIA

A mis padres: Hipólito Chávez Pérez<sup>+</sup> y Clara González Robles, por ser mí mejor ejemplo de fortaleza espiritual, responsabilidad, honestidad, esfuerzo y dedicación; por su inmenso amor incondicional en todas las etapas de mi vida.

A mis hermanos (a): Isabel, Marcos, Pepe y Anselmo; porque su lucha por la superación personal y profesional me enseñó el camino a seguir, y porque su apoyo incondicional a todas las decisiones de mi vida, siempre me ha fortalecido.

A mi tío Gonzalo y mis cuñadas Irma, Clarita y Judith, porque su apoyo directo y a través de mis hermanos, es lo más valioso que desde siempre me han proporcionado y específicamente en el desarrollo de esta etapa.

A mis sobrinos (as): Alina, Cuauhtémoc, Habacuc, Marquitos, Pepito, Jarom, Miranda, José Luis, Jazmín y Aliz; por su compañía, cariño y apoyo, y porque sus risas e inquietudes son la alegría de mi existencia y mi motivo más grande de superación.

A mis amigas y amigos, quienes desde la distancia siguen extraordinariamente presentes en mi vida, y quienes desde la cercanía estuvieron a mi lado en este tiempo fortaleciendo así nuestra amistad; especialmente a los que esta etapa me permitió conocer y me brindaron su apoyo y amistad sin dudarlo.

A todas las personas que de una u otra forma han contribuido a mi formación personal y profesional a lo largo de mi existencia, gracias por su amistad y apoyo.

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
CAPÍTULO I.....	1
MARCO DE REFERENCIA.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.2. CARACTERÍSTICAS Y DIAGNÓSTICO DE LA UMAFOR ZACATLÁN.....	3
1.2.1. Antecedentes.....	3
1.2.2. Localización geográfica .....	4
1.2.3. Aspectos biofísicos y ambientales .....	6
1.2.4. Aspectos socioeconómicos.....	18
1.3. CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA.....	27
1.3.1. En México .....	27
1.3.2. En la UMAFOR Zacatlán.....	31
1.4. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA CONSERVACIÓN EN MÉXICO .....	32
1.5. PROBLEMÁTICA Y NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS FORESTALES EN LA UMAFOR .....	35
1.6. OBJETIVOS.....	36
1.7. LITERATURA CITADA.....	37
CAPÍTULO II.....	42
DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA Y ESCENARIOS DE DEFORESTACIÓN EN LA UMAFOR ZACATLÁN, PUEBLA .	42
2.1. INTRODUCCIÓN .....	42
2.2. OBJETIVOS.....	44
2.3. MÉTODOS Y MATERIALES .....	44



2.3.1.	Cambios de uso de la tierra en el período 1986-2010 .....	44
2.3.2.	Escenarios de riesgo de deforestación para el período 2010-2030 ..	54
2.4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	58
2.4.1.	Distribución de usos de la tierra para los años 1986, 1996 y 2010 .....	58
2.4.2.	Detección de cambios de uso de la tierra en el período 1986-2010 ....	61
2.4.3.	Modelos probabilísticos de cambios de uso de la tierra.....	66
2.4.4.	Mapas probabilísticos de cambios de uso de la tierra .....	73
2.4.5.	Escenarios futuros (2010-2030) de riesgo de deforestación.....	75
2.5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
2.6	LITERATURA CITADA.....	85
CAPÍTULO III .....		92
IDENTIFICACIÓN DE ZONAS APTAS PARA PROVEER SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS: RECARGA DE ACUÍFEROS.....		92
3.1.	INTRODUCCIÓN .....	92
3.2.	OBJETIVOS.....	94
3.3.	MÉTODOS Y MATERIALES .....	94
3.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	100
3.4.1.	Principales factores biofísicos para la recarga de acuíferos.....	100
3.4.2.	Mapa de gradientes de aptitud para la recarga de acuíferos .....	107
3.5.	CONCLUSIONES .....	115
3.6.	LITERATURA CITADA.....	115
CAPÍTULO IV.....		120
METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR ÁREAS PRIORITARIAS: UNA PROPUESTA PARA SU IDENTIFICACIÓN EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA .....		120

4.1. INTRODUCCIÓN .....	120
4.2. OBJETIVOS.....	122
4.3. REVISIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS USADAS EN LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS.....	123
4.4. MÉTODOS Y MATERIALES .....	132
4.4.1. Área de estudio .....	132
4.4.2. Propuesta metodológica para la identificación de áreas prioritarias para conservación.....	133
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	136
4.5.1. Áreas prioritarias para conservación en la UMAFOR, Zacatlán, Puebla .....	136
4.5.2. Estrategias de manejo y conservación de las áreas prioritarias .....	143
4.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	146
4.7. LITERATURA CITADA.....	147
CAPÍTULO V.....	154
CONCLUSIONES E IMPLICACIONES .....	154
5.1. CONCLUSIONES GENERALES.....	154
5.2. IMPLICACIONES: FORTALEZAS Y DEBILIDADES .....	157
5.3. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	160
CAPÍTULO VI.....	162
ANEXOS.....	162

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1.1	Ubicación geográfica del área de estudio.....	5
1.2	Municipios que integran la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	5
1.3	Fisiografía de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	6
1.4	Regiones Hidrológicas y Cuencas de la UMAFOR Zacatlán, Puebla....	7
1.5	Hidrología superficial en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	8
1.6	Tipos de climas de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	10
1.7	Distribución de suelos presentes en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	11
1.8	Distribución de los Usos de la tierra en la UMAFOR Zacatlán.....	14
1.9	Tipos de vegetación presentes en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	14
1.10	Número de habitantes por municipio de la UMAFOR Zacatlán.....	19
1.11	Distribución de localidades de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	19
1.12	Grado promedio de escolaridad para los municipios de la UMAFOR...	23
1.13	Población derechohabiente por institución de salud en la UMAFOR...	23
1.14	Causas de la deforestación en México.....	30
2.1	Obtención de la escena final de trabajo con base al área de estudio....	45
2.2	Distribución de los usos de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, Puebla: (a) 1986; (b) 1995; y (c) 2010.....	59
2.3	Superficies de usos de la tierra para la UMAFOR Zacatlán.....	61
2.4	Procesos de cambio de usos de la tierra detectados en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	64
2.5	Probabilidades de cambio de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán: a) forestal/agrícola, b) forestal/pecuario, y c) forestal/residencial.....	74
2.6	Densidad poblacional promedio por uso de la tierra de 1980 a 2010, para la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	76

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
2.7	Distribución espacial de la superficie requerida por uso de la tierra, en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	77
2.8	Riesgo de deforestación a diferentes usos en la UMAFOR Zacatlán: (a) Agrícola; (b) Pecuario; y (c) Residencial.....	78
2.9	Distribución de superficies por categoría de riesgo de deforestación a diferentes usos, en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	79
2.10	Riesgo de deforestación para la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	80
3.1	Esquema metodológico para identificar áreas con aptitud para proveer servicios ambientales hidrológicos.....	95
3.2	Factores biofísicos que condicionan la posibilidad de recarga hídrica subterránea en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	105
3.3	Ubicación espacial de zonas con aptitud para recarga de acuíferos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	108
3.4	Aprovechamientos subterráneos y superficiales de agua en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	112
4.1	Ubicación geográfica de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	132
4.2	Esquema metodológico para la identificación de áreas prioritarias en la UMAFOR Zacatlán, Puebla, México.....	134
4.3	Obtención de áreas prioritarias para conservación en la UMAFOR Zacatlán.....	135
4.4	Áreas prioritarias para conservación por servicios ambientales hidrológicos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	137
4.5	Áreas con prioridad alta para municipios de la UMAFOR Zacatlán.....	138
4.6	Ubicación de zonas elegibles para PSAH y áreas prioritarias para conservación de SAH en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	139

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1.1	Especies de fauna en riesgo de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	18
1.2	Datos poblacionales de los municipios de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	20
1.3	Habitantes de la UMAFOR Zacatlán que hablan alguna lengua indígena.....	21
1.4	Población económicamente activa en la UMAFOR Zacatlán, Puebla..	22
1.5	Superficie sembrada, cosechada y valor de la producción de los municipios que conforman la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	24
1.6	Volúmenes de producción pecuarias de los municipios de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	25
1.7	Comparación entre tasas de deforestación totales para México.....	28
1.8	Tasas de deforestación por tipo de vegetación para México.....	28
2.1	Características de las imágenes de satélite empleadas en la clasificación de usos de la tierra de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	45
2.2.	Leyenda y clases temáticas para la clasificación de usos de la tierra de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	49
2.3	Validación del mapa clasificado 2010 mediante puntos de verificación.....	51
2.4	Matriz de confusión para los campos de entrenamiento del mapa clasificado de 1995.....	52
2.5	Matriz de confusión para los campos de entrenamiento del mapa clasificado de 1986.....	52
2.6	Variables independientes utilizadas en el modelo de regresión logística, para la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	56
2.7	Matriz de intercambio de superficies y probabilidades de transición de usos de la tierra en el período 1986-2010, para la UMAFOR Zacatlán.....	62
2.8	Estadísticas básicas para la variable dependiente y las independientes.....	66

<b>Cuadro</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
2.9	Orden de importancia de las variables independientes en cambios de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	67
2.10	Resultados de regresión logística para cambios de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	69
2.11	Medidas de asociación y coeficientes de correlación entre pares de variables.....	72
2.12	Superficie de riesgo de deforestación por municipio y porcentaje con respecto a su superficie forestal, en la UMAFOR Zacatlán.....	81
3.1	Criterios y subcriterios seleccionados para definir la aptitud de recarga de acuíferos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	96
3.2	Potencial de la cobertura vegetal para la recarga hídrica en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	101
3.3	Posibilidad de recarga hídrica para el criterio de topografía en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	102
3.4	Posibilidad de recarga hídrica según los subcriterios de clima, para la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	103
3.5	Posibilidad de recarga hídrica del suelo según su textura, en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	104
3.6	Posibilidad de recarga hídrica del estrato geológico en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	104
3.7	Otros subcriterios que deben considerarse para la definición de áreas con aptitud para la recarga de acuíferos.....	106
3.8	Ponderación de criterios y subcriterios para recarga de acuíferos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	108
3.9	Superficies y porcentajes de áreas aptas para la recarga hídrica respecto a la superficie de cada municipio de la UMAFOR Zacatlán..	109
3.10	Estrategias propuestas para implementar en las áreas aptas para recarga hídrica subterránea de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	113
4.1	Metodologías generales utilizadas para la selección de áreas prioritarias de conservación de ecosistemas.....	126
4.2	Estrategias propuestas para la atención de áreas prioritarias en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.....	145

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
2.1	Metadatos de las imágenes satelitales utilizadas en la clasificación de usos de la tierra en la UMAFOR Zacatlán.....	162
2.2	Compendio fotográfico de las diferentes coberturas que integran las categorías de uso de la tierra.....	165
2.3	Estadísticas básicas y medidas de separabilidad de los campos de entrenamiento de cada categoría utilizada en la clasificación de imágenes.....	169
2.4	Variable dependiente: Mapa de cambios de uso forestal a otros usos	171
2.5	Mapas de las variables independientes utilizadas en este estudio.....	172
3.1	Encuesta para la identificación de áreas aptas para la recarga de acuíferos.....	175
4.1	Mapas por municipio de áreas prioritarias para conservación de servicios ambientales hidrológicos.....	180

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO DE REFERENCIA**

### **1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

Los ecosistemas proporcionan una amplia gama de bienes y servicios ambientales a la sociedad, como alimentos, combustibles, agua, regulación del clima, secuestro de carbono, productividad de suelos, satisfacción espiritual y placer estético. Sin embargo, una valoración inadecuada de los mismos por la sociedad pone en peligro su flujo sostenido en el tiempo (FAO/OAPN, 2009).

En algunas regiones de México, factores como el crecimiento poblacional desordenado, el avance de la frontera agropecuaria, los incendios forestales y la tala ilegal, entre otros, inciden en procesos de deforestación (cambio de la cubierta natural de la tierra a otro tipo de uso, por ej., residencial, agrícola, pecuario, industrial) que ponen en riesgo la permanencia y productividad de los ecosistemas forestales; y cuyos efectos se reflejan en la pérdida de la biodiversidad, disminución de la cantidad y calidad del agua, deslizamientos de masas de suelo e inundaciones, y pérdida de identidad cultural (FAO/OAPN, 2009).

Para contrarrestar lo anterior, el gobierno mexicano ha aplicado programas de reforestación, compensación ambiental y conservación de suelos, los cuales se caracterizan por seguir una línea de mitigación de los daños ocasionados a los recursos forestales al focalizar el presupuesto a la atención de áreas deforestadas, ejemplos de ellos son: El PRONARE (Programa Nacional de Reforestación) que se inició a principios de 1991, posteriormente el PROCOREF (Programa de Conservación y Restauración) y más recientemente el ProÁrbol operado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y que integra 19 conceptos de apoyo para la conservación, restauración y desarrollo forestal del país (DOF, 2011). Uno de estos conceptos es el Pago por Servicios Ambientales cuyo enfoque promueve, entre otros beneficios, la conservación de áreas forestales, propiciando con ello la



implementación de estrategias con una perspectiva preventiva de conservación de los recursos forestales.

Aún con estos esfuerzos, en regiones como la Sierra Norte de Puebla, los procesos de deforestación continúan propiciando el deterioro, pérdida y fragmentación de importantes áreas forestales (CONAPO, 1998), dando como resultado directo la pérdida del caudal de ríos y arroyos, la disminución en la disponibilidad de agua en manantiales y pozos, el azolvamiento de drenajes naturales y pérdidas en biodiversidad (SMRN, 2007; CONABIO, 2011). Esta situación requiere implementar acciones que coadyuven a la conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos forestales de la región, específicamente en la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR Zacatlán) la cual se encuentra circunscrita dentro de la región.

Se considera que en la UMAFOR Zacatlán, los esfuerzos realizados por los diferentes instrumentos de política pública con un enfoque correctivo y preventivo han sido insuficientes, dado que la problemática de deterioro y fragmentación de recursos forestales persiste, reportándose en un periodo de 14 años (1986-2000) la existencia de procesos de deforestación en aproximadamente 20% de su superficie forestal (SMRN, 2007). Por tanto, se requieren implementar estrategias efectivas de manejo sustentable de los recursos forestales de la región; y dado que la conservación de grandes superficies puede resultar muy costosa, resulta indispensable contar con herramientas que permitan definir, conocer y priorizar los lugares en que se debe actuar primero (Benegas y León, 2009; Geneletti *et al.*, 2011), para maximizar los beneficios de los programas de conservación aplicados. En este sentido, la identificación de áreas prioritarias para la conservación, funciona como una herramienta valiosa que permite orientar y optimizar los esfuerzos de estudio, conservación y aprovechamiento sustentable de recursos naturales (Sánchez *et al.*, 2008; Arriaga *et al.*, 2009; Ceballos *et al.*, 2009; Koleff *et al.*, 2009).

Bajo este contexto, la presente investigación parte de un análisis retrospectivo (1986-2010), actual y prospectivo (2010-2030) de cambio de uso de la tierra en el

área de estudio, con la idea de caracterizar y analizar los diferentes patrones (naturales, sociales, económicos) que rigen los cambios de uso de la tierra y estimar anticipadamente, a través de escenarios futuros alternativos, cuáles serían las áreas forestales sujetas a riesgo de deforestación. Posteriormente, se identifican y aplican criterios e indicadores para definir la capacidad del territorio para la recarga hídrica subterránea. Finalmente, con base en un análisis comparativo de la aptitud de este servicio ambiental y los escenarios de riesgo de deforestación, se identifican las áreas prioritarias sujetas a ser conservadas y se definen estrategias y políticas de manejo para la conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos forestales de la región de estudio.

Se espera que la información resultante de esta investigación, provea los elementos necesarios para una adecuada toma de decisiones a nivel local, regional y en cada uno de los municipios que se encuentran en el área de estudio, impactando de manera positiva en el manejo sustentable de los recursos forestales de la región.

## **1.2. CARACTERÍSTICAS Y DIAGNÓSTICO DE LA UMAFOR ZACATLÁN**

### **1.2.1. Antecedentes**

El Programa Estratégico Forestal 2025 señala la necesidad de realizar el ordenamiento forestal e impulsar la organización de los silvicultores con un criterio productivo y de aprovechamiento sustentable con el objeto de mejorar y hacer más eficiente el manejo de los recursos forestales y en general de los ecosistemas (CONAFOR, 2006).

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) en su artículo 112, retoma lo anterior y establece que, a fin de lograr una ordenación forestal sustentable, una planeación ordenada de las actividades y el manejo eficiente de los recursos forestales, la CONAFOR junto con cada uno de los gobiernos de las 32 entidades federativas del país delimitará las unidades de manejo forestal, tomando como base las cuencas, subcuencas y microcuencas hidrológicas

forestales (DOF, 2003). De esta manera, y como resultado del trabajo conjunto entre la CONAFOR y los 32 estados, se regionalizó el país en 218 unidades de manejo forestal (CONAFOR, 2006). La definición de Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) contenida en la LGDFS es la siguiente: Territorio cuyas condiciones físicas, ambientales, sociales y económicas guardan cierta similitud para fines de ordenación, manejo forestal sustentable y conservación de los recursos (DOF, 2003).

Es en este contexto, que en el estado de Puebla se conformaron ocho UMAFORES y con apoyo de CONAFOR se retomó la participación de los productores forestales formando Asociaciones Regionales de Silvicultores (ARS) para cada una de las UMAFORES ya conformadas. Por tanto, la UMAFOR 2108 denominada Zacatlán se encuentra constituida y funcionando a través de la Asociación Regional de Silvicultores de Chignahuapan-Zacatlán, A.C., que tiene como principal objetivo la participación e integración de sus socios en los procesos de toma de decisiones y planificación del uso de su territorio (SMRN, 2007).

### **1.2.2. Localización geográfica**

La UMAFOR Zacatlán forma parte de la región denominada Sierra Norte de Puebla, y se localiza entre los paralelos 20° 07' 06" y 19° 44' 18" de Latitud Norte y entre los meridianos 97° 57' 18" y 97° 38' 42" de Longitud Oeste; colinda al Norte con los municipios de Huachinango, Chiconcuautla, Tlapacoya, San Felipe Tepatlán y Hermenegildo Galeana, al Sur con el estado de Tlaxcala y el municipio de Libres, al Este colinda con los municipios de Ocoatepec, Zautla, Xochiapulco, Huitzilán de Serdán, Hueytlalpan y Olintla, y al Oeste con el estado de Hidalgo (Figura 1.1).

La UMAFOR Zacatlán está integrada por trece municipios que cubren una extensión de 2,690.02 km<sup>2</sup> (269,002 ha) equivalentes al 8% de la superficie total del estado de Puebla, siendo éstos: Ahuacatlán, Ahuazotepec, Amixtlán, Aquixtla, Camocuautla, Coatepec, Cuautempan, Chignahuapan, Ixtacamaxtitlán, Tepango de Rodríguez, Tepetzintla, Tetela de Ocampo y Zacatlán (Figura 1.2).

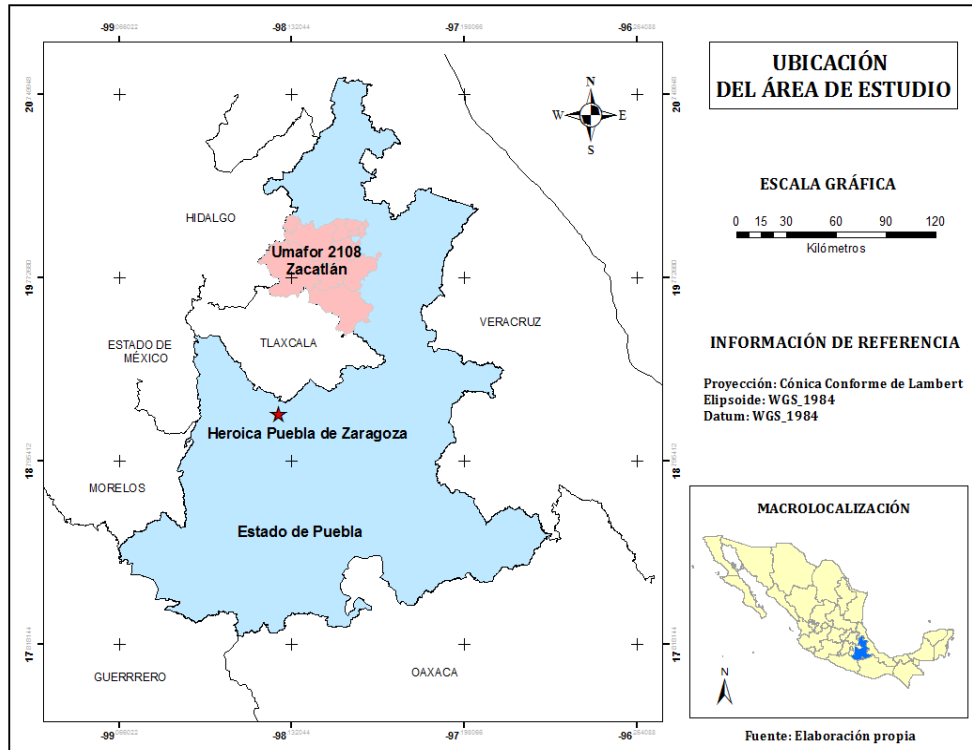


Figura 1.1. Ubicación geográfica del área de estudio

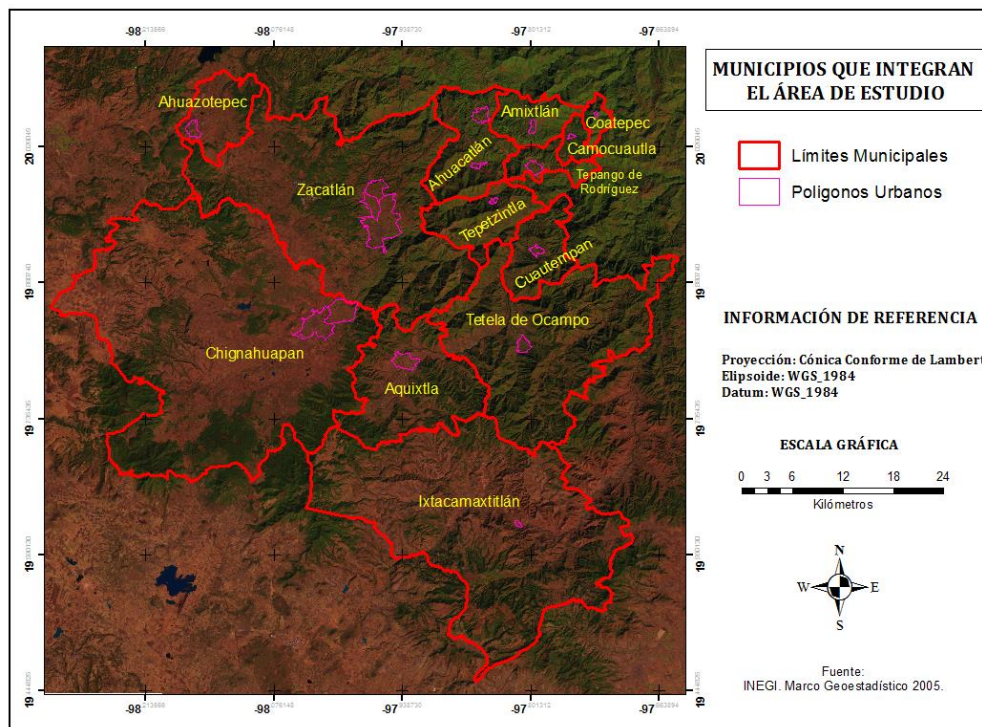


Figura 1.2. Municipios que integran la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

### 1.2.3. Aspectos biofísicos y ambientales

#### *Fisiografía*

La UMAFOR Zacatlán forma parte de la subprovincia 57 “Lagos y Volcanes del Anáhuac” que pertenece a la provincia X del Eje Neovolcánico, y a la subprovincia 30 “Carso-Huasteco” de la provincia V Sierra Madre Oriental (Figura 1.3).

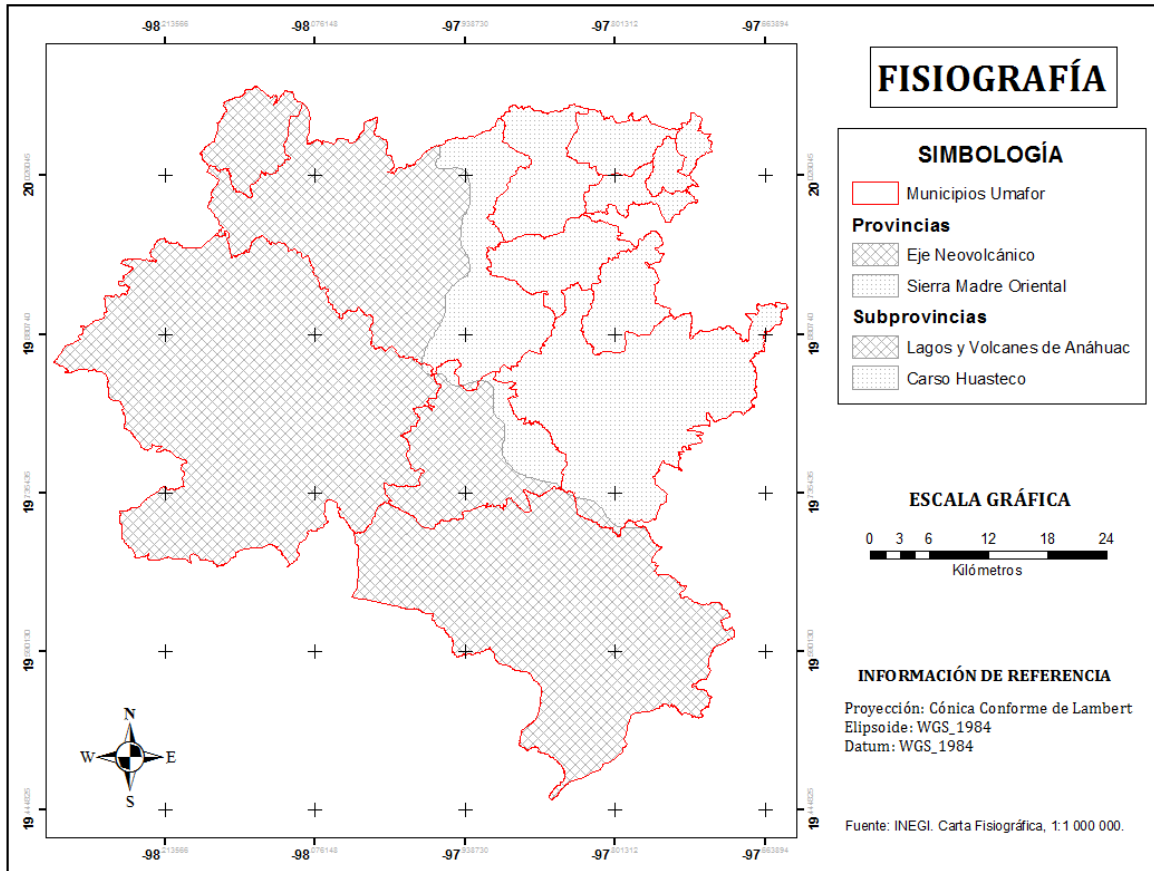


Figura 1.3. Fisiografía de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

#### *Hidrología*

La superficie de la UMAFOR Zacatlán se ubica en su mayoría dentro de la Región Hidrológica “RH27” Norte de Veracruz, en la Cuenca del Río Tecolutla y en las subcuencas de los Ríos Necaxa (RH27Bd), Laxaxalpan (RH27Bc), Tecantepec (RH27Bd) y Apulco (RH27Be). Así también, la fracción oeste y noroeste del municipio de Chignahuapan se ubica dentro de las cuencas del Río Pánuco y Cuenca de México que pertenecen a la Región Hidrológica “RH26” Pánuco. Por

último, pequeñas fracciones de los municipios de Chignahuapan y Tetela de Ocampo se encuentran dentro de las cuencas Río Balsas y Río Salado pertenecientes a la Región Hidrológica “RH18” Balsas (Figura 1.4).

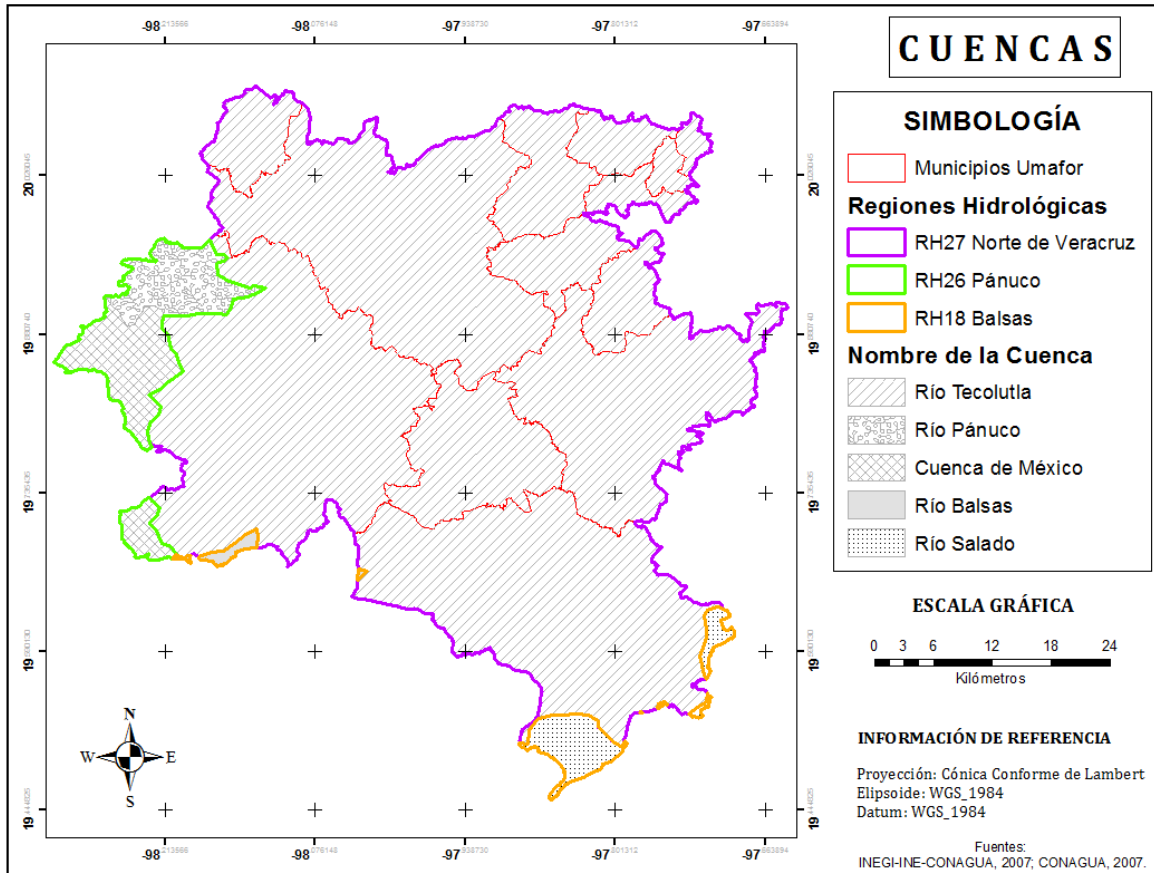


Figura 1.4. Regiones Hidrológicas y Cuencas de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

En la vertiente occidental de la UMAFOR, los municipios de Chignahuapan y Zacatlán son irrigados por las corrientes intermitentes superficiales donde destacan los ríos: Blanco, Agrío, San Pedro Tuliman, Hueyapan, Tlixtaca, Canautla y Atotonilco, que depositan sus aguas en el Río Ajajalpa perteneciente a la cuenca del Río Tecolutla. En la parte norte y noroeste de Chignahuapan hay corrientes temporales que fluyen al arroyo Atotonilco, afluente del Río Necaxa. Una gran parte de las avenidas que nacen en el noreste de Ahuazotepec y noroeste de Zacatlán descargan sus aguas en el Río Coacuilá que abastece, a su vez, a la presa Tenango (Figura 1.5) (SMRN, 2007).



En la vertiente oriental de la UMAFOR, se presentan corrientes superficiales que bajan a lo largo de todos sus afluentes para integrarse a los Ríos Zempoala y Apulco, principal abastecedor de la presa Soledad, para confluir en la cuenca del Río Tecolutla (Figura 1.5) (SMRN, 2007).

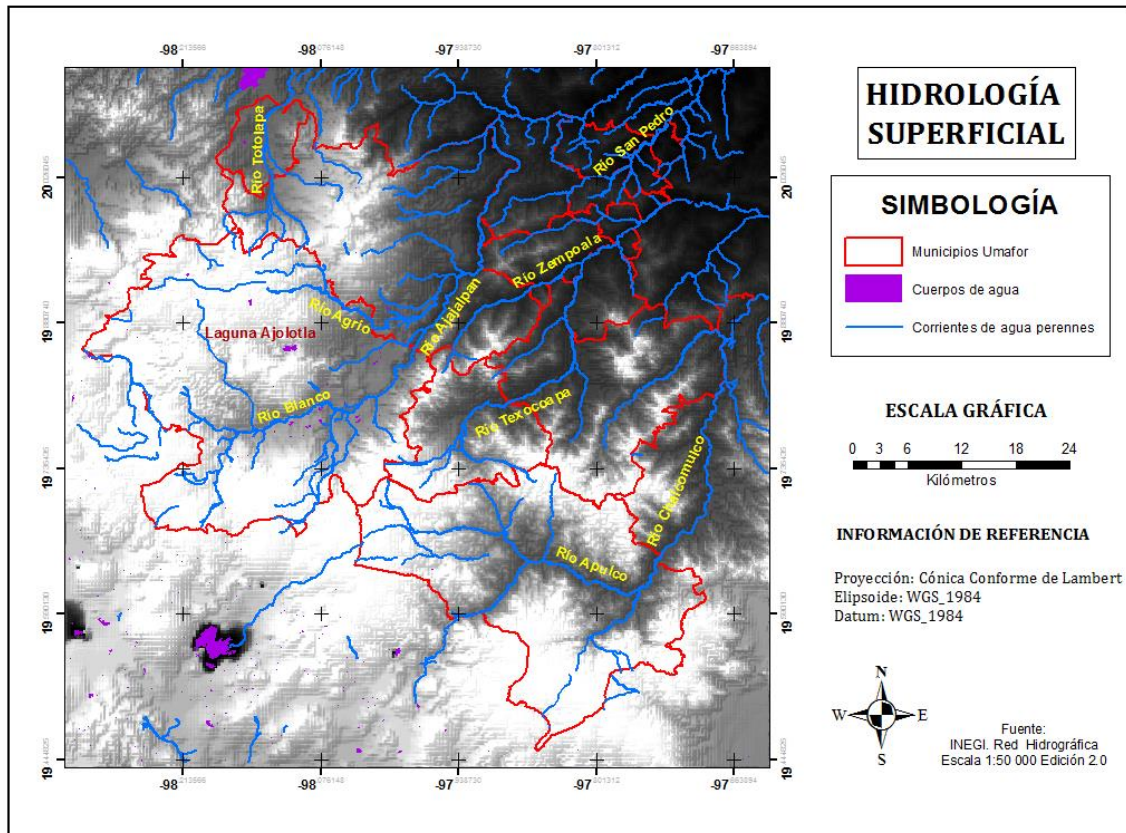


Figura 1.5. Hidrología superficial en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

### **Clima**

En la Figura 1.6 se observa la distribución de los diferentes tipos de climas y el porcentaje que cubren de la superficie total de estudio, los mejor representados son los siguientes:

**C(w1) templado subhúmedo:** Temperatura media anual entre 12 y 18°C. La temperatura del mes más frío varía de -3°C a 18°C y la del mes más caliente es de 22°C. La precipitación total anual varía de 600 a 1,000 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual (García y CONABIO, 1998). Este tipo de clima es predominante en la

UMAFOR Zacatlán, abarcando un 47.58% de su superficie total, cubriendo gran parte de los municipios de Chignahuapan, Aquixtla, Ixtacamaxtitlán y Tetela de Ocampo.

**C(w2) templado subhúmedo:** Temperatura media anual entre 12 y 18°C, la temperatura del mes más frío fluctúa entre -3 y 18°C y la del mes más caliente asciende hasta 22°C. La precipitación total anual va de 700 a 1,500 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual (García y CONABIO, 1998). Este tipo de clima cubre un 13.96% de la superficie, distribuyéndose en una franja de este a noroeste de la UMAFOR, incluyendo parte de los municipios de Tetela de Ocampo, Zacatlán y Ahuazotepec. Así también, cubre la parte sur del municipio de Chignahuapan y oeste de Ixtacamaxtitlán.

**C(m)(f) templado húmedo:** Temperatura media anual entre 12 y 18°C, con una temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y la temperatura del mes más caliente alrededor de 22°C. La precipitación total anual va de 1,000 a más de 2,000 mm anuales; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual (García y CONABIO, 1998). Este tipo de clima cubre un 12.72% de la superficie de la UMAFOR abarcando una franja de los municipios de Tetela de Ocampo, Zacatlán y Ahuazotepec.

**(A)C(fm) semicálido húmedo:** Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. La precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual (García y CONABIO, 1998). Cubre un 10.57% de la superficie total de la UMAFOR, abarcando en su totalidad los municipios de Coatepec, Camocuautla, Tepango de Rodríguez, Amixtlán y Ahuacatlán, y pequeñas porciones de los municipios de Zacatlán, Tepetzintla y Cuautempan.

Los otros tipos de climas presentes en el área de estudio y cubriendo una menor superficie de la misma, son: C(f) templado húmedo, Cb'(w2) semifrío subhúmedo,



C(w0) templado subhúmedo, BS1kw semiárido templado y Cb'(w1) semifrío subhúmedo.

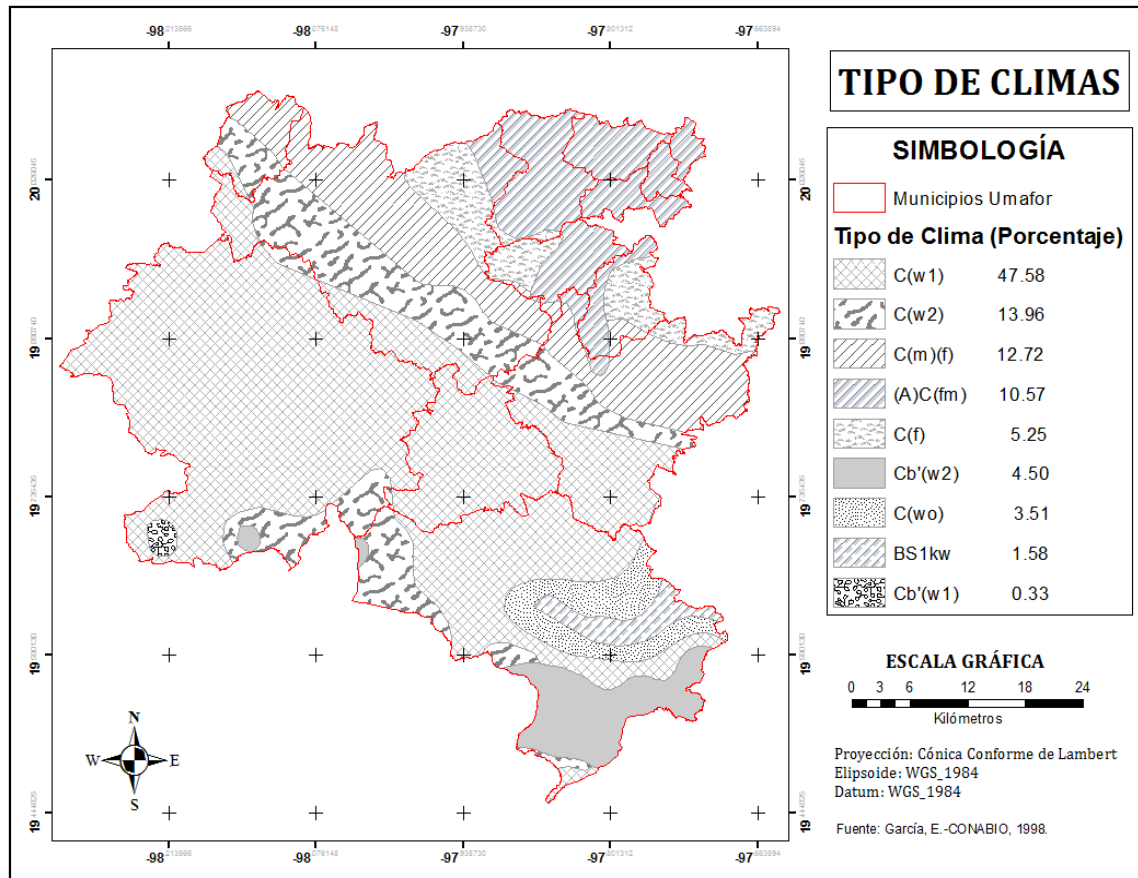


Figura 1.6. Tipos de climas de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

### Edafología

En la UMAFOR Zacatlán se presentan diferentes unidades de suelo, que de acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO (1968) son: Acrisol, Andosol, Cambisol, Feozem, Litosol, Luvisol, Planosol, Regosol, Rendzina y Vertisol (Figura 1.7).

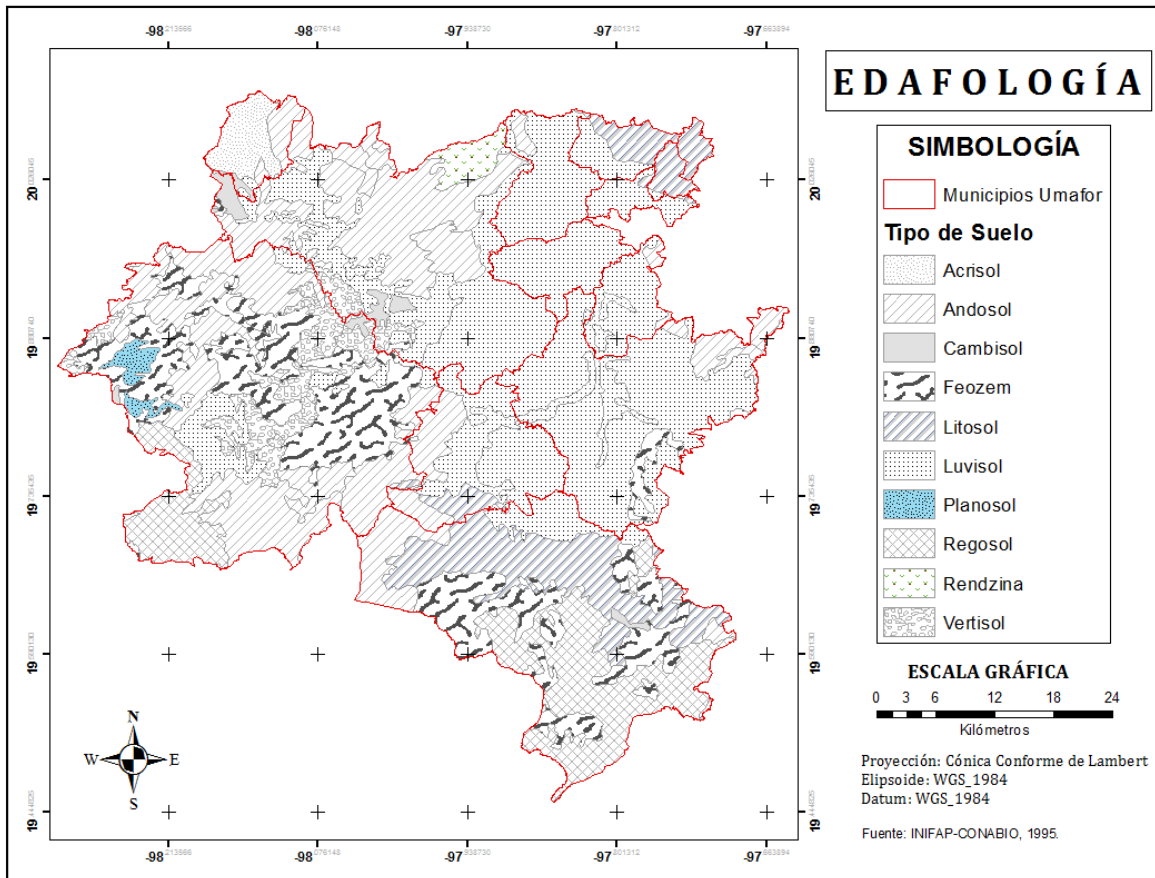


Figura 1.7. Distribución de suelos presentes en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

En los párrafos siguientes se describen brevemente los diferentes tipos de suelo, de acuerdo al porcentaje que cubren en el área de estudio.

**Luvisol:** El término luvisol proviene del latín *Luvi, Luo* que significa 'lavar', haciendo alusión al lavado de arcilla de los horizontes superiores para acumularse en una zona más profunda. Estos suelos son por lo general profundos, con textura de media a fina y rangos de pendiente entre 12 y 18%. Son suelos con alta susceptibilidad a la erosión, de un color pardo rojizo o amarillo rojizo, con horizonte B argílico y pH ligeramente ácido y materia orgánica con variación de 1.0 a 2.0%. El uso agrícola de estos suelos puede verse limitado cuando se presenta en conjunto con la fase lítica. En el área de estudio, el tipo de suelo presente es Luvisol órtico; el más representativo cubre 35.34% de la superficie total de la UMAFOR y se distribuye en los municipios de Zacatlán, Ahuacatlán, Amixtlán,

Tepango de Rodríguez, Camocuautla, Cuautempan, Tetela de Ocampo y Aquixtla, en relieves que van de ondulados a quebrados (SMRN, 2007).

**Andosol:** Suelos que se han formado a partir de cenizas volcánicas. En condiciones normales se encuentran asociados con el bosque templado. Debido a su textura poseen una alta susceptibilidad a la erosión eólica e hídrica. Su uso en la agricultura y ganadería (pastizales) es poco redituable (FitzPatrick, 1984). En la UMAFOR Zacatlán se encuentran los tipos Andosol húmico y ócrico, ocupando un 23.84% de la superficie total de la UMAFOR.

**Feozem:** Proviene de las raíces griegas *Phaeo*, 'pardo' y del ruso *Zemljá*, 'tierra', es decir, *tierra parda*. Son suelos ricos en materia orgánica y en nutrientes, con una amplia distribución ya que se les localiza desde zonas semiáridas, hasta templadas o tropicales. En condiciones normales mantienen casi cualquier tipo de vegetación, desarrollándose tanto en los terrenos planos como en los montañosos; su susceptibilidad a la erosión está relacionada con la geoforma donde se encuentran. Cuando estos suelos son especialmente profundos, se utilizan con éxito en el desarrollo de actividades agrícolas de riego y de temporal. Se localizan en laderas o pendientes y se emplean en actividades pecuarias con resultados aceptables (FitzPatrick, 1984). En el área de estudio se encuentran los tipos Feozem lúvico y háplico, cubriendo un 14.75% de la superficie de la UMAFOR.

**Regosol:** Proviene del griego Rhegos, 'manto' o 'cobija'; se denomina así por ser la capa de material suelto que cubre la roca. Son suelos someros y claros similares a la roca que les dio origen. Se presentan en diferentes climas y asociados a vegetación muy diversa. Poseen una alta susceptibilidad a la erosión. Sus características de poca profundidad y alta pedregosidad los hacen poco atractivos para el desarrollo de la agricultura (FitzPatrick, 1984). Se distribuyen en el área de estudio los tipos Regosol dístrico y eútrico, ocupando un 9.30% de la superficie total.

**Litosol:** Se caracterizan por tener una profundidad menor de 10 cm hasta la roca, tepetate o caliche duro. Sus características dependen del material que los ha formado, pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos, y su uso depende

de la vegetación que los cubre. En agricultura su empleo se condiciona a la presencia de agua y se ve limitado por el peligro de erosión. En la UMAFOR, este tipo de suelo ocupa un 8.45% de la superficie total, cubriendo los municipios de Coatepec, Camocuautla y parte de Amixtlán e Ixtacamaxitlán (SMRN, 2007).

Las otras unidades de suelo presentes en el área de estudio, cubren un porcentaje menor de la misma: Vertisol (crómico y pélico) un 4.28%, Acrisol (húmico) un 1.49%, Rendzina un 0.95%, Cambisol (húmico, dístrico, eútrico y cálcico) un 0.92% y Planosol mólico un 0.69%.

### ***Tipos de vegetación y usos de la tierra***

El estado de Puebla tiene una superficie continental de 34,289.66 km<sup>2</sup>, de la cual el mayor porcentaje corresponde a un uso agrícola con el 45.18% (15,491.95 km<sup>2</sup>), la superficie forestal cubre un 42.92% (14,717.88 km<sup>2</sup>), el pastizal representa el 10.04% (3,443.84 km<sup>2</sup>); al uso urbano le corresponde el 1.42% (488.48 km<sup>2</sup>), los cuerpos de agua y otros usos cubren el resto de la superficie del estado con un 0.44% (147.51 km<sup>2</sup>) (INEGI, 2007).

La Figura 1.8 muestra la distribución de los usos de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, siendo el uso predominante el agrícola con un 51.19% (137,710.32 ha); la superficie forestal cubre un 43.84% (117,928.28 ha) del total, al uso pecuario (pastizales) le corresponde un 4.71% (12,661.54 ha) de la superficie y el resto 0.26% (702.13 ha) es de uso urbano y cuerpos de agua (INEGI, 2007).

La superficie forestal de la UMAFOR (Figura 1.8) se encuentra integrada por: Bosque de Pino, Bosque de Pino-Encino, Bosque de Encino, Bosque de Encino-Pino, Bosque de Abies, Bosque de Táscate, Bosque Mesófilo, Matorral Desértico Rosetófilo y Vegetación Secundaria arbustiva y herbácea de los diferentes tipos de bosques presentes en el área de estudio (Figura 1.9) (INEGI, 2007).

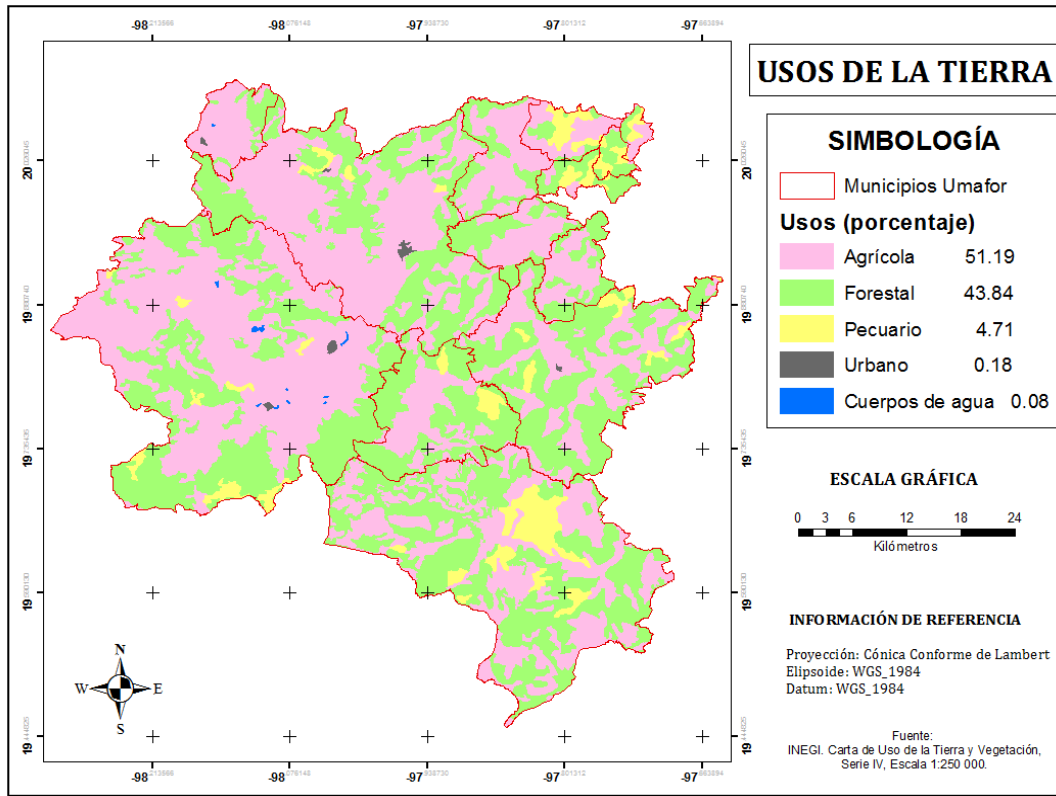
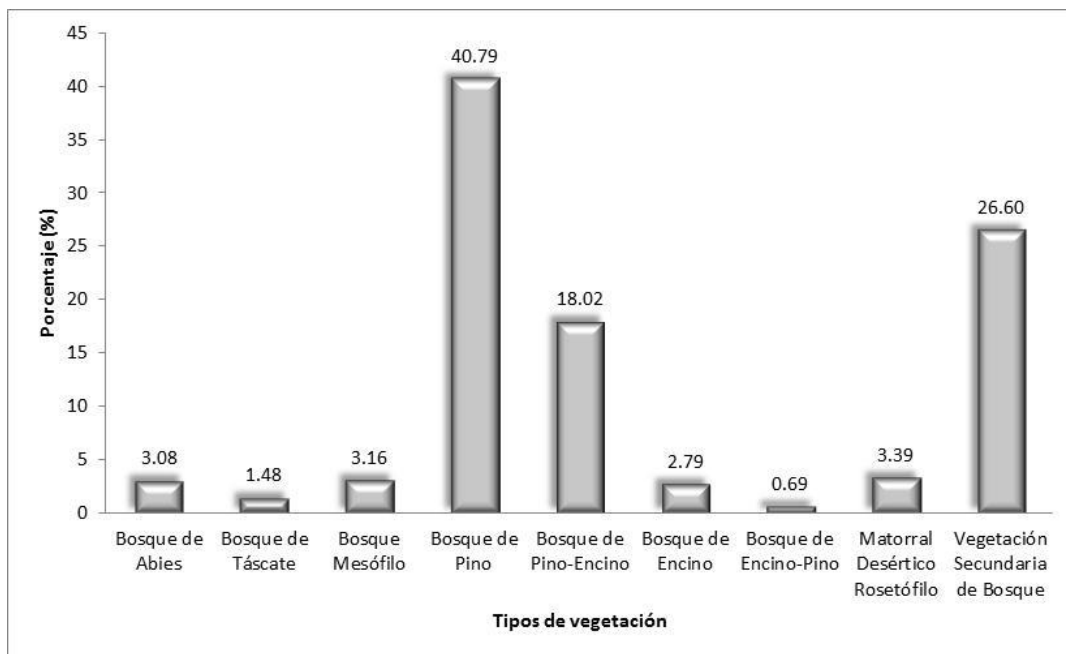


Figura 1.8. Distribución de los Usos de la tierra en la UMAFOR Zacatlán.



Fuente: INEGI (2007). Carta de Uso de la Tierra y Vegetación. Serie IV Esc 1:250 000

Figura 1.9. Tipos de vegetación presentes en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

En los párrafos siguientes se describen brevemente los tipos de vegetación más representativos mostrados en la Figura 1.9.

**Bosque de pino:** Este tipo de vegetación ocupa las partes más altas de la UMAFOR en altitudes superiores a los 2,500 m. Algunas de las especies más destacadas son: *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*, *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis* y *P. teocote* (SMRN, 2007).

Destaca en la región por su importancia el bosque de *Pinus patula* que se distribuye en el área de influencia de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán. Este bosque frecuentemente se presenta mezclado en su estrato superior con *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *P. teocote*, *Quercus laurina* y *Q. rugosa*. En el estrato arbustivo se encuentran especies como *Arbutus xalapensis* y *Baccharis conferta*, y en el estrato herbáceo a *Pteridium aquilinum*, *Eupatorium petiolare*, *Lepechinia caulescens*, *Lythrum acinifolium*, *Chimaphila umbellata* y *Alchemilla pectinata* (SMRN, 2007).

**Vegetación Secundaria de Bosque:** En la UMAFOR Zacatlán, la superficie con vegetación secundaria es alta y cada vez se incrementa más, principalmente en las regiones de clima cálido-húmedo y semi-húmedo. El número de asociaciones vegetales de carácter secundario es muy vasto y en su composición interviene una diversidad florística igual o mayor a la que presentan las asociaciones primarias o clímax (SMRN, 2007). Se reporta para el área de estudio fragmentos de vegetación secundaria arbustiva de prácticamente todos los tipos de bosques presentes en el área, y vegetación secundaria herbácea de Bosque Mesófilo, Bosque de Pino y Bosque de Encino (INEGI, 2007).

**Bosque de Pino-Encino:** La distribución de algunas especies en esta comunidad se ve influenciada por factores como exposición, humedad, temperatura y vientos. Siendo así, en exposición Este-Noreste con mayor humedad y temperatura domina en el estrato superior *Pinus patula*, y en un piso altitudinal más bajo se observa a *Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Clethra mexicana* y gran abundancia de helechos. En exposición Este, donde cambian las condiciones a una menor humedad y mayor temperatura domina *Pinus leiophylla* (SMRN, 2007).

En las laderas de las sierras de la región se encuentra este tipo de bosque a más de 2,500 m de altitud, y algunas de las especies reportadas para estas zonas son: *P. patula*, *P. teocote*, *Quercus scytophylla* y *Q. conglomerata*. Así también, en la sierra del municipio de Tetela de Ocampo, este bosque se encuentra en manchones aislados y algunas de las especies que lo integran son: *P. patula*, *P. leiophylla*, *P. montezumae* y *Q. crassifolia* en el estrato arbóreo; *Alnus jorullensis* y *Arbutus xalapensis*, en el estrato medio; *Baccharis conferta* y *Pteridium* spp., en el estrato inferior (SMRN, 2007).

**Matorral Desértico Rosetófilo:** Se distribuye en pequeñas extensiones sobre las laderas occidentales del municipio de Ixtacamaxtitlán, a más de 2,400 m de altitud. Es una agrupación vegetal donde predominan las plantas con hojas largas, carnosas, espinosas y con disposición de los tallos reducidos en forma de roseta. Las especies más características son: *Agave lechuguilla*, *Hechtia* spp., *Dasyllirion* spp., *Yucca filifera*, *Euphorbia antisiphilitica*, *Fouquieria* spp. y *Opuntia* spp. (SMRN, 2007).

**Bosque Mesófilo:** Este tipo de bosque se encuentra fundamentalmente en las laderas orientales de la sierra, entre altitudes que van de 1,400 a 1,800 m, en pendientes de 30 a más de 40% y con grados de alta perturbación. La estructura y composición es variable y cambia de un lugar a otro en función de variantes climáticas ocasionadas por diferencias de altitud, exposición y grados de disturbio. Las especies más importantes pertenecen a los géneros *Liquidambar*, *Carpinus*, *Engelhardtia*, *Quercus*, *Clethra*, *Podocarpus*, *Magnolia*, *Oreopanax*, *Juglans*, *Persea*, *Ostria*, *Chaepotelea*, y una gran variedad de Pteridofitas (SMRN, 2007).

**Bosque de Abies:** Estos bosques se localizan en las partes más altas de los municipios de Ixtacamaxtitlán, Chignahuapan y Aquixtla, conformando masas puras de *Abies religiosa* (oyamel). En altitudes mayores de 3,000 m es más frecuente encontrar manchones de oyamel mezclados con especies de pino, y a menos de los 3,000 m se mezcla con especies de encino (SMRN, 2007).

**Bosque de Encino:** Las especies más representativas son: *Quercus sororia*, *Q. furfuracea*, *Q. excelsa*, *Q. calophylla*, *Q. candolleana* y *Q. polymorpha*. Este tipo

de vegetación rara vez se presenta en una condición pura, debido a la afinidad ecológica que comparte con otras comunidades y generalmente se encuentra mezclado con géneros como: *Pinus*, *Juniperus*, *Alnus*, *Prunus*, *Nyssa* y *Ostria*, entre otros (SMRN, 2007).

**Bosque de Táscate:** Se caracteriza porque predomina el género *Juniperus* (táscate, cedro o enebro). Se localiza en pequeñas áreas del municipio de Ixtacamaxtitlán, particularmente en condiciones ecológicas más secas que donde se encuentran los bosques de pino-encino. Fisonómicamente puede variar desde matorrales hasta árboles de 15 m de altura (SMRN, 2007).

### ***Fauna silvestre***

Como se menciona en el Estudio Regional Forestal (ERF) de la UMAFOR Zacatlán (SMRN, 2007), algunas especies de fauna se encuentran en una amplia variedad de hábitats y otras restringen su presencia a uno solo, debido a la especialización que tienen en cuanto aclimatación, hábitos alimenticios y características reproductivas.

En dicho ERF, se reporta la existencia de fauna silvestre asociada a cada uno de los tipos de vegetación presentes en la UMAFOR; sin embargo, las especies reportadas como comunes a la mayor parte del área de estudio, son: gavilán (*Buteo* sp.), halconcillo (*Falco sparverius*), aura común (*Cathartes aura*), cuervo (*Corvus corax*), murciélagos (*Mormoops megalophylla*, *Myotis velifer*, *Tadarida brasiliensis*), comadreja (*Mustela frenata*), tlacuache (*Didelphys marsupialis*), conejo del este o castellano (*Sylvilagus floridanus*), zorrillo listado (*Mephitis macroura*), culebra (*Salvadora bairdi*), lagartija (*Sceloporus grammicus*) y falso coralillo (*Imantodes* sp.).

El Cuadro 1.1 presenta las especies que tienen alguna categoría de riesgo de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT y que son posibles de encontrar en el territorio de la UMAFOR Zacatlán (SMRN, 2007).



Cuadro 1.1. Especies de fauna en riesgo de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Nombre científico	Nombre común	Categoría
<i>Picoides stricklandi</i>	Carpintero trepador	Protección especial
<i>Sorex saussurei</i>	Musaraña	Protección especial
<i>Sciurus oculatus</i>	Ardilla	Protección especial
<i>Felis pardalis</i>	Ocelote	Peligro de extinción
<i>Felis yagouaroundi</i>	Jaguarundi	Amenazada
<i>Thamnophis scalaris</i>	Culebra de agua	Amenazada
<i>Pituophis deppei</i>	Cincuate	Amenazada
<i>Phrynosoma orbiculare</i>	Camaleón	Amenazada
<i>Sceloporus grammicus</i>	Lagartija	Protección especial
<i>Salvadora bairdi</i>	Culebra	Protección especial
<i>Coluber constrictor</i>	Mazacuata	Amenazada
<i>Crotalus durissus</i>	Víbora de cascabel	Protección especial
<i>Crotalus sp.</i>	Víbora de cascabel	Amenazada

Fuente: SMRN (2007).

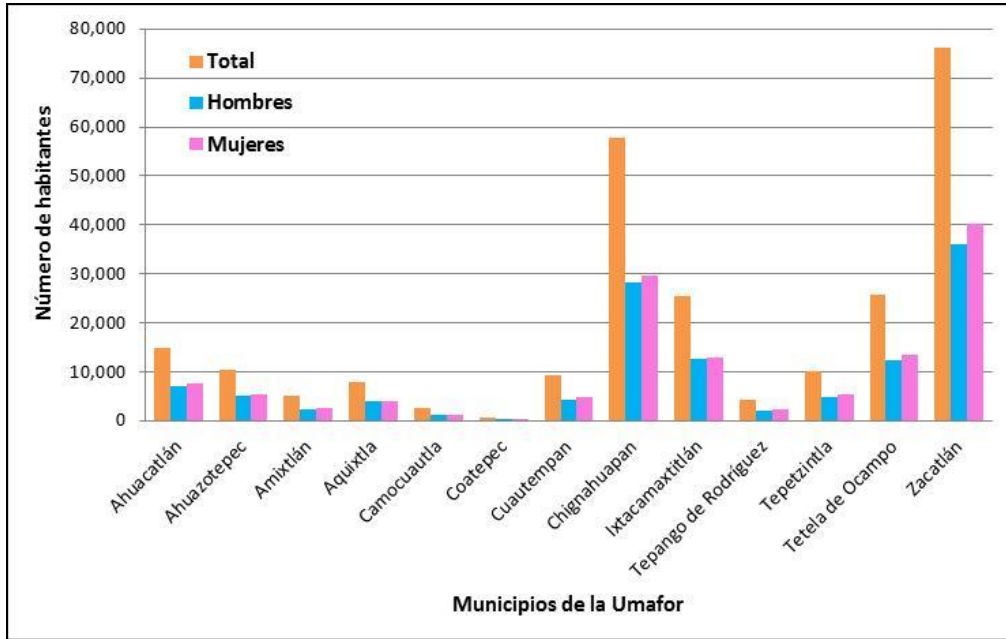
#### 1.2.4. Aspectos socioeconómicos

##### ***Población y localidades***

De acuerdo a los datos del Censo de Población y Vivienda 2010, la UMAFOR Zacatlán tiene una población total de 250,317 habitantes, de los cuales 120,638 (48.19%) son hombres y 129,679 (51.81) corresponde a población femenina. La distribución de estos datos por municipio se observa en la Figura 1.10.

El número total de localidades que integran la UMAFOR Zacatlán es de 592, de éstas, 573 son localidades rurales y 19 localidades urbanas (Cuadro 1.2.). De acuerdo a los criterios establecidos por INEGI (2010a), una población se considera rural cuando tiene menos de 2,500 habitantes, y una población es urbana cuando presenta más de 2,500 habitantes o es capital municipal (INEGI, 2010b).

En la Figura 1.11 se observa la distribución espacial de las localidades en la UMAFOR, así como la delimitación de los polígonos urbanos de los municipios con mayor densidad poblacional.



Fuente: INEGI (2010b).

Figura 1.10. Número de habitantes por municipio de la UMAFOR Zacatlán.

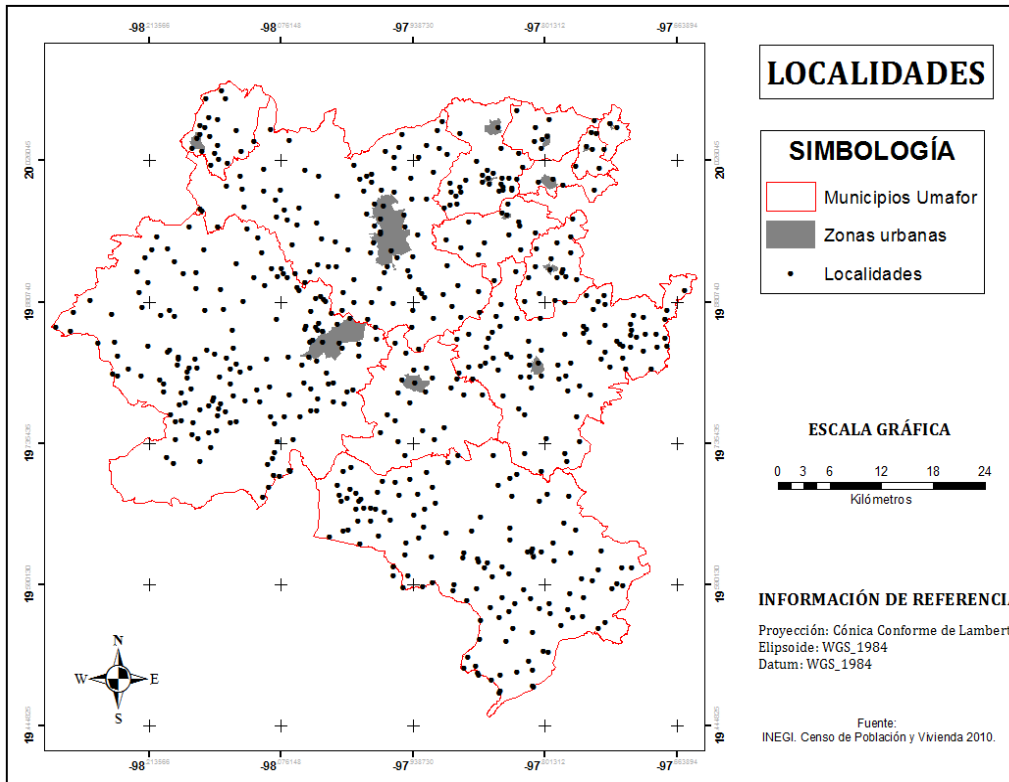


Figura 1.11. Distribución de localidades de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

La densidad poblacional para el estado de Puebla se reporta de 168.48 habitantes por km<sup>2</sup>; para la UMAFOR Zacatlán la densidad de la población es en promedio de 115.77 habitantes por km<sup>2</sup> (INEGI, 2010b). En el Cuadro 1.2 se muestran los datos de densidad poblacional para cada municipio que integra el área de estudio.

Cuadro 1.2. Datos poblacionales de los municipios de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Municipio	Número de localidades		Población total	Densidad poblacional (hab/km <sup>2</sup> )	Tasa de crecimiento poblacional (%)	Grado de marginación
	Rurales	Urbanas				
Ahuacatlán	28	2	14,754	162.17	1.00	Muy alto
Ahuazotepec	19	2	10,457	172.76	1.20	Medio
Amixtlán	7	1	5,004	111.25	1.10	Muy alto
Aquixtla	21	1	7,848	47.13	0.20	Alto
Camocuautla	6	1	2,476	152.46	0.90	Muy alto
Coatepec	2	1	758	61.93	-0.90	Alto
Cuautempan	16	1	9,212	149.64	0.80	Alto
Chignahuapan	154	3	57,909	76.17	1.10	Medio
Ixtacamaxtitlán	125	1	25,326	44.59	0.30	Alto
Tepango de Rodríguez	3	1	4,244	148.03	1.40	Muy alto
Tepetzintla	14	1	10,240	144.47	0.80	Muy alto
Tetela de Ocampo	84	1	25,793	78.45	0.40	Alto
Zacatlán	94	3	76,296	155.92	1.30	Medio

Fuentes: INEGI (2010b); SMRN (2007) y CONAPO (2010).

La tasa de crecimiento promedio anual de la población en la UMAFOR Zacatlán, en el período comprendido de 1970 a 2005, es de 0.7%, y para el estado de Puebla se registra un promedio de crecimiento anual del 1.0%. Los municipios de Aquixtla y Tetela de Ocampo registran los índices de crecimiento más bajos, 0.2 y 0.4% respectivamente; sólo el municipio de Coatepec registra un decremento del 0.9% (Cuadro 1.2) (SMRN, 2007).

Los índices de marginación permiten medir las condiciones de pobreza y el rezago social de una población determinada y de estos índices se obtiene el grado de marginación respectivo (Muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo). Como se observa

en el Cuadro 1.2, de los 13 municipios que integran la UMAFOR Zacatlán, cinco de ellos presentan el mayor grado de marginación (muy alto), otros cinco se reportan con un grado de marginación alto, y sólo 3 municipios se consideran con un grado medio de marginación (CONAPO, 2010).

La comunidad indígena en la UMAFOR se encuentra representada por 53,300 habitantes de 3 a 130 años que hablan alguna lengua indígena; de éstos, 87% hablan además el español y el restante 13% sólo hablan su lengua indígena natal (INEGI, 2010b). Las lenguas indígenas son el Náhuatl y la Totonaca (SMRN, 2007; SNIM, 2010). En el Cuadro 1.3 se desglosa la información anterior por municipio.

Cuadro 1.3. Habitantes de la UMAFOR Zacatlán que hablan alguna lengua indígena.

Municipio	Población total	Número de habitantes que hablan alguna Lengua Indígena			Lenguas Indígenas habladas	
		Porcentaje de la población total	Sólo Lengua Indígena	Lengua Indígena y Español	Náhuatl (%)	Totonaca (%)
Ahuacatlán	14,754	85.49	2,383	10,230	48	52
Ahuazotepec	10,457	0.62	0	65	100	0
Amixtlán	5,004	67.81	345	3,048	1	99
Aquixtla	7,848	4.87	0	382	100	0
Camocuautla	2,476	92.37	711	1,576	0	100
Coatepec	758	80.61	123	488	1	99
Cuautempan	9,212	63.51	144	5,707	100	0
Chignahuapan	57,909	0.40	1	229	90	10
Ixtacamaxitlán	25,326	10.19	2	2,578	99	0
Tepango de Rodríguez	4,244	79.08	624	2,732	0	100
Tepetzintla	10,240	85.37	2,001	6,741	60	40
Tetela de Ocampo	25,793	20.17	123	5,079	100	0
Zacatlán	76,296	10.47	450	7,538	80	20

Fuentes: INEGI (2010b); SMRN (2007) y SNIM (2010).

La población de 12 años y de más edad en la UMAFOR es de 108,936 habitantes, de los cuales 88,335 (81.08%) son económicamente activos, siendo los hombres los que representan el 74.3% (65,634) de esta población. La población ocupada es

de 85,287 (78.29%) habitantes, quedando una población desocupada de 3,048 habitantes en la UMAFOR (INEGI, 2010b). El Cuadro 1.4 muestra la distribución de la población económicamente activa, ocupada y desocupada por municipio.

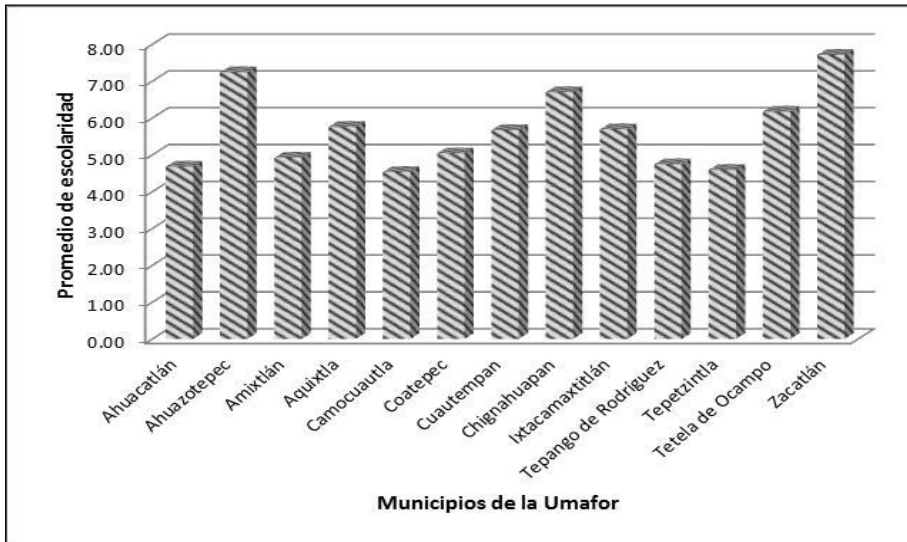
Cuadro 1.4. Población económicamente activa en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Municipio	Población Económicamente Activa	Población Ocupada	Población Desocupada	Población No Económicamente Activa
Ahuacatlán	4,764	4,550	214	1,281
Ahuazotepec	3,564	3,256	308	937
Amixtlán	1,397	1,374	23	528
Aquixtla	2,955	2,904	51	560
Camocuautla	599	569	30	271
Coatepec	152	151	1	151
Cuautempan	2,998	2,882	116	678
Chignahuapan	21,160	20,650	510	4,513
Ixtacamaxtitlán	8,302	7,921	381	2,047
Tepango de Rodríguez	1,313	1,230	83	456
Tepetzintla	3,364	3,299	65	755
Tetela de Ocampo	9,178	8,885	293	2,006
Zacatlán	28,589	27,616	973	6,418

Fuente: INEGI (2010b).

### **Educación**

La población de 15 años y más edad en la UMAFOR Zacatlán es de 167,011 habitantes, de los cuales 29,144 (17.45%) no saben leer ni escribir, y la mayor cantidad de esta población analfabeta lo representa el género femenino con 17,800 mujeres (61.08%). En la Figura 1.12 se muestran los promedios de escolaridad por municipio, de los habitantes que reportaron algún grado de estudio aprobado (INEGI, 2010b).

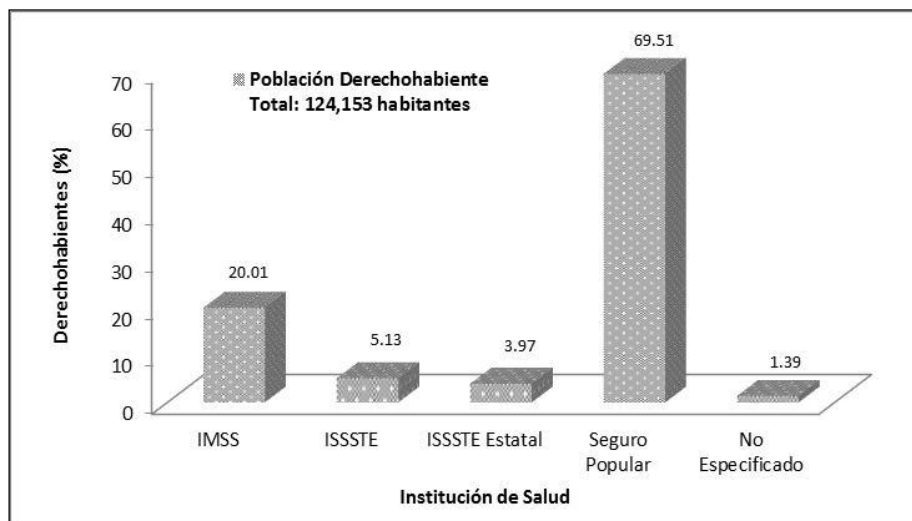


Fuente: INEGI (2010b).

Figura 1.12. Grado promedio de escolaridad para los municipios de la UMAFOR.

### Salud y Seguridad Social

De la población total de la UMAFOR Zacatlán (250,317 habitantes), 49.60% son personas que reciben servicios médicos en alguna institución de salud pública o privada; el resto de la población (50.40%) no se encuentra afiliada a ninguna institución médica. En la Figura 1.13 se observa la distribución de los derechohabientes por institución de salud (INEGI, 2010b).



Fuente: INEGI (2010b).

Figura 1.13. Población derechohabiente por institución de salud en la UMAFOR.

## **Actividades productivas**

La mayoría de los municipios de la UMAFOR Zacatlán pertenecen al Distrito de Desarrollo Rural (DDR) No. 112 Zacatlán y al Centro de Apoyo al Desarrollo Rural (CADER) No. 3 Zacatlán; excepto el municipio de Ahuazotepec que pertenece al DDR No. 111 Huachinango y al CADER No. 1 Xicotepec de Juárez (SAGARPA, 2012). La economía de la UMAFOR se basa principalmente en actividades primarias: Agricultura, ganadería y aprovechamiento forestal (SAGARPA, 2009).

### **Agricultura**

La superficie destinada a la agricultura en la UMAFOR Zacatlán es de 136,852.20 ha, que representa el 51.19% del total de la superficie de la UMAFOR. Los principales cultivos agrícolas en la región son: Maíz de grano, avena forrajera, chile verde, frijol, alfalfa verde y trigo de grano (SAGARPA, 2009). Respecto a la fruticultura, se dedican a esta actividad 4,000 ha, consideradas dentro de la superficie agrícola, siendo los principales frutos producidos: Manzana, ciruelo, aguacate, pera y durazno (SMRN, 2007). En el Cuadro 1.5 se presentan los principales datos de la superficie cultivada en la UMAFOR (SAGARPA, 2009).

Cuadro 1.5. Superficie sembrada, cosechada y valor de la producción de los municipios que conforman la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Municipio	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Valor de la producción (Miles de pesos)
Ahuacatlán	1,557.65	1,557.65	9,668.85
Ahuazotepec	2,824.00	2,824.00	18,924.88
Amixtlán	1,256.75	1,256.75	12,871.72
Aquixtla	4,891.50	2,571.25	24,140.32
Camocuautla	628.48	628.48	4,272.21
Chignahuapan	21,048.00	2,549.97	34,050.86
Coatepec	465.61	465.61	3,453.14
Cuautempan	2,170.25	2,170.25	27,977.55
Ixtacamaxtitlán	11,710.00	2,515.90	33,926.05
Tepango de Rodríguez	492.10	492.10	4,686.04
Tepetzintla	1,213.00	1,213.00	9,035.50
Tetela de Ocampo	4,357.00	2,297.00	33,132.31
Zacatlán	21,956.15	18,882.15	108,127.92
<b>Total</b>	<b>74,570.49</b>	<b>39,424.11</b>	<b>324,267.35</b>

La actividad agrícola en la zona bajo estudio, es de alto riesgo dado que en el año 2009 se tuvieron pérdidas del 52.86% de superficie cosechada respecto a la sembrada (Cuadro 1.5) principalmente debido a la sequía atípica presentada en dicho año, lo que indica que son zonas con bajo a mediano potencial productivo para este ramo, pero por las necesidades de producir alimentos se siguen utilizando para la agricultura.

## Ganadería

La superficie cubierta de pastizales es de 12,568.69 ha, que corresponde al 4.70% del total de la UMAFOR Zacatlán. La actividad ganadera es extensiva y aporta alrededor del 27% de los ingresos a las familias que se dedican a esta actividad. La producción avícola es una de las favorecidas en la región y se debe al bajo costo relativo de producción y al precio de venta respecto a las otras especies ganaderas. En zonas como Aquixtla se produce la cría de conejo para un mercado esencialmente local. La cría de ganado equino tiene uso preferente como animales de carga y en las labores de siembra y acarreo de troza en los aprovechamientos forestales (SMRN, 2007). En el Cuadro 1.6 se reportan los principales volúmenes de producción pecuaria de los municipios que conforman la UMAFOR Zacatlán (SAGARPA, 2009).

Cuadro 1.6. Volúmenes de producción pecuarias de los municipios de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Municipio	Volumen de producción anual de carne en canal (Ton)				Producción de leche de bovino (Miles de l)	Producción de huevo para plato (Ton)	Producción de miel (Ton)
	Ovino	Caprino	Gallinácea	Guajolote			
Ahuacatlán	34.00	18.00	243.00	5.00	0.00	33.00	6.00
Ahuazotepec	18.00	0.00	85.00	12.00	891.00	27.00	5.00
Amixtlán	28.00	9.00	223.00	4.00	0.00	28.00	11.00
Aquixtla	36.00	46.00	343.00	11.00	2,609.00	39.00	10.00
Camocuautla	19.00	0.00	138.00	3.00	0.00	18.00	8.00
Chignahuapan	217.00	97.00	729.00	49.00	3,757.00	75.00	37.00



Municipio	Volumen de producción anual de carne en canal (Ton)				Producción de leche de bovino (Miles de l)	Producción de huevo para plato (Ton)	Producción de miel (Ton)
	Ovino	Caprino	Gallinácea	Guajolote			
Coatepec	8.00	4.00	87.00	3.00	0.00	20.00	5.00
Cuautempan	41.00	32.00	114.00	5.00	0.00	23.00	10.00
Ixtacamaxtitlán	57.00	89.00	426.00	33.00	0.00	42.00	10.00
Tepango de Rodríguez	17.00	20.00	109.00	5.00	0.00	29.00	13.00
Tepetzintla	7.00	7.00	195.00	5.00	0.00	29.00	13.00
Tetela de Ocampo	55.00	69.00	352.00	34.00	1,254.00	47.00	10.00
Zacatlán	204.00	82.00	572.00	50.00	2,639.00	79.00	33.00
<b>Total</b>	<b>741.00</b>	<b>473.00</b>	<b>3,616.00</b>	<b>219.00</b>	<b>11,150.00</b>	<b>489.00</b>	<b>171.00</b>

Fuente: SAGARPA (2009).

## Silvicultura

La actividad forestal legal se desarrolla básicamente en los macizos forestales de bosques templados de los municipios de Ahuazotepec, Aquixtla, Cuautempan, Chignahuapan, Ixtacamaxtitlán, Tetela de Ocampo y Zacatlán. En la región hay 61 ejidos administrando y aprovechando directamente sus recursos forestales bajo un manejo forestal; los beneficios de estos aprovechamientos representan un ingreso anual seguro para las familias de 18,477 ejidatarios y comuneros y para 622 propietarios particulares (SMRN, 2007).

Como parte del Estudio Regional Forestal que se realizó para la UMAFOR Zacatlán en el año 2007, se obtuvieron los datos de existencias maderables por tipo de vegetación a nivel regional. A partir de este análisis se obtuvo que las existencias maderables (metros cúbicos rollo total árbol, m<sup>3</sup>rta) de los bosques de la UMAFOR son de 13,843,735 m<sup>3</sup>rta, de los cuales 10,135,075 m<sup>3</sup>rta (73.21%) corresponden a bosques de coníferas. En los bosques mezclados de pino y encino existen 2,431,517 m<sup>3</sup>rta (17.56%) y a los bosques de encino le corresponden

377,101 m<sup>3</sup>rta (2.72%). El resto de existencias maderables que son 900,042 m<sup>3</sup>rta corresponde a vegetación secundaria de bosques (SMRN, 2007).

Se identifica al municipio de Chignahuapan como el de mayor importancia forestal con 4,433,326 m<sup>3</sup>rta y al municipio de Coatepec como el que menor volumen de madera total registra con tan sólo 24,046 m<sup>3</sup>rta (SMRN, 2007).

Respecto al volumen de la producción forestal maderable de coníferas, se reporta que para la UMAFOR Zacatlán durante el año 2009 se produjeron 138,525 m<sup>3</sup>rta, distribuidos en siete municipios, siendo estos: Ahuazotepec (3,061 m<sup>3</sup>rta), Aquixtla (9,633 m<sup>3</sup>rta), Chignahuapan (92,283 m<sup>3</sup>rta), Cuautempan (86 m<sup>3</sup>rta), Ixtacamaxtitlán (13,144 m<sup>3</sup>rta), Tetela de Ocampo (3,069 m<sup>3</sup>rta) y Zacatlán (17,249 m<sup>3</sup>rta) (INEGI, 2009).

### **1.3. CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA**

#### **1.3.1. En México**

La deforestación, entendida como un proceso de cambio de cubierta forestal de la tierra a otro tipo de uso (por ej., residencial, agrícola, pecuario, industrial), influye directamente en la reducción y fragmentación de los recursos forestales, modificando su estructura y funcionamiento de manera negativa; teniendo consecuencias como la pérdida de biodiversidad, de valores estéticos y culturales, la alteración del ciclo hidrológico y de los procesos de formación, productividad de los suelos y cambios en el paisaje, entre otros.

En la última década, los estudios de los cambios de uso de la tierra en México se han incrementado. Estos estudios, debido a factores que van desde las características biofísicas de México hasta las técnicas de análisis usadas para cada uno de ellos, muestran gran variación en las tendencias publicadas de cambio de uso de la tierra, específicamente las relativas a tasas de deforestación. El Cuadro 1.7 presenta la evidencia de lo anterior, con base al análisis realizado por Velázquez (2008) y modificado por Mas (2009).

Cuadro 1.7. Comparación entre tasas de deforestación totales para México.

Fuentes académicas		Fuentes oficiales	
Fuente	Tasa de deforestación (ha/año)	Fuente	Tasa de deforestación (ha/año)
Grainger, 1984	1,600,000	FAO, 1988	615,000
Castillo <i>et al.</i> , 1989	746,000	SARH, 1992	365,000
Myers, 1989	700,000	SARH, 1994	370,000
Toledo, 1989	1,500,000	FAO, 1995	678,000
Masera <i>et al.</i> , 1997	668,000	FAO, 1997	508,000
Repetto, 1988	460,000	FAO (Torres), 2004	775,800
Velázquez <i>et al.</i> , 2002	550,000	CONAFOR, 2004	260,000
Sánchez <i>et al.</i> , 2008	484,000	SEMARNAT, 2006	365,000
<b>Media</b>	838,500	<b>Media</b>	492,100
<b>Desviación estándar</b>	451,417	<b>Desviación estándar</b>	181,851

Fuentes: Velázquez (2008) y Mas (2009).

En el informe más reciente de FAO (2011), se indica que México notificó que la tasa de pérdidas de bosque disminuyó en los últimos 20 años: Para el periodo 1990-2000 el cambio anual era de 354,000 ha, para el período 2000-2010 el cambio anual fue de 195,000 ha.

Respecto a las tasas de deforestación reportadas para los principales ecosistemas en México, el Cuadro 1.8 muestra los datos con una alta variabilidad que es atribuible a técnicas utilizadas en los diferentes estudios realizados (SEMARNAT, 2010).

Cuadro 1.8. Tasas de deforestación por tipo de vegetación para México.

Municipio	Tasas de deforestación (ha/año)			
	Bosques	Selvas	Zonas Áridas	Total
FAO, 1988	125,000	470,000	20,000	615,000
Repetto, 1988	nd	460,000	nd	460,000

Municipio	Tasas de deforestación (ha/año)			
	Bosques	Selvas	Zonas Áridas	Total
Castillo <i>et al.</i> , 1989	273,000	473,000	nd	746,000
SARH, 1990	127,000	202,000	41,000	370,000
SARH, 1991	127,000	189,000	54,000	370,000
Masera <i>et al.</i> , 1992	167,000	501,000	nd	668,000
SEMARNAT, 2000	259,000	510,000	307,000	1,076,000

Fuente: SEMARNAT (2010).

De acuerdo al Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (SEMARNAT, 2008), se reporta que hasta el año 2002 se habían perdido en el país un total de 222 mil km<sup>2</sup> de selvas, 129 mil de bosques, 51 mil de matorrales y cerca de 60 mil km<sup>2</sup> de pastizales. Así también, considerando solo vegetación primaria, entre los años setenta y el año 2002 se perdieron 14.4 millones de ha de bosques y selvas y 3.2 millones de ha de matorrales. En contraste, los terrenos agropecuarios pasaron de 40 millones de ha en la década de los años setenta, a cerca de 50 millones para el año 2002.

El reporte de SEMARNAT (2009) también indica que entre el 2002 y el 2007, las selvas perdieron anualmente en promedio poco más de 175 mil ha, los bosques templados poco menos de 7 mil, los matorrales xerófilos alrededor de 136 mil y los pastizales naturales poco más de 84 mil ha. Para el año 2007 los ecosistemas que habían perdido un mayor porcentaje de su superficie original fueron las selvas (42%), seguidas de los bosques mesófilos de montaña (40%), los bosques templados (27%) y los matorrales (10%).

De acuerdo al estudio realizado por Velázquez *et al.* (2002), en el periodo de 1976 a 2000 se perdieron en México 130,752 km<sup>2</sup> de vegetación forestal, de los cuales 20,813 pertenecen a bosques, 63,258 a selvas y 46,681 km<sup>2</sup> a matorrales. Las tasas de cambio se reportan negativas para los bosques, selvas, matorrales, vegetación hidrófila y pastizales naturales; mientras que para los pastizales inducidos y cultivados, para los cultivos y otros tipos de coberturas, son positivas.

El origen de la deforestación es variable dependiendo de los ecosistemas. Para el caso de México, en las selvas tropicales, el 70.5% es causada por las actividades agropecuarias, mientras que en los bosques templados, el principal factor son los incendios forestales con 48.2% (SEMARNAT, 2006). En la Figura 1.14 se puede observar el porcentaje que aportan cada uno de los principales factores que contribuyen al proceso de deforestación.

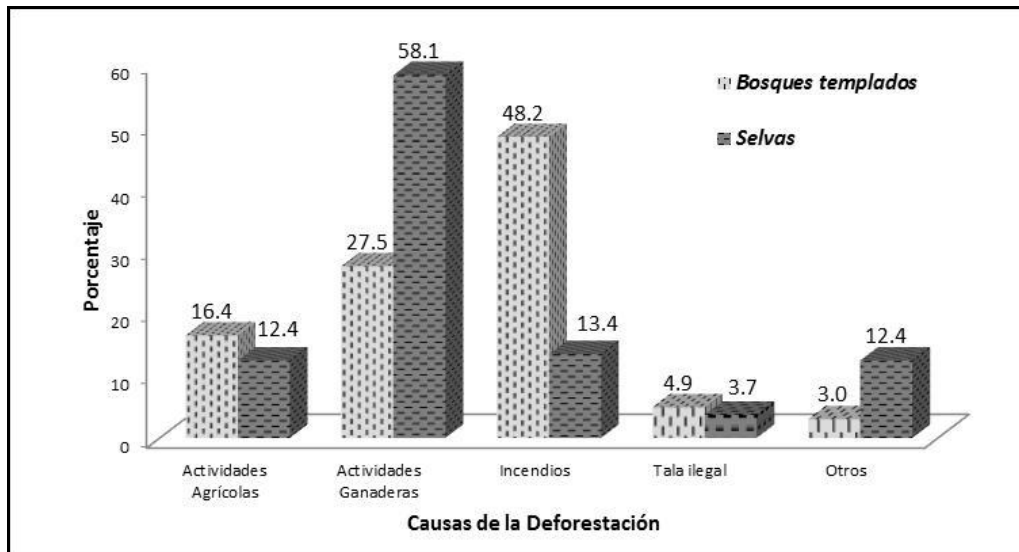


Figura 1.14. Causas de la deforestación en México

En los últimos 40 años, la deforestación y degradación de ecosistemas forestales en el estado de Puebla, ha sido uno de los problemas más graves de las zonas rurales que tienen mayor grado de marginación en su población (SMRN, 2007). Entre 1970 y 1990, se registraron pérdidas significativas de superficie de bosques y selvas en la mayoría de los municipios de Puebla, debido a procesos de cambio de uso de la tierra de forestal a agrícola y ganadero, principalmente. En 19 de estos municipios, la superficie de bosques que se perdió significó el 100% de la reportada en 1970, presentándose además en municipios de marginación alta y muy alta (CONAPO, 1998).

### **1.3.2. En la UMAFOR Zacatlán**

En la Región de la Sierra Norte de Puebla, donde se encuentra integrada la UMAFOR Zacatlán, se reporta que entre los años 1970 y 1990 la superficie agrícola aumentó en términos relativos de 40 a 43%, la de pastos pasó de 34 a 51% y la forestal disminuyó de 18 a 6%. El 85% de los municipios de la región sufrieron procesos de deforestación, sobresaliendo los saldos negativos registrados para los municipios de Chignahuapan, Ixtacamaxitlán, Aquixtla, Ahuazotepec, Zihuateutla y Zacatlán, en los cuales la pérdida de la vegetación original ha sido provocada por la incorporación de tierras al cultivo e introducción de pastizales, principalmente (CONAPO, 1998).

Como parte del Estudio Regional Forestal (ERF) (SMRN, 2007), se realizó para la UMAFOR Zacatlán un análisis de cambios de uso de la tierra mediante la comparación de las Cartas de Uso de Suelo y Vegetación Series I y II de INEGI, obteniendo que para el periodo de 1986 a 2000, la deforestación ocurrió en 24,076 ha (que representa casi el 9% de la superficie total y el 20% respecto a la superficie forestal de la zona de estudio) a una tasa anual de 1,720 ha. Así también, para el mismo periodo se obtuvo que el proceso de degradación ocurrió en un total de 13,938 ha a una tasa anual de 995.6 ha. Esto indica que la UMAFOR Zacatlán, ha estado sometida a procesos de deforestación y de degradación en el 14% de su superficie en un período de 14 años.

Los municipios con los mayores cambios de uso de suelo se localizan en la zona tropical de la UMAFOR. La deforestación se asoció al crecimiento de la población, y a la apertura de cultivos agrícolas y plantíos de café, incentivados además por las políticas agropecuarias que apoyan actividades productivas como la ganadería extensiva y los cultivos agrícolas en zonas de ladera (SMRN, 2007).

El ERF (SMRN, 2007) señala que para la UMAFOR Zacatlán, la tasa de deforestación tiende a bajar en los terrenos de propiedad ejidal y comunal que se encuentran sometidos a esquemas de manejo forestal autorizado en los últimos 20 años y en donde la silvicultura se ha convertido en una alternativa de desarrollo

regional, incrementando los niveles de empleo e ingreso económico en estas comunidades.

En los últimos años, se ha detenido el avance de la frontera agropecuaria y se ha iniciado la recuperación de la cobertura forestal a través de reforestaciones en áreas agrícolas abandonadas; se reporta que tan sólo de 2005 al 2007 la superficie intervenida y reforestada por la SMRN del gobierno del estado es de 7,167 ha (SMRN, 2007).

Aún con las acciones implementadas en estos últimos años para recuperar superficies forestales, en la UMAFOR Zacatlán siguen existiendo procesos de deforestación y degradación los cuales se deben cuantificar a través del análisis de cambios de uso de la tierra, para determinar, entre otras cosas, si a la fecha estos procesos son o no significativos en la zona de estudio.

#### **1.4. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS PARA CONSERVACIÓN EN MÉXICO**

Una cuestión crítica sobre la conservación de la naturaleza, es definir y conocer los lugares en que se debe actuar primero. Esta situación está limitada principalmente por los aspectos de tipo económico, dado que los recursos financieros son limitados. De esta manera, la conservación de los recursos naturales debería centrarse en áreas donde se produzcan los mayores beneficios y los esfuerzos invertidos deriven en los mayores impactos positivos, principalmente ambientales (Benegas y León, 2009; Geneletti *et al.*, 2011). Así por ejemplo, un *hotspot* de biodiversidad se define como un área con una concentración excepcional de endemismos y con altas tasas de pérdida de hábitat, y puede ser visto como una zona prioritaria donde se puede conservar la mayor cantidad de especies al menor costo (Myers *et al.*, 2000; Geneletti *et al.*, 2011).

La investigación sobre el establecimiento de zonas prioritarias para la conservación ha estado principalmente centrada en el diseño de redes de áreas protegidas (Geneletti *et al.*, 2011). Específicamente en México, desde 1997

diversas iniciativas auspiciadas por instituciones gubernamentales y no gubernamentales, nacionales e internacionales han concentrado los esfuerzos de investigación en la identificación de regiones prioritarias para la conservación de la biodiversidad a nivel nacional (Arriaga *et al.*, 2009).

Un ejemplo de lo anterior, son las regionalizaciones coordinadas o promovidas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), las cuales han generado instrumentos de planeación territorial que incluyen 152 regiones terrestres prioritarias (RTP), 70 regiones marinas prioritarias (RMP), 110 regiones hidrológicas prioritarias (RHP) y 219 áreas de importancia para la conservación de aves (AICA). Estas regionalizaciones han sido zonificadas a nivel nacional y han utilizado diversas metodologías para ello. Por ejemplo, para la identificación de sitios con un alto valor de biodiversidad en los ambientes terrestres del país, se utilizaron nueve criterios de tipo biológico, seis criterios de amenaza para el mantenimiento de la biodiversidad y tres criterios de oportunidad para su conservación (Arriaga *et al.*, 2009).

Geneletti *et al.* (2011) mencionan que en el caso específico de la restauración forestal, el establecimiento de prioridades ha recibido poca atención, debido principalmente a que la identificación de áreas prioritarias para llevar a cabo acciones de reforestación depende de los objetivos de la restauración, que a menudo son múltiples y de diferente naturaleza.

En este sentido, la CONAFOR ha trabajado desde el año 2004 en que se publica un acuerdo modificatorio a las Reglas de Operación para el otorgamiento de pagos del PSAH (Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos), en el que se especifica que será facultad de la Comisión identificar las zonas de elegibilidad para la aplicación de los apoyos. A partir de entonces y hasta el 2009 los trabajos realizados permitieron mejorar la focalización de los programas de la CONAFOR a áreas de interés prioritario, de acuerdo con los criterios técnicos definidos y el análisis y orientación estratégica establecida por cada coordinación de la misma dependencia (SEMARNAT, 2011).



Es hasta el año 2011, en que con base al Protocolo de Áreas Prioritarias se concretan los esfuerzos de la CONAFOR en un documento que tiene por objetivo principal: “Desarrollar un proceso ordenado y sistematizado que permita mejorar y fortalecer la identificación y delimitación de las áreas prioritarias 2011 de la CONAFOR, con la finalidad de focalizar la acción institucional y los subsidios disponibles, para lograr un mayor impacto en las acciones que contribuyan a proteger, conservar, restaurar y aprovechar de manera sustentable los recursos forestales en bosques, selvas y zonas áridas de México, en donde sea más urgente y estratégica su atención” (SEMARNAT, 2011). De esta manera, se han definido para cada Estado de la República y a nivel nacional, las áreas potenciales y las prioritarias por programa y concepto de apoyo de la CONAFOR, utilizando criterios de tipo técnico, ambiental y social.

Uno de los objetivos particulares del Protocolo de Áreas Prioritarias es: “Fortalecer la participación a nivel consultivo de diferentes actores del sector forestal en la identificación de áreas potenciales y áreas prioritarias” (SEMARNAT, 2011). Es en este contexto donde se inserta la presente investigación al tratar de aportar elementos para la identificación de áreas prioritarias para conservación, específicamente en una región de importancia forestal en el estado de Puebla.

Una referencia más cercana, es el estudio realizado por Harris *et al.*, (2008), donde se analizan índices históricos y se ubican zonas deforestadas por medio de la comparación de mapas de cobertura de la tierra de los años 1997 a 2003; posteriormente mediante la utilización de un modelo espacial (GEOMOD) se ubicaron las áreas propensas a deforestarse en los años 2003 a 2013 y la obtención del índice de riesgo de deforestación.

Por otro lado, se realizó la estimación potencial de emisiones de CO<sub>2</sub>, mediante una ecuación que considera cambios en los inventarios de carbono contenido en una zona antes y después de la conversión de la misma a otra categoría de uso, se obtuvo el potencial de reducción de gases de efecto invernadero en 18 áreas protegidas de East Kalimantan, Indonesia. Por último, se identificaron las áreas óptimas para implementar REDD (Reducción de Emisiones por Deforestación y

Degradación), bajo el esquema de áreas con altas reservas de carbono y alto índice de riesgo de deforestación.

### **1.5. PROBLEMÁTICA Y NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS FORESTALES EN EL ÁREA DE ESTUDIO**

En el Estudio Regional Forestal (ERF) realizado para la UMAFOR Zacatlán (SMRN, 2007), se presenta una revisión de los diversos problemas que fueron señalados por los productores rurales y observados por el equipo de trabajo que elaboró el ERF, destacando la problemática de los recursos naturales de la manera siguiente:

- La disminución de caudales en ríos, manantiales y pozos se hace más notoria en los meses de abril y mayo. Esto ha sido principalmente observado en los municipios de Tetela de Ocampo, Chignahuapan, Amixtlán, Aquixtla e Ixtacamaxtitlán, y se considera que una de las causas principales es la deforestación de las partes altas de la cuenca.
- El crecimiento de la población ha requerido de mayores cantidades de alimento y al no permitir el descanso de la tierra, ésta ha disminuido su productividad, necesitándose por tanto mayores superficies para uso agrícola y ganadero, provocando el cambio de uso de la tierra y disminuyendo las superficies arboladas. Situación que se ha observado en los municipios de Ixtacamaxtitlán, Zacatlán, Aquixtla, Amixtlán, Camocuautla, Coatepec, Cuautempan, Tetela de Ocampo y Tepetzintla.
- Desconocimiento de la importancia de varios de los tipos de vegetación existentes en la región (bosque mesófilo, bosque de encino, bosque de táscate y matorral desértico) como proveedores de bienes y servicios para la población de la zona y sociedad en general.

En este mismo contexto, el ERF (SMRN, 2007) plantea, entre otras, las líneas de acción siguientes:

- ✓ Realizar estudios específicos para identificar hábitats críticos y potencialidades de los diferentes tipos de vegetación presentes en la UMAFOR, y destinar recursos suficientes para su conservación.
- ✓ Realizar estudios para identificar y cuantificar los servicios ambientales que proveen los recursos forestales generando esquemas que garanticen la protección de los mismos e ingresos a largo plazo superiores a usos alternativos al forestal.
- ✓ Establecer convenios con instituciones de investigación para generar información suficiente sobre los recursos naturales de la región y planear adecuadamente su conservación y uso sustentable.
- ✓ Identificar y caracterizar dentro de los ecosistemas forestales de la UMAFOR, sitios con mayor potencial para actividades ecoturísticas y desarrollar proyectos piloto en áreas de interés prioritario, fomentando la conservación a través de usos alternativos como el ecoturismo.

La presente investigación pretende atender varios de los puntos anteriormente mencionados y contribuir al conocimiento de las potencialidades de los recursos naturales en la región para su mejor manejo, conservación y producción, a través de los objetivos planteados en el siguiente apartado.

## **1.6. OBJETIVOS**

### **General**

Cartografiar y analizar los cambios de uso de la tierra de 1986 a 2010 en la UMAFOR Zacatlán, Puebla, delimitando las áreas prioritarias con base en su riesgo de deforestación y aptitud de provisión de servicios ambientales, y generar estrategias para su manejo.

## **Específicos**

- a) Clasificar los usos de la tierra para detectar y analizar cambios de uso multitemporales y espaciales ocurridos en la UMAFOR Zacatlán entre el período 1986-2010.
- b) Identificar los patrones que determinan los cambios de uso de la tierra, para generar un escenario futuro de riesgo de deforestación para el período 2010-2030.
- c) Definir los criterios y subcriterios para generar un mapa de aptitud de provisión de servicios ambientales hidrológicos.
- d) Combinar el escenario de riesgo de deforestación con el mapa de aptitud de provisión de servicios ambientales hidrológicos para identificar áreas prioritarias de conservación en la UMAFOR Zacatlán.
- e) Generar estrategias de manejo para la conservación de las áreas prioritarias identificadas en el área de estudio.

## **1.7. LITERATURA CITADA**

- Arriaga, C. L., V. Aguilar y J. M. Espinoza. (2009). Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad. *In*: Sarukhán, J. (Coord). Capital natural de México vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio (pp. 433-457). CONABIO, México, D.F.
- Benegas, L. y J. León. (2009). Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas: la experiencia del programa Focuencias II. Serie Técnica. Informe Técnico No. 378. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2011). La biodiversidad en Puebla: Estudio de estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. México. 440 p.

- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2006). Revista México Forestal. Hemeroteca: Segunda Etapa Número 73 (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
<http://www.mexicoforestal.gob.mx/hemeroteca/etapa-2/numero-73#indice>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2007). Mapa de Regiones Hidrológicas. Escala 1:250 000, República Mexicana. Subdirección General Técnica, México, D.F
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). (2010). Índice de marginación por entidad federativa y municipio (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=478&Itemid=194](http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=478&Itemid=194)
- \_\_\_\_\_. (1998). Población rural y degradación ambiental. *In*: La situación demográfica de México (pp.105-114). Secretaría de Gobernación, México, D.F.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2011). Reglas de Operación del Programa ProÁrbol 2012. Publicadas el 21 de diciembre de 2011. SEMARNAT. México, D.F.
- \_\_\_\_\_. (2003). Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Publicada el 25 de febrero de 2003. CONAFOR. Reimpresión 2008, Zapopan, Jalisco, México.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2011). Situación de los bosques del mundo. Roma, Italia (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de: <http://www.fao.org/docrep/013/i2000s/i2000s.pdf>
- FAO/OAPN. (2009). Manual de Capacitación: Pago por servicios ambientales en áreas protegidas en América Latina. Programa FAO/OAPN. Roma, Italia.
- FAO-UNESCO. (1968). Revised legend of the FAO-UNESCO soil map of the world. International soil reference and information centre. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia.
- FitzPatrick, E. A. (1984). Suelos: Su formación, Clasificación y Distribución. 1ª Edición en español. Cía. Editorial Continental. México, D.F. 430 p.

- García, E. y CONABIO. (1998). Carta de Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- Geneletti, D., F. Orsi, E. Lanni y A.C. Newton. (2011). Identificación de áreas prioritarias para la restauración de bosques secos. *In*: Newton, A. C. y Tejedor, N. (Eds). Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina (pp. 289-326). Gland, Suiza: UICN y Madrid, España: Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas.
- Harris, N. L., S. Petrova, F. Stolle and S. Brown. (2008). Identifying optimal areas for REDD intervention: East Kalimantan, Indonesia as a case study. *Environ. Res. Lett.* 3 (2008) 035006.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2010a). Población rural y urbana (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur\\_urb.aspx?tema=P](http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P)
- \_\_\_\_\_. (2010b). Censo de Población y Vivienda 2010. Resultados definitivos (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
<http://www.censo2010.org.mx/>
- \_\_\_\_\_. (2009). México en Cifras. Información nacional por entidad federativa y municipios (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=21>
- \_\_\_\_\_. (2007). Cartas de Uso del suelo y vegetación (E1402-E1403-F1411-F1412) Escala 1:250000. Serie IV. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI, INE y CONAGUA. (2007). Mapa de Cuencas Hidrográficas de México. Escala 1:250 000, elaborada por Priego A.G., Isunza E., Luna N. y Pérez J.L. México, D.F.
- INIFAP y CONABIO. (1995). Carta Edafológica. Escalas 1:250 000 y 1:1 000 000. México.
- Mas, J. F., A. Velázquez y S. Couturier. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso de suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental* 1(1): 23-39.

Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca, and J. Kent. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403: 853–858.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2012). Distritos de Desarrollo Rural y Centros de Apoyo al Desarrollo Rural. Estructura de atención (En Línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[https://www.suri.sagarpa.gob.mx/webPublica/estructura\\_atencion.aspx?idedo=21](https://www.suri.sagarpa.gob.mx/webPublica/estructura_atencion.aspx?idedo=21)

\_\_\_\_\_. (2009). Anuarios SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). Anuario Agropecuario 2009. Archivo de aplicación (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=65&Itemid=417](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=65&Itemid=417)

Sánchez, C. V., P. Illoldi, M. Linaje, T. Fuller y S. Sarkar. (2008). ¿Por qué hay un costo en posponer la conservación de la diversidad biológica en México? *CONABIO. Biodiversitas*. 76: 7-12.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2011). Protocolo de áreas prioritarias 2011: Marco metodológico. Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México. 104 p.

\_\_\_\_\_. (2010). Compendio de Estadísticas Ambientales 2010 (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5\\_8080/ibi\\_apps/WFServlet982a.html](http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlet982a.html)

\_\_\_\_\_. (2009). EL medio ambiente en México 2009: En resumen (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen\\_2009/index.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/index.html)

\_\_\_\_\_. (2008). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_2008/index\\_informe\\_2008.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/index_informe_2008.html)

- \_\_\_\_\_. (2006). Curso de Manejo de Recursos Naturales y Planeación Ambiental. Servicio Profesional de Carrera Material de apoyo (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
<http://elearning.semarnat.gob.mx/cte/MATERIALESAPOYO/manejo%20de%20recursos%20naturales%20y%20planeaci%C3%B3n%20ambiental/BASICO/3.html>
- \_\_\_\_\_. (2002). Informe de la situación del Medio Ambiente en México 2002. Compendio de Estadísticas Ambientales (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/)
- SMRN (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2007). Diagnóstico Socioeconómico y de Manejo Forestal de la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán. Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan-Zacatlán, A.C. Puebla, México. 281 p.
- SNIM (Sistema de Información Municipal). (2010). Instituto Nacional para el Federalismo. Secretaría de Gobernación, México, D.F. (En Línea). Consultado en abril de 2012. Obtenido de: <http://www.snim.rami.gob.mx/>
- Velázquez, A. (2008). La dinámica de la cubierta forestal de México. Página de la Sociedad Mexicana de Física (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de: <http://www.smf.mx/C-Global/webCubFor.htm>
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz G., R. Mayorga S., P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso de la tierra en México. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. Gaceta Ecológica (2): 31-37.



## CAPÍTULO II

### DETECCIÓN Y ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USO DE LA TIERRA Y ESCENARIOS DE DEFORESTACIÓN EN LA UMAFOR ZACATLÁN, PUEBLA

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

México cuenta con múltiples recursos naturales los cuales proporcionan a la sociedad una amplia gama de bienes y servicios ambientales. Sin embargo, los procesos de cambio de usos de la tierra ponen en riesgo la permanencia y flujo sostenido de estos bienes y servicios (Machín y Casas, 2006; FAO/OAPN, 2009; Pineda *et al.*, 2009). De ahí la importancia de la detección y análisis de los cambios de uso de la tierra, que permitan conocer y entender los factores que influyen en los procesos de deforestación (cambio de cubierta natural o forestal de la tierra a otro tipo de uso; por ej., uso residencial, agrícola, pecuario, otro), así como la manera en que estos interactúan; a fin de prevenir, controlar o evitar la pérdida y fragmentación futura de los recursos forestales.

En la actualidad, los estudios de cambios de uso de la tierra en México se han vuelto más frecuentes. Estos estudios muestran gran variación en las tendencias publicadas de cambio de uso de la tierra, específicamente las relativas a tasas de deforestación (Velázquez, 2008; Mas *et al.*, 2009). Así también, las causas de la deforestación son múltiples, complejas y varían para cada región (Lambin, 1997; Lambin *et al.*, 2001; Parker *et al.*, 2009; Pineda *et al.*, 2009).

Por otro lado, existen numerosas técnicas metodológicas para detectar, explicar y predecir los cambios de uso de la tierra, como las redes neuronales artificiales, autómatas celulares, series de tiempo, cadenas de Markov, análisis de regresión, entre otras (Geist y Lambin, 2001; Lambin *et al.*, 2003; Lesschen *et al.*, 2005; Jiménez *et al.*, 2011; Velázquez *et al.*, 2011). Para el proceso de deforestación, generalmente estas técnicas se usan para modelar y cuantificar la magnitud de las relaciones entre los factores inductores y la pérdida de la superficie forestal (Pineda *et al.*, 2011). La elección de alguna de ellas, dependerá del objetivo final

del estudio, de las características del área de estudio, de la cantidad y calidad de información disponible y del costo de implementación (Jiménez *et al.*, 2011).

Para el estado de Puebla, se reportan pérdidas significativas de superficies de bosques y selvas en la mayoría de sus municipios, debido a procesos de cambio de uso de suelo de forestal a agrícola y ganadero, principalmente (CONAPO, 1998; SMRN, 2007). Específicamente en la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán, se reporta que factores como el avance de la frontera agropecuaria, el crecimiento poblacional desordenado y la tala ilegal, entre otros, han incidido en procesos de deforestación propiciando la pérdida de importantes áreas forestales y fragmentación de los recursos naturales de la región (SMRN, 2007).

Por lo anterior, este apartado de la investigación realiza un análisis retrospectivo (1986-2010), actual y prospectivo (2010-2030) de cambios de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán a través del manejo y procesamiento de imágenes de satélite y generación de modelos de regresión logística. Lo anterior, con la finalidad de identificar los diferentes patrones (naturales, sociales y económicos) que rigen la dinámica de tales cambios y estimar anticipadamente las áreas forestales sujetas a riesgo de deforestación.

La determinación cuantitativa y espacial de los cambios de uso de la tierra ocurridos en la UMAFOR Zacatlán, así como el conocimiento de los factores que a nivel regional inciden en dichos cambios y la ubicación de áreas con riesgo futuro de deforestación, permitirán proponer políticas, acciones preventivas y correctivas de manejo de los recursos forestales de la región; siendo éste un trabajo pionero en la zona de estudio, al generar la información base que permitirá la creación de diferentes escenarios de riesgo de deforestación, de acuerdo a los planes y programas de desarrollo existentes en la región.

## **2.2. OBJETIVOS**

- a) Clasificar los usos de la tierra para detectar y analizar cambios de uso multitemporales y espaciales ocurridos en la UMAFOR Zacatlán entre el período 1986-2010.
- b) Identificar los patrones que determinan los cambios de uso de la tierra, para generar un escenario futuro de riesgo de deforestación para el período 2010-2030.

## **2.3. MÉTODOS Y MATERIALES**

El área de estudio es la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán, la cual se ubica al noreste del estado de Puebla, colindando al Norte con los municipios de Huachinango, Chiconcuautla, Tlapacoya, San Felipe Tepatlán y Hermenegildo Galeana, al Sur con el estado de Tlaxcala y el municipio de Libres, al Este con los municipios de Ocoteppec, Zautla, Xochiapulco, Huitzilan de Serdán, Hueytlalpan y Olintla, y al Oeste con el estado de Hidalgo. Se integra por 13 municipios que en total cubren una superficie de 269,002 ha. La UMAFOR Zacatlán tiene una población total de 250,317 habitantes, de los cuales 120, 638 (48.19%) son hombres y 129,679 (51.81%) corresponde a población femenina (ver Capítulo I).

La metodología del presente capítulo se divide en dos etapas básicas: (1) Detección de cambios de uso de la tierra en el período 1986-2010 que incluye todo el proceso de clasificación supervisada de imágenes de satélite; y (2) Obtención de escenarios de riesgo de deforestación para el periodo 2010-2030 que incluye la generación de modelos probabilísticos de cambios de uso de la tierra.

### **2.3.1. Cambios de uso de la tierra en el período 1986-2010**

- (a) Selección de imágenes de satélite y material cartográfico digital

El estudio se basó en la clasificación supervisada de imágenes de satélite LANDSAT TM de los años 1986, 1995 y 2010, las cuales se obtuvieron de los

archivos del United States Geological Survey (USGS) (<http://glovis.usgs.gov/>). De acuerdo a las características de ubicación geográfica del área de estudio, se utilizaron recortes de tres escenas para cada año clasificado (Cuadro 2.1) (Anexo 2.1). El procesamiento de las escenas para la obtención del área final de trabajo se realizó en el programa IDRISI Andes (Clark Labs, 2006) (Figura 2.1). Asimismo, se recopiló material cartográfico digital del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y la Comisión Nacional para Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), que sirvió de referencia en todo este proceso y para el diagnóstico del área de estudio; se especificaron las características en cada etapa en que fueron utilizados.

Cuadro 2.1. Características de las imágenes de satélite empleadas en la clasificación de usos de la tierra de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Año	Satélite	Sensor	Resolución espacial (m)	Path/Row	Bandas usadas	Fecha de toma
1986	Landsat 5	TM	30	25046	1-5 y 7	27-Enero-1986
	Landsat 5	TM	30	25047	1-5 y 7	27-Enero-1986
	Landsat 5	TM	30	26046	1-5 y 7	23-Marzo-1986
1995	Landsat 5	TM	30	25046	1-5 y 7	06-Diciembre-1995
	Landsat 5	TM	30	25047	1-5 y 7	06-Diciembre-1995
	Landsat 5	TM	30	26046	1-5 y 7	11-Noviembre-1995
2011*	Landsat 5	TM	30	25046	1-5 y 7	16-Enero-2011
	Landsat 5	TM	30	25047	1-5 y 7	16-Enero-2011
	Landsat 5	TM	30	26046	1-5 y 7	23-Enero-2011

\* Para efectos del presente estudio, y dada la fecha de toma de la imagen 2011, ésta se considerará como del año 2010.

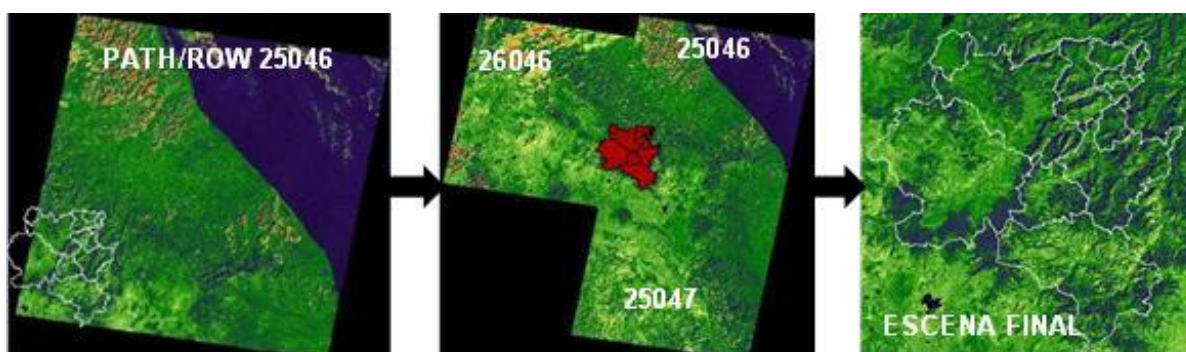


Figura 2.1. Obtención de la escena final de trabajo con base al área de estudio.

## (b) Restauración geométrica y radiométrica de las imágenes

Dentro de los pasos previos para la comparación multitemporal entre imágenes, se encuentra la corrección geométrica y radiométrica de las imágenes que se cotejarán, debido a que es necesario eliminar, en la medida de lo posible, cualquier cambio, en los niveles digitales de las escenas, que no se deba a cambios reales en la cubierta (Chuvieco, 2008), asegurando resultados más precisos en la detección de cambios de uso de la tierra.

**Ajuste geométrico y asignación de georreferencia.** Para realizar un estudio multitemporal y establecer o realizar detección de cambios es necesario contar con un ajuste que permita sobreponer las imágenes lo mejor posible (Chuvieco, 2008). En este sentido, y dado que las imágenes se obtuvieron corregidas geométricamente, se realizó la verificación visual de puntos de control de la escena Landsat TM del año 1995, con base en ortofotos digitales de 1995 a una escala de 1:20000 (INEGI, 1995).

Posteriormente, las escenas de los años 1986 y 2010 fueron ajustadas geométricamente a la escena de 1995 (registro de imagen a imagen), utilizando 26 puntos de control bajo modelos polinómicos de tercer grado, obteniendo errores RMS de 0.45 y 0.43, respectivamente, aceptables para una resolución de 30 m por pixel (Chuvieco, 2008). El procedimiento se realizó en el módulo GPCworks de PCI Geomatics<sup>®</sup> v9.1.

### **Correcciones radiométricas**

Independientemente de que la detección de cambios de usos de la tierra se efectuará mediante la comparación de imágenes clasificadas de manera independiente, se procedió a aplicar la corrección radiométrica para cada escena y fecha, con la finalidad de obtener mayor certeza en la clasificación de las mismas respecto a las firmas espectrales utilizadas. En este sentido, se realizó el cálculo de reflectividades y corrección del sombreado topográfico.

Cálculo de reflectividades. La conversión de los niveles digitales almacenados en una imagen original a valores de reflectividad permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables en un mismo sensor a lo largo del tiempo, aspecto que resulta relevante cuando se pretende abordar tareas de detección de cambios (Chuvieco, 2008). Para homogeneizar las imágenes de este estudio, se tomó la opción de calibrar los niveles digitales de modo absoluto convirtiéndolos a medidas de reflectividad mediante el modelo propuesto por Chávez (1996), en el programa PCI Geomatics<sup>®</sup> v9.1, siendo la Ecuación (1) del cálculo de reflectividad de la forma:

$$P_K = \frac{K * \pi * a_{1,k} * (ND_K - ND_{min,k})}{E_{o,k} \cos \theta_i t_{k,i}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- $P_k$  = Reflectividad para la banda k;
- $K$  = Factor corrector de la distancia Tierra-Sol, calculado a partir del día juliano (D) bajo la fórmula siguiente:  $K = (1 + 0.1674 (\sin(2\pi(D-93.5)/365)))^2$ ;
- $a_{1,k}$  = Coeficiente de calibración para la banda k;
- $ND_k$  = Nivel digital de la imagen en la banda k;
- $ND_{min,k}$  = Nivel digital mínimo para la banda k;
- $E_{o,k}$  = Irradiancia solar en el techo de la atmósfera para la banda k;
- $\theta_i$  = Ángulo cenital solar;
- $T_{k,i}$  = Transmisividad para el flujo descendente en la banda k.

Los valores de  $K$  y el  $\cos \theta$  se calcularon a partir de la fecha de toma de cada imagen, el valor del nivel digital mínimo se obtuvo a partir del histograma de la imagen, y los valores de  $a_{1,k}$ ,  $E_{o,k}$ ,  $T_{k,i}$ , se tomaron de los parámetros para la conversión a reflectividades de imágenes Landsat (Chuvieco, 2008).

Corrección del sombreado topográfico. La corrección topográfica tiene por objetivo eliminar o reducir los efectos que produce el relieve en la toma de la imagen. Si no se tiene en cuenta este efecto, la reflectividad medida para la misma cubierta en

distintas vertientes puede ser muy variada implicando problemas en el reconocimiento y clasificación de coberturas temáticas (Chuvieco, 2008).

Para realizar este procedimiento, se requiere de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de similar resolución espacial que la imagen y bien ajustado a la misma (Chuvieco, 2008), por lo cual se elaboró un MDE con resolución de 30 m a partir de curvas de nivel a cada 20 m y cuerpos de agua (INEGI, 1999). Se utilizó el programa ArcGIS versión 10 (ESRI, 2011) en su módulo de interpolación TIN, introduciendo además información adicional como vías de comunicación (INEGI, 1999) y red hidrográfica (INEGI, 2010a) del área de estudio.

Posteriormente, se calculó el ángulo de iluminación a partir de los ángulos cenital solar, acimutal solar (obtenidos de los datos de cabecera de cada imagen), la orientación de las vertientes y la pendiente del terreno (obtenidos del MDE), a través del algoritmo REL de PCI Geomatics<sup>®</sup> v9.1, obteniéndose una imagen con el ángulo de iluminación.

Por último, se corrigió la reflectividad por relieve de acuerdo con el valor del ángulo de iluminación, utilizando EASI Modelling de PCI Geomatics<sup>®</sup> v9.1 y aplicando la fórmula para la corrección topográfica propuesta por Civco (1989).

$$[ND_{ij}=ND_{ij}+(ND_{ij}*(Il_x-Il_{ij})/Il_x) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$ND_{ij}$  = Nivel digital de la imagen en la banda a corregir;

$Il_x$  = Valor medio de la imagen de iluminación;

$Il_{ij}$  = Valor de iluminación para el pixel a corregir.

### (c) Construcción de la leyenda temática

Un paso importante antes de iniciar la clasificación de las imágenes, es la construcción de la leyenda temática. Para ello, se revisaron los diferentes tipos de vegetación, coberturas y usos de la tierra identificados para la UMAFOR Zacatlán, en el Estudio Regional Forestal (SMRN, 2007) y en las cartas de uso de suelo y

vegetación (INEGI, 2007), complementando con recorridos de campo en el área de estudio.

De acuerdo a la FAO (2005a), existe un vínculo directo entre la cobertura de la tierra y el uso del suelo, siendo la primera la cubierta biofísica que se observa en la superficie de la tierra, y el segundo los arreglos, actividades y demás aportaciones que el hombre realiza en un cierto tipo de cobertura de la tierra, para producir, cambiarla o mantenerla. De esta manera, y para efectos del presente trabajo, se utilizó el concepto de usos de la tierra asociando las diferentes coberturas naturales en el uso forestal y separando las otras coberturas en los distintos usos de la tierra que se detectaron en el área de estudio (Anexo 2.2), quedando la leyenda temática que se muestra en el Cuadro 2.2.

Respecto a los sistemas agroforestales (cafetales) (Cuadro 2.2), los cuales son reconocidos como un uso agrícola (INEGI, 2007), para efectos de la presente investigación estos sistemas fueron considerados como de uso forestal, dado las condiciones específicas de poco disturbio y similitud en sus estratos vegetativos con otros tipos de cobertura natural existentes en la zona, así como por la orientación de esta investigación cuyos objetivos se encuentran asociados a la provisión de servicios ambientales hidrológicos (recarga hídrica subterránea).

Cuadro 2.2. Leyenda y clases temáticas para la clasificación de usos de la tierra de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Id	Usos de la tierra	Descripción
1	Forestal	Incluye los diferentes tipos de bosque (mesófilo de montaña, de pino, de encino, de <i>Abies</i> , <i>Juniperus</i> ), sus diferentes combinaciones y vegetación secundaria de los mismos. Matorrales y sistemas agroforestales (cafetales).
2	Agrícola	Superficies con cultivos agrícolas temporales y perennes, suelo desnudo, y zonas agrícolas en descanso reciente.
3	Pecuario	Superficies de pastizales cultivados, naturales y zonas en descanso con vegetación herbácea.
4	Residencial	Zonas de asentamientos humanos compactos (no dispersos)
5	Cuerpos de agua	Lagunas y pequeñas presas (bordes) de agua.



#### (d) Clasificación supervisada de las imágenes de satélite

La clasificación es el proceso de desarrollar mapas interpretados de imágenes de sensores remotos (Eastman, 2006). La clasificación supervisada es un proceso de toma de decisión basado en información disponible y conocimiento previo del área de estudio (Eastman, 2006; Chuvieco, 2008). En ella, se distinguen las fases siguientes: (1) fase de entrenamiento que implica la definición digital de las categorías; (2) fase de asignación, que corresponde a la agrupación de los píxeles de la imagen en una de esas categorías; y (3) comprobación y verificación de resultados (Chuvieco, 2008).

**Fase de entrenamiento.** Con base a las clases temáticas definidas en el apartado anterior (Cuadro 2.2) se asignaron 250 sitios de entrenamiento en campo, cubriendo los estándares de tamaño al seleccionar entre 50 y 70 píxeles por clase (Chuvieco, 2008). La distribución de los sitios de entrenamiento, con apoyo de material cartográfico (INEGI, 2007), se realizó considerando los diferentes tipos de vegetación y coberturas de la tierra para cada clase temática, logrando así una mayor representatividad de las distintas categorías usadas en este estudio.

La digitalización de los sitios de entrenamiento y la clasificación en general fue realizada en el programa PCI Geomatics<sup>®</sup> v9.1. Se obtuvieron las estadísticas básicas para cada clase (Anexo 2.3), vigilando la separabilidad entre las clases, mediante la medida de divergencia transformada donde el valor mínimo para una separabilidad aceptable de clases es de 1.9 (Chuvieco, 2008).

**Fase de asignación.** Se utilizaron las bandas 1 a 5 y 7 de las imágenes de satélite Landsat, con una combinación de las bandas 4/5/3 que es denominada color falso o color infrarrojo (Chuvieco, 2008). La clasificación se realizó mediante el algoritmo de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood) y a la imagen resultado se le aplicó un filtro modal para reasignar los píxeles aislados o poco significativos, suavizando los resultados y facilitando una distribución espacial más nítida de las distintas clases temáticas (Eastman, 2006; Chuvieco, 2008).

La clasificación se realizó primero para la imagen del año 2010, ajustando los sitios de entrenamiento a las imágenes de 1995 y 1986 con apoyo de material cartográfico digital para el área de estudio (INEGI, 1995; 1994; 1986).

Dado que el uso de la tierra denominado “residencial” no presentó una separabilidad aceptable del uso “agrícola”, se decidió no incluirla en la clasificación supervisada y se digitalizó manualmente con apoyo de imágenes de Google™ Earth 2013 y material cartográfico digital (INEGI, 1995; 1994; 1986), agregándola a los mapas ya clasificados, evitando de esta manera sobre estimaciones para esta clase temática (Valdez *et al.*, 2011).

**Verificación de resultados.** Este procedimiento se realizó en el módulo Accuracy Assessment de PCI Geomatics® v9.1. Para la imagen clasificada de 2010, se aplicó un muestreo aleatorio simple, utilizando los valores predeterminados del módulo, con 186 puntos de control que se verificaron en campo y con apoyo de imágenes de Google™ Earth 2013, obteniendo las estadísticas mostradas en el Cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Validación del mapa clasificado 2010 mediante puntos de verificación.

Exactitud / Clases	Forestal	Agrícola	Pecuario	Cuerpos de agua
Exactitud productor (%)	86.74	96.70	90.91	100.00
Exactitud general (%)	91.94	<b>Kappa (%) 85.80</b>		

La exactitud productor representa el porcentaje de puntos de control, para cada clase, que fueron adecuadamente clasificados en la categoría correspondiente. La exactitud general representa el grado de acuerdo entre el mapa clasificado y la realidad observada, y el estadístico Kappa evalúa si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con precisión significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria y donde un valor de Kappa cercano a uno (100%) indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a cero (0%) sugiere que el acuerdo observado es debido al azar (Cuadro 2.3) (Chuvieco, 2008).

La validación para las imágenes clasificadas de 1986 y 1995, se realizó mediante la construcción de matrices de confusión que evalúan la calidad de las firmas espectrales utilizadas en el proceso de clasificación (Cuadros 2.4 y 2.5). La matriz de confusión plasma los conflictos que se presentan entre categorías, mostrando en la diagonal los píxeles correctamente clasificados y los demás valores indican los píxeles clasificados incorrectamente y las categorías a que fueron asignados. La exactitud general y el índice de Kappa fueron aceptables en todos los casos (>80%) (Lesschen *et al.*, 2005).

Cuadro 2.4. Matriz de confusión para los campos de entrenamiento del mapa clasificado de 1995.

Campos de entrenamiento	Píxeles clasificados					
	Clases	Forestal	Agrícola	Pecuario	Cuerpos de agua	Total
Forestal		209,052	41	13	0	209,106
Agrícola		938	102,691	253	2	103,884
Pecuario		2,936	3,872	6,592	0	13,400
Cuerpos de agua		0	6	0	4,826	4,832
<b>Total</b>		<b>212,926</b>	<b>106,610</b>	<b>6,858</b>	<b>4,828</b>	<b>331,222</b>
<b>Exact. por clase (%)</b>		<b>98.18</b>	<b>96.32</b>	<b>96.12</b>	<b>99.96</b>	
<b>Exact. general (%)</b>		<b>97.57</b>			<b>Kappa (%) 97.57</b>	

Cuadro 2.5. Matriz de confusión para los campos de entrenamiento del mapa clasificado de 1986.

Campos de entrenamiento	Píxeles clasificados					
	Clase	Forestal	Agrícola	Pecuario	Cuerpos de agua	Total
Forestal		249,535	735	138	42	250,450
Agrícola		1,129	44,608	392	2	46,131
Pecuario		10,331	1,441	7,188	0	18,960
Cuerpos de agua		0	0	0	6,865	6,865
<b>Total</b>		<b>260,995</b>	<b>46,784</b>	<b>7,718</b>	<b>6,909</b>	<b>322,406</b>
<b>Exact. por clase (%)</b>		<b>95.61</b>	<b>95.35</b>	<b>93.13</b>	<b>99.36</b>	
<b>Exact. general (%)</b>		<b>95.59</b>			<b>Kappa (%) 95.64</b>	

#### (e) Detección y análisis de cambios de uso de la tierra

El objetivo final de la clasificación supervisada de las imágenes de satélite para los años 1986, 1995 y 2010 fue su utilización en la detección de cambios de uso de la tierra, cuyo proceso tiene por objeto general analizar qué rasgos presentes en un determinado territorio han permanecido constantes o se han modificado entre dos o más fechas (Chuvienco, 2008). La detección de cambios puede abordarse de distintas maneras: (1) técnica empleada para detectar el cambio; (2) temporalidad de la información; y (3) tipo de datos empleados (Jiménez *et al.*, 2011).

Para el presente estudio, se realizó un análisis bitemporal mediante la comparación de imágenes clasificadas previamente y de manera independiente para los años 1986 y 2010. La imagen clasificada del año 1995, sirvió de referencia al momento de la clasificación y para dar certeza de los cambios ocurridos en los diferentes periodos (1986-1995 y 1995-2010).

Para lo anterior, se utilizó el módulo Land Change Modeler for Ecological Sustainability de IDRISI Andes (Clark Labs, 2006), mediante el comando CROSSTAB, el cual permite el análisis de cambio entre pares de imágenes, mostrando los cambios detectados tanto en imagen como en matrices de tabulación cruzada.

La matriz de tabulación cruzada se analizó de dos maneras: Zonas estables (valores en diagonal) y zonas dinámicas (valores fuera de la diagonal). Las zonas estables indican las superficies que se mantuvieron sin cambio para cada clase temática, y las zonas dinámicas indican las superficies que sí cambiaron de uso. De estas últimas, se obtuvieron las superficies de deforestación (cambio de uso forestal a otros usos) y de recuperación de superficie forestal (cambio de otros usos a uso forestal). Lo anterior se representó espacialmente en un mapa de cambios mediante la reclasificación de la imagen obtenida con el comando CROSSTAB.

Así también, se incorporó a la matriz de tabulación cruzada, los valores de probabilidad de transición construidos a partir de los valores de superficies de la

matriz original, representando la probabilidad de cambio de un uso de la tierra con respecto a cada uno de los otros considerados en este estudio.

### 2.3.2. Escenarios de riesgo de deforestación para el período 2010-2030

La detección y análisis de cambios de uso de la tierra proporcionan la información básica sobre los procesos de deforestación en el área de interés. El paso siguiente fue realizar un análisis retrospectivo de este proceso con sus posibles factores causales (patrones que rigen el cambio o variables predictoras) para obtener las probabilidades de cambio de uso de la tierra (deforestación) de terrenos forestales, y generar a su vez, escenarios futuros de riesgo de deforestación en el área de estudio.

Para los propósitos de esta investigación, el proceso de deforestación se asume como: Los cambios de uso de la tierra forestal a otros usos (por ej., agrícola, pecuario, residencial) en una superficie mayor a 0.5 ha y en un período mayor a 5 años. Lo anterior, en concordancia con FAO (2005b) y Velázquez *et al.* (2011).

#### (a) Modelación espacial entre las variables predictoras y los cambios de uso de la tierra

Para el análisis retrospectivo de los procesos de deforestación se utilizó la técnica de regresión logística multinomial. Esta técnica es usada cuando se desea conocer la relación entre una variable dependiente cualitativa con más de dos valores y una o más variables explicativas independientes, ya sean cualitativas o cuantitativas (Allison, 1999; SAS, 2002); así también, cuando se almacena, gestiona y representa información geográfica en un SIG, se tiene la ventaja de utilizar como unidad de observación espacial al píxel, lo que no es posible con otro método (Pineda *et al.*, 2011). La ecuación inicial del modelo es de tipo exponencial, como se muestra a continuación (Ec. 3):

$$P(Y_i = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\hat{\alpha} + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \dots + \hat{\beta}_{17} X_{17})}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$P$  = Probabilidad de que una celda de uso forestal sea transformada a un uso diferente (por ej., residencial, agrícola, pecuario);

$X_i$  = Variables predictoras contempladas en el análisis;

$e$  = Base del logaritmo natural;

$\hat{\alpha}$  = Constante del modelo o término independiente;

$\hat{\beta}$  = Coeficientes estimados de las variables predictoras.

Los modelos de regresión logística obtenidos en este estudio, se orientaron a sus dos funciones principales: (1) Cuantificar la importancia de la relación existente entre la variable dependiente y un conjunto de variables independientes; y (2) estimar la probabilidad de aparición de cada una de las posibilidades de un suceso con más de dos categorías (análisis de predicción).

La obtención y preparación de las variables se realizó de la manera siguiente, en el programa ArcGIS v10 (ESRI, 2011):

**Variable dependiente.** A partir del mapa de cambios 1986-2010, obtenido en etapas anteriores, se extrajo la variable dependiente la cual tomó cuatro valores: 0 cuando un pixel no presentaba deforestación, es decir, la superficie de uso forestal fue estable en el periodo analizado (forestal/forestal); 1 cuando existió deforestación pero el cambio fue de uso forestal a uso agrícola; 2 cuando el cambio observado fue de uso forestal a uso pecuario; y 3 cuando el cambio fue de uso forestal a uso residencial (en este último valor se incluyeron los cambios de uso forestal a uso de cuerpos de agua) (Anexo 2.4).

**Variables independientes.** De acuerdo a la revisión de las variables que han sido usadas en estudios similares (Mahar y Schneider, 1994; Lambin, 1997; Geoghegan *et al.*, 2001; Soares *et al.*, 2002; Mas *et al.*, 2003; Reyes *et al.*, 2003; Serra *et al.*, 2005; Pineda *et al.*, 2009; Pineda *et al.*, 2011) y a la información disponible en formato espacial para el área de estudio, se seleccionaron 17 variables que se consideraron como los principales factores que inciden en el

proceso de deforestación en la UMAFOR Zacatlán (Cuadro 2.6). El Anexo 2.5 muestra espacialmente las variables utilizadas (mapas).

Cuadro 2.6. Variables independientes utilizadas en el modelo de regresión logística, para la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Variable		Descripción	Unidad de medida	Fuente
X1	ALTITUD	Altitud	Metros	Elaboración propia (MED) con base a Cartas topográficas (INEGI, 1999)
X2	PENDIENTE	Pendiente	Porcentaje	Elaboración propia con base al MED
X3	D_CORRPER	Distancia a corrientes perennes	Metros	Red Hidrográfica (INEGI, 2010a).
X4	D_CUERAGUA	Distancia a cuerpos de agua	Metros	Cartas topográficas (INEGI, 1999).
X5	D_POBLADOS	Distancia a poblados >100 habitantes	Metros	Censo de población y vivienda (INEGI, 2010b).
X6	D_HOGLEÑACA	Distancia a poblados con más de 5 hogares que usan leña o carbón	Metros	Censo de población y vivienda (INEGI, 2000).
X7	D_CARRETERAS	Distancia a carreteras pavimentadas y terracería	Metros	Cartas topográficas (INEGI, 1999).
X8	D_VEREDAS	Distancia a brechas y veredas	Metros	Cartas topográficas (INEGI, 1999).
X9	D_AREASAGR	Distancia a áreas agrícolas	Metros	Elaboración propia mediante clasificación de imágenes Landsat 1986.
X10	D_AREASPEC	Distancia a áreas pecuarias	Metros	Elaboración propia mediante clasificación de imágenes Landsat 1986.
X11	D_ASERRAD	Distancia a aserraderos	Metros	SDRSOT, 2013.
X12	DENPOB	Densidad poblacional	Habitante/ha	Censo de población y vivienda (INEGI, 2010b).
X13	MARGMALTA	Marginación Muy Alta	0 y 1	CONAPO, 2010a.
X14	MARGMEDIA	Marginación Media	0 y 1	CONAPO, 2010a.
X15	PREDMANFTAL	Predios bajo manejo forestal	0 y 1	SDRSOT, 2013.

Variable		Descripción	Unidad de medida	Fuente
X16	TENENCEJIDAL	Tenencia de la tierra Ejidal	0 y 1	INEGI, 2013.
X17	TENENCPRIVADA	Tenencia de la tierra Privada	0 y 1	INEGI, 2013.

Con la finalidad de homogeneizar y asegurar la compatibilidad espacial de la información de las variables dependientes e independientes, y dado el tamaño mínimo de pixel original del mapa de cambios (30x30 m), se decidió aplicar a todos los mapas una malla de 100x100 m, quedando definida la unidad básica de análisis para este estudio de 1 ha (donde hubo conflictos entre valores, se utilizaron los valores que ocupaban la mitad o más de la celda base base  $\geq 0.5$  ha).

Con el uso del programa ArcGIS v10 (ESRI, 2011), se sobrepuso la malla tanto al mapa de la variable dependiente como a cada uno de los mapas de las variables independientes, creando la tabla con los datos de cada variable correspondientes a cada celda de 1 ha. Después, esta base de datos espacial se exportó al programa Microsoft Office Excel<sup>®</sup>, donde se preparó para su uso en SAS Institute Inc. v9.0, obteniendo los modelos de regresión logística mediante el ajuste de un modelo *logit* multinomial para el modelo factorial completo, donde se eligió una categoría como referencia (0) y se modelaron varios *logits* simultáneamente (Allison, 1999; Flom, 2013; SEQC, 2013), uno para cada una de las restantes categorías (1, 2, 3) respecto a la de referencia.

Posteriormente, con los resultados obtenidos (estimadores de los parámetros o coeficientes) de la regresión logística, se construyeron los diferentes modelos para cada categoría y se aplicaron a la superficie forestal actual 2010 (plantilla de datos en Microsoft Office Excel<sup>®</sup>), obteniendo las probabilidades de cambio de uso de la tierra forestal a los usos agrícola, pecuario y residencial. Finalmente, esta información se exportó al programa ArcGIS v10 (ESRI, 2011) y se obtuvo el mapa de probabilidades de cambios de uso de la tierra forestal.



## (b) Generación de escenarios de deforestación

En esta fase de la investigación, se decidió generar un escenario base de deforestación respecto a la proyección de crecimiento poblacional al año 2030. Para ello, primero se obtuvo la densidad poblacional (Número de habitantes/ha) para cada uso de la tierra de interés (agrícola, pecuario y residencial) en el periodo 1986-2010, mediante la relación entre las superficies de cada uno de estos usos en los años 1986, 1995 y 2010 obtenidas de la clasificación de imágenes satelitales, y la información del número de habitantes proporcionada por los Censos de Población y Vivienda de INEGI de los años 1980, 1995 y 2010.

Para la proyección del crecimiento poblacional al año 2030, se utilizó la información generada por CONAPO (2010b). De esta manera, teniendo la densidad poblacional por uso de la tierra al año 2010 y el número de habitantes que se proyectó habrá en el año 2030, se obtuvo el número de hectáreas requeridas para cada uso de la tierra (agrícola, pecuario y residencial) en el año 2030. Esta superficie se asignó a los mapas de probabilidades obtenidos en el apartado anterior, aplicando la asignación de mayor a menor probabilidad de cambio, resultando el escenario base de riesgo de deforestación a los usos agrícola, pecuario y residencial, y reclasificando los valores de probabilidad para obtener los mapas con la categorización de Alto, Medio y Bajo Riesgo de Deforestación.

## 2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.4.1. Distribución de usos de la tierra para los años 1986, 1996 y 2010

Como resultado de la clasificación supervisada de las imágenes satelitales, se obtuvo la distribución de los usos de la tierra en la UMAFOR para los años 1986, 1995 y 2010 (Figura 2.2); observando que el uso predominante actual (2010) es el forestal con un 53.02% (142,636.41 ha), la superficie agrícola cubre un 40.67% (109,407.15 ha) del total, al uso pecuario le corresponde un 5.45% (14,670.18 ha) de la superficie y el resto 0.85% (2,288.52 ha) es de uso residencial y cuerpos de agua.

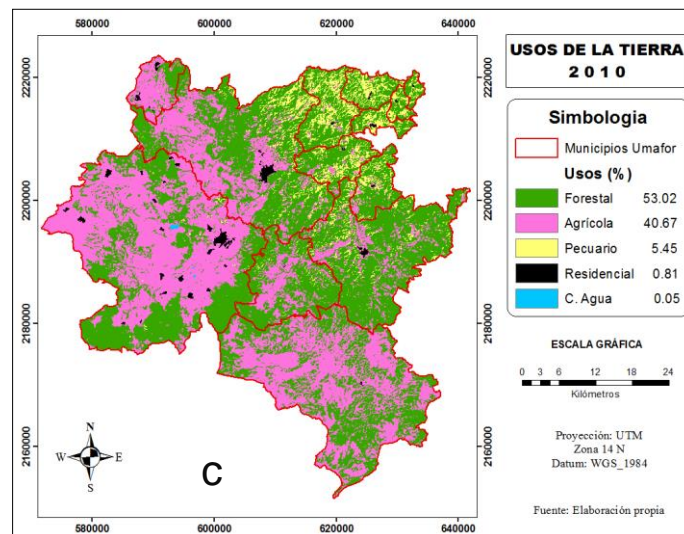
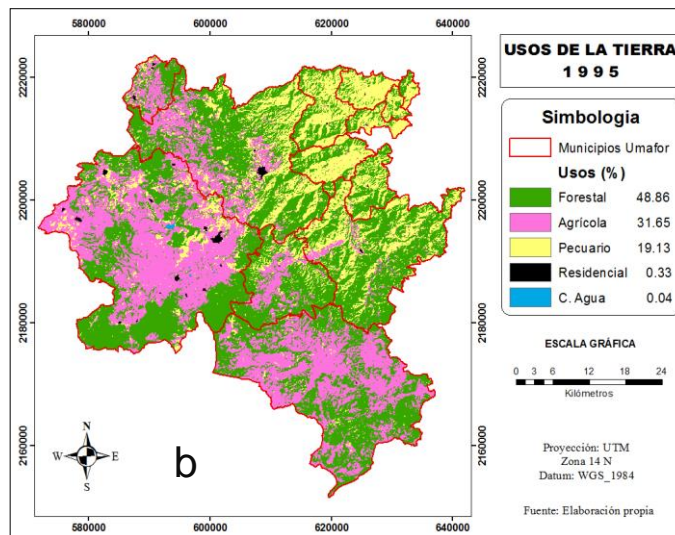
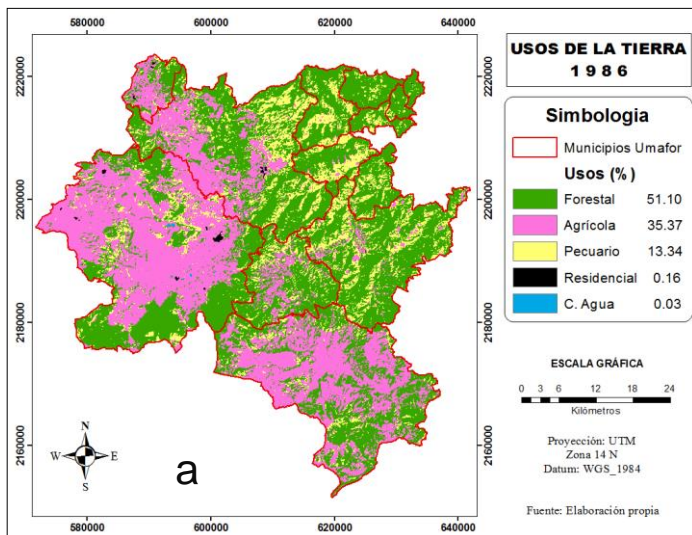


Figura 2.2. Distribución de los usos de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, Puebla: (a) 1986; (b) 1995; y (c) 2010.

Lo anterior difiere con la información presentada en el diagnóstico del área de estudio (ver Capítulo I) donde la distribución de los usos de la tierra se obtuvieron de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación Serie IV (INEGI, 2007), y se debe básicamente a que dicha información se presenta en una escala de 1:250000 y los sistemas agroforestales son considerados en uso agrícola; a diferencia de que la clasificación aquí presentada tiene una resolución de píxel de 30 m y a que los sistemas agroforestales se clasificaron como de uso forestal. Por lo cual, se considera importante, siempre que sea posible, actualizar la información a escalas más pequeñas, con la finalidad de realizar la detección de cambios más acordes a la realidad.

Respecto a la distribución para el año 1986, el uso forestal ocupaba un 51.10% (137,451.06 ha), el uso agrícola un 35.37% (95,152.59 ha), el uso pecuario un 13.34% (35,882.55 ha) y los usos residencial y cuerpos de agua un 0.19% (516.06 ha). La imagen intermedia mostró que en el año 1995, la superficie forestal ocupaba un 48.86% (131,427.09 ha), al uso agrícola le correspondía un 31.65% (85,126.50 ha), al uso pecuario un 19.13% (51,447.78 ha) y el resto de la superficie 0.37% (1,000.89 ha) era ocupada por los usos residencial y cuerpos de agua.

De manera general, se observa (Figura 2.3) que el proceso de deforestación tuvo mayor impacto en el período de 1986 a 1995, principalmente en la zona noreste de la UMAFOR Zacatlán, presentándose también para esa misma zona un proceso de recuperación de superficie forestal en el período de 1995 a 2010, que aunado a la recuperación en otras áreas de la UMAFOR, permitió que para el período 1986 a 2010 existiera una ganancia de superficie forestal de 5,185.35 ha (Figura 2.3).

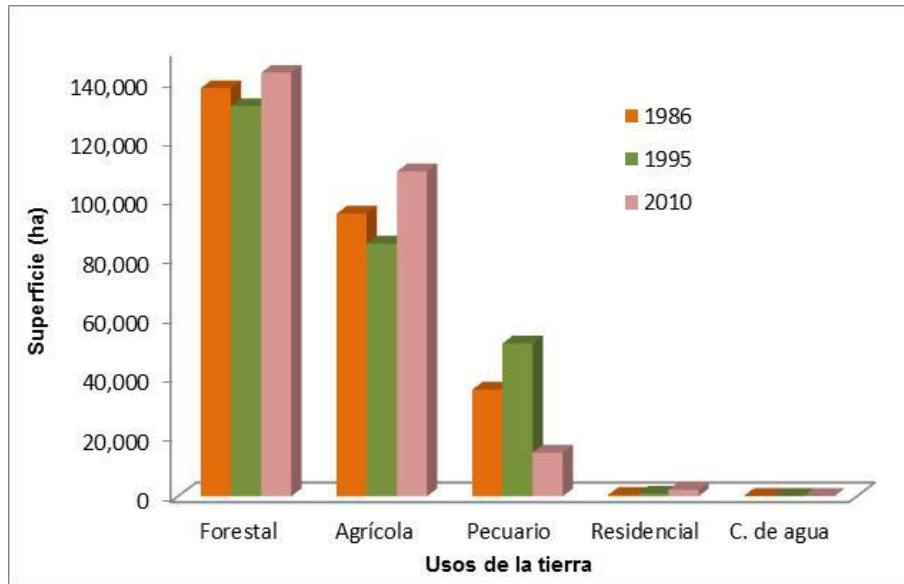


Figura 2.3. Superficies de usos de la tierra para la UMAFOR Zacatlán.

Lo anterior no implica que el proceso de deforestación no esté presente en la zona de estudio en el período analizado (1986-2010), sino que el cambio de uso de la tierra ha sido muy dinámico, lo que significa que han existido tanto procesos de recuperación de superficie forestal, como pérdidas de la misma, ubicados espacialmente en diferentes áreas. Lo anterior se analiza de manera más detallada en el apartado siguiente de detección de cambios.

#### 2.4.2. Detección de cambios de uso de la tierra en el período 1986-2010

El Cuadro 2.7 muestra las superficies estables (valores en la diagonal) y dinámicas (valores fuera de la diagonal), así como las probabilidades de permanencia o transición (valores entre paréntesis) de usos de la tierra para el área de estudio. Así por ejemplo, la segunda celda de la diagonal (82,980.81) indica la superficie estable del uso agrícola; en esa misma fila, la celda anterior (10,076.76) es la superficie que cambió de uso agrícola a uso forestal; la posterior (701.37) es la que cambió de uso agrícola a uso pecuario, y así sucesivamente. Las filas y sus correspondientes totales, muestran las superficies por categoría para el año 1986. Por el contrario, las columnas y sus totales muestran las superficies por categoría para el año 2010.

Cuadro 2.7. Matriz de intercambio de superficies y probabilidades de transición de usos de la tierra en el período 1986-2010, para la UMAFOR Zacatlán.

		AÑO 2010 (ha)					
		Forestal	Agrícola	Pecuario	Residencial	C. Agua	Total
AÑO 1986 (ha)	Forestal	113,759.55 (0.83)	17,470.26 (0.13)	5,933.34 (0.04)	272.61 (0.00)	15.30 (0.00)	137,451.06 (1.00)
	Agrícola	10,076.76 (0.11)	82,980.81 (0.87)	701.37 (0.01)	1,363.41 (0.01)	30.24 (0.00)	95,152.59 (1.00)
	Pecuario	18,795.87 (0.52)	8,942.85 (0.25)	8,035.47 (0.22)	108.36 (0.00)	0.00 (0.00)	35,882.55 (1.00)
	Residencial	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	422.37 (1.00)	0.00 (0.00)	422.37 (1.00)
	C. Agua	4.23 (0.05)	13.23 (0.14)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	76.23 (0.81)	93.69 (1.00)
	Total	142,636.41	109,407.15	14,670.18	2,166.75	121.77	269,002.26

De esta manera, se observa (Cuadro 2.7) que para la UMAFOR Zacatlán en el período analizado de 24 años (1986-2010), la superficie estable para el uso forestal se mantuvo en 113,759.55 ha lo que representa un 83% de la misma. El proceso de deforestación existente en la zona se cuantifica en la pérdida de 23,691.51 ha de superficie forestal; donde la mayor probabilidad de transición se registró hacia el uso agrícola (0.13) y en menor medida hacia el uso pecuario (0.04), siendo poco representativo hacia los usos residencial y cuerpos de agua. La baja probabilidad de transición hacia el uso residencial se debe principalmente a que el crecimiento y expansión de las poblaciones ha ocupado básicamente superficie de uso agrícola (1,363.41 ha), situación reportada de la misma manera por Pineda *et al.*, (2009) para el estado de México.

Por otro lado, en la UMAFOR Zacatlán también han existido procesos de recuperación de superficies forestales, teniendo que el mayor aporte a este proceso ha sido el uso pecuario con 18,795.87 ha con una probabilidad de transición de 0.52, que representa la probabilidad de que el uso de suelo pecuario cambie a un uso forestal; le sigue el uso agrícola con un aporte de 10,076.76 ha y una probabilidad de cambio a uso forestal de 0.11. Se observa que el uso pecuario

es el que presenta la mayor dinámica de cambio, tanto a uso forestal como a uso agrícola, lo cual puede deberse a que este uso incluyó las superficies de descanso con herbáceas, que es un estado intermedio entre el uso forestal y el agrícola, y viceversa.

Adicionalmente, en el estudio realizado por Evangelista *et al.* (2009) se menciona que con la entrada del Tratado de Comercio Libre disminuyó la producción de carne de res y se han abandonado pastizales, los cuales han sido utilizados para el establecimiento de cafetales, para la conversión a uso agrícola en zonas de laderas con pequeños propietarios, o se han iniciado procesos de sucesión secundaria; situación que es muy probable explique los cambios tan dinámicos del uso de suelo pecuario en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

La información anterior (superficies dinámicas respecto al uso forestal) se presenta de manera espacial en la Figura 2.4, agrupando los cambios detectados en procesos de deforestación y recuperación, como una manera de analizar visualmente la distribución espacial de los cambios de uso de la tierra detectados en la UMAFOR Zacatlán.

El proceso de deforestación incluye todas aquellas superficies que cambiaron de un uso forestal a otros usos (agrícola, pecuario, residencial y cuerpos de agua) y como se observa en la Figura 2.4, este proceso se presentó principalmente en la parte noreste de la UMAFOR Zacatlán, que incluye los municipios de Ahuacatlán, Amixtlán, Tepango de Rodríguez, Camocuautla y Coatepec, donde se reporta Bosque Mesófilo de Montaña, Bosque de Encino y Sistemas Agroforestales (cafetales con sombra) (SMRN, 2007). Esto coincide completamente con el Estudio Regional Forestal (SMRN, 2007) respecto a que es en esta zona donde el proceso de deforestación ha tenido una mayor presencia debido al crecimiento de la población y a la apertura de cultivos agrícolas incentivados por apoyos como PROCAMPO; además, la transformación de cafetales con sombra a cultivos agrícolas, por las crisis en el sector cafetalero, ha propiciado que éste no sea rentable (Evangelista *et al.*, 2009).

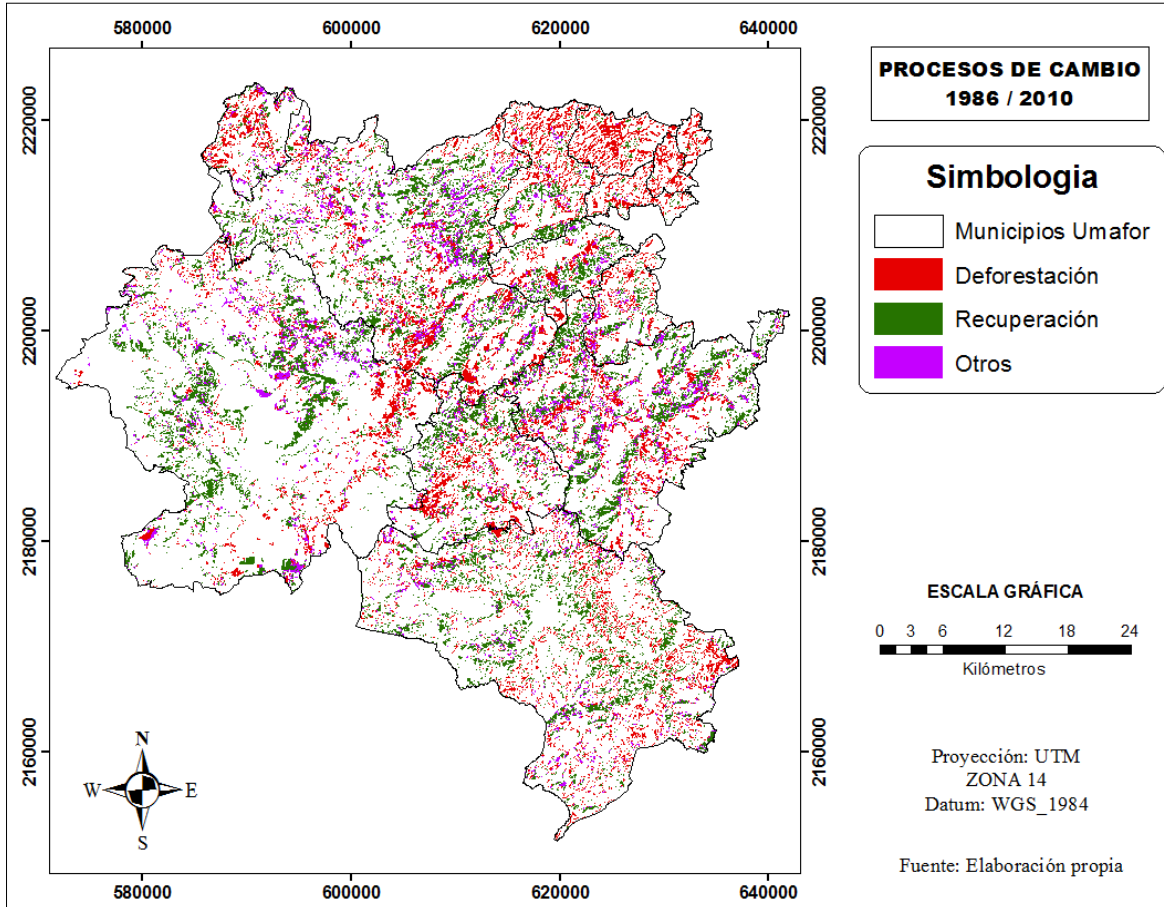


Figura 2.4. Procesos de cambio de usos de la tierra detectados en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

En menor medida se presenta este proceso en zonas donde se reporta Bosque de Pino y Bosque de Pino-Encino, como en parte de los municipios de Chignahuapan, Zacatlán, Tetela de Ocampo, Aquixtla e Ixtacamaxtitlán. Resultados similares han sido encontrados en otros estudios (Mas *et al.*, 1996; Ochoa y González, 2000; Cayuela, 2006; Díaz *et al.*, 2008), donde los tipos de vegetación de Bosque Mesófilo de Montaña, Bosque de Latifoliadas y Selvas Tropicales han sido más susceptibles al proceso de deforestación, caso contrario con Bosques de Pino donde la tasa de deforestación ha sido menor, existiendo en algunos casos incrementos en superficies de este último tipo de vegetación.

Por otro lado, en la zona de estudio también ha existido el proceso de recuperación de superficie forestal, el cual puede deberse básicamente a dos

situaciones: (a) Recuperación por abandono de superficies agrícolas y pecuarias; y (b) Recuperación por reconversión a través de plantaciones y reforestaciones.

Las dos situaciones han estado presentes en la UMAFOR Zacatlán, la primera se registra en la zona noreste del área de estudio, en municipios como Tepetzintla, Cuautempan y Tetela de Ocampo donde los cambios de uso de la tierra son muy dinámicos, existiendo la recuperación de superficies forestales por abandono de tierras agrícolas y pecuarias. La segunda situación se presenta en los municipios de Zacatlán y Chignahuapan los cuales se caracterizan por tener programas de manejo de sus recursos naturales, propiciando la recuperación de superficies forestales a través de diversas reforestaciones y plantaciones forestales.

Lo anterior, pareciera indicar que en la UMAFOR Zacatlán, el proceso de deforestación no es significativo dado que existe una ganancia de superficie forestal (5,185.35 ha) en el período analizado (1986-2010), pero como se ha mencionado, estos procesos (deforestación-recuperación) se presentan en diferentes espacios geográficos, y específicamente la deforestación en el área de estudio está afectando uno de los ecosistemas (Bosque Mesófilo de Montaña) más importantes de México, además de que en algunas zonas la recuperación de superficie forestal es temporal (7 a 15 años) esperando que los árboles sean aprovechables maderablemente para volver a deforestar y utilizar los terrenos para uso agrícola por otro periodo de tiempo. Por tanto, se considera que el proceso de deforestación en la UMAFOR Zacatlán es significativo y requiere de su atención inmediata para detener y revertir dicho proceso.

Procesos similares de deforestación-recuperación de superficies forestales han sido reportadas en diversos estudios (Velázquez *et al.*, 2002; Franco *et al.*, 2006; Díaz *et al.*, 2008; Pineda *et al.*, 2009; Valdez *et al.*, 2011) confirmando que existen dinámicas de cambios de usos de la tierra complejos e interesantes de analizar a nivel regional.



### 2.4.3. Modelos probabilísticos de cambios de uso de la tierra

En el Cuadro 2.8 se muestran las estadísticas básicas obtenidas para la variable dependiente y las variables independientes. El número de observaciones totales fue de 137,304 ha o celdas, de las cuales 113,616 (82.75%) correspondieron a uso forestal sin cambio entre el período analizado (1986-2010), 17,501 (12.75%) corresponden a cambio de uso forestal a uso agrícola, 5,894 (4.29%) a cambio de uso forestal a uso pecuario, y el resto, 293 ha (0.21%) a cambio de forestal a uso residencial.

Cuadro 2.8. Estadísticas básicas para la variable dependiente y las independientes

	Variables	Unidades	Número de observaciones	Valor Mínimo	Media	Valor Máximo	Desviación Estándar
Yi	CUS	0 a 3	137,304	0	0	3	1
X <sub>1</sub>	ALTITUD	Metros	137,304	300	2,274	3,477	567
X <sub>2</sub>	PENDIENTE	Porcentaje	137,304	0	40	314	27
X <sub>3</sub>	D_CORRPER	Metros	137,304	0	1,458	9,105	1,327
X <sub>4</sub>	D_CUERAGUA	Metros	137,304	0	2,440	8,422	1,414
X <sub>5</sub>	D_POBLADOS	Metros	137,304	0	1,487	4,999	797
X <sub>6</sub>	D_HOGLEÑACA	Metros	137,304	0	1,301	4,230	715
X <sub>7</sub>	D_CARRETERAS	Metros	137,304	0	1,148	5,057	913
X <sub>8</sub>	D_VEREDAS	Metros	137,304	0	552	2,816	442
X <sub>9</sub>	D_AREASAGR	Metros	137,304	30	554	4,279	623
X <sub>10</sub>	D_AREASPEC	Metros	137,304	30	288	3,487	310
X <sub>11</sub>	D_ASERRAD	Metros	137,304	0	5,665	24,337	4,575
X <sub>12</sub>	DENPOB	Hab/ha	137,304	0	1	2	0
X <sub>13</sub>	MARGMALTA	0 a 1	137,304	0	0	1	0
X <sub>14</sub>	MARGMEDIA	0 a 1	137,304	0	0	1	0
X <sub>15</sub>	PREDMANFTAL	0 a 1	137,304	0	0	1	0
X <sub>16</sub>	TENENCEJIDAL	0 a 1	137,304	0	0	1	0
X <sub>17</sub>	TENENCPRIVADA	0 a 1	137,304	0	1	1	0

CUS = Cambios de uso de la tierra; D\_ = Distancia; CORRPER = Corrientes perennes; CUERAGUA = Cuerpos de agua; HOGLEÑACA = Hogares que usan leña y carbón; AREASAGR = Áreas agrícolas; AREASPEC = Áreas pecuarias; ASERRAD = Aserraderos; DENPOB = Densidad poblacional; MARGMALTA = Marginación muy alta; MARGMEDIA = Marginación media; PREDMANFTAL = Predios bajo manejo forestal; TENENCEJIDAL = Tenencia ejidal; TENENCPRIVADA = Tenencia privada.

Antes de iniciar la construcción de los modelos definitivos, se obtuvieron los valores del coeficiente de correlación de Pearson (SAS, 2002), con la finalidad de detectar posibles correlaciones entre las variables independientes que pudieran

afectar la confiabilidad de los modelos, obteniendo que las variables independientes no presentan entre si correlaciones consideradas altas ( $\geq 0.8$ ).

Para la selección de las variables independientes se utilizó el método de selección paso a paso “Stepwise” (SAS, 2002; Flom, 2013; SEQC, 2013) el cual permitió obtener las variables significativas y las no significativas con un nivel de confianza de  $p \leq 0.05$ , así como el orden de importancia en que cada variable explicativa fue entrando a cada modelo mediante sus valores de Score Chi-Square (Cuadro 2.9).

Cuadro 2.9. Orden de importancia de las variables independientes en cambios de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Variables	Forestal / Agrícola		Forestal / Pecuario		Forestal / Residencial	
	Importancia	Score Chi-Square	Importancia	Score Chi-Square	Importancia	Score Chi-Square
ALTITUD	NS	----	2	3,312.57	3	232.33
PENDIENTE	2	3,729.42	9	70.18	2	401.16
D_CORRPER	13	42.02	NS	----	4	108.07
D_CUERAGUA	11	67.30	NS	----	8	55.77
D_POBLADOS	8	192.56	10	60.53	1	373.28
D_HOGLEÑACA	4	1,404.21	12	23.17	NS	----
D_CARRETERAS	10	68.34	NS	----	5	86.53
D_VEREDAS	7	326.13	11	62.50	6	75.31
D_AREASAGR	1	7,765.37	NS	----	10	34.95
D_AREASPEC	5	648.03	3	934.02	NS	----
D_ASERRAD	12	40.36	7	136.79	NS	----
DENPOB	15	37.99	4	220.62	NS	----
MARGMALTA	NS	----	1	13,241.05	7	75.80
MARGMEDIA	9	147.93	13	17.78	9	49.72
PREDMANFTAL	3	1,881.44	5	143.81	11	19.29
TENENCEJIDAL	6	234.93	8	88.23	NS	----
TENENCPRIVADA	14	44.44	6	143.90	NS	----

CUS = Cambios de uso de la tierra; D\_ = Distancia; CORRPER = Corrientes perennes; CUERAGUA = Cuerpos de agua; HOGLEÑACA = Hogares que usan leña y carbón; AREASAGR = Áreas agrícolas; AREASPEC = Áreas pecuarias; ASERRAD = Aserraderos; DENPOB = Densidad poblacional; MARGMALTA = Marginación muy alta; MARGMEDIA = Marginación media; PREDMANFTAL = Predios bajo manejo forestal; TENENCEJIDAL = Tenencia ejidal; TENENCPRIVADA = Tenencia privada. **NS = No significativa ( $P \leq 0.05$ )**

De esta manera, se obtuvo que de las 17 variables biofísicas y socioeconómicas consideradas en este estudio como factores causales en el proceso de deforestación, sólo 15 de ellas incidieron en la deforestación a uso agrícola, siendo las que mejor explican la pérdida de superficie forestal las variables D\_AREASAGR, PENDIENTE, PREDMANFTAL, D\_HOGLEÑACA, y así sucesivamente. Las variables ALTITUD y MARGMALTA resultaron no significativas para este cambio, dado que la actividad agrícola se presenta en toda la región sin que estas variables influyan en el desarrollo de la misma.

Para el cambio de uso forestal a uso pecuario, 13 variables fueron altamente significativas, descartando las variables D\_CORRPER, D\_CUERAGUA, D\_CARRETERAS y D\_AREASAGR; siendo más importantes en este proceso las variables MARGMALTA, ALTITUD, D\_AREASPEC, DENPOB, PREDMANFTAL, entre otras (Cuadro 2.9).

El cambio de uso forestal a uso residencial es el que presentó menos variables significativas (11), descartando 6 de ellas: D\_HOGLEÑACA, D\_AREASPEC, D\_ASERRAD, DENPOB, TENENCEJIDAL y TENENCPRIVADA. Algunas de las variables altamente significativas en orden de importancia son las siguientes: D\_POBLADOS, PENDIENTE, ALTITUD, D\_CORRPER, etc. (Cuadro 2.9).

En resumen, las variables biofísicas: PENDIENTE y ALTITUD son las que comparten cierto estatus de importancia en al menos dos procesos diferentes de cambio de usos de la tierra, por lo que su inclusión en estudios de deforestación resulta importante.

La información anterior permitió definir las variables significativas para obtener los coeficientes estimados para cada una de ellas, construyendo un modelo diferente para cada cambio de uso de la tierra (forestal/agrícola, forestal/pecuario y forestal/residencial), cuyos valores se muestran en el Cuadro 2.10.

Cuadro 2.10. Resultados de regresión logística para cambios de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Variables	Forestal / Agrícola			Forestal / Pecuario			Forestal / Residencial		
	Coefficiente estimado	Wald (Chi-Square)	Significancia (Pr>Chi-Square)	Coefficiente estimado	Wald (Chi-Square)	Significancia (Pr>Chi-Square)	Coefficiente estimado	Wald (Chi-Square)	Significancia (Pr>Chi-Square)
Intercepto	-0.2397	7.14	<.0001	-1.1731	54.40	<.0001	3.604	64.58	<.0001
ALTITUD (m)	NS	NS	NS	-0.0011	525.68	<.0001	-0.00288	146.54	<.0001
PENDIENTE (%)	-0.033	3811.07	<.0001	-0.00592	102.61	<.0001	-0.0853	294.36	<.0001
D_CORRPER (m)	0.000049	49.28	<.0001	NS	NS	NS	0.000682	127.87	<.0001
D_CUERAGUA (m)	0.000061	78.70	<.0001	NS	NS	NS	0.00022	22.26	<.0001
D_POBLADOS (m)	-0.00022	125.84	<.0001	-0.00039	74.80	<.0001	-0.00178	132.41	<.0001
D_HOGLEÑACA (m)	-0.00031	212.97	<.0001	0.00022	24.74	<.0001	NS	NS	NS
D_CARRETERAS (m)	-0.00015	126.80	<.0001	NS	NS	NS	-0.00157	73.44	<.0001
D_VEREDAS (m)	-0.00049	326.67	<.0001	0.000213	43.48	<.0001	-0.0026	87.41	<.0001
D_AREASAGR (m)	-0.003	3418.92	<.0001	NS	NS	NS	-0.00073	34.94	<.0001
D_AREASPEC (m)	0.000721	630.85	<.0001	-0.0022	624.02	<.0001	NS	NS	NS
D_ASERRAD (m)	-0.00002	53.80	<.0001	0.00008	307.39	<.0001	NS	NS	NS
DENPOB (hab/ha)	0.1444	23.97	<.0001	0.8721	204.28	<.0001	NS	NS	NS
MARGMALTA (0, 1)	NS	NS	NS	0.64	160.94	<.0001	1.556	55.00	<.0001
MARGMEDIA (0, 1)	-0.3416	139.46	<.0001	-0.3356	27.35	<.0001	1.4059	57.75	<.0001
PREDMANFTAL (0, 1)	-0.7777	776.34	<.0001	-1.191	100.19	<.0001	-1.9372	24.29	<.0001
TENENCEJIDAL (0, 1)	1.2313	226.28	<.0001	-1.0307	82.78	<.0001	NS	NS	NS
TENENCPRIVADA (0, 1)	1.2602	247.88	<.0001	-0.7263	210.57	<.0001	NS	NS	NS

CUS = Cambios de uso de la tierra; D\_ = Distancia; CORRPER = Corrientes perennes; CUERAGUA = Cuerpos de agua; HOGLEÑACA = Hogares que usan leña y carbón; AREASAGR = Áreas agrícolas; AREASPEC = Áreas pecuarias; ASERRAD = Aserraderos; DENPOB = Densidad poblacional; MARGMALTA = Marginación muy alta; MARGMEDIA = Marginación media; PREDMANFTAL = Predios bajo manejo forestal; TENENCEJIDAL = Tenencia ejidal; TENENCPRIVADA = Tenencia privada. **NS = No significativa (P≤0.05)**

Con la información presentada en los Cuadros 2.9 y 2.10, se deduce que para el proceso de deforestación a uso agrícola en la UMAFOR Zacatlán, la variable D\_AREASAGR presenta una relación negativa con dicho proceso; es decir, que a medida que disminuye la distancia entre una zona forestal y una zona agrícola, aumenta la probabilidad de que esa zona forestal se deforeste. En este sentido, las variables de proximidad que mantienen una relación negativa con el proceso de deforestación, en mayor o menor medida, son: D\_POBLADOS, D\_HOGLEÑACA, D\_CARRETERAS, D\_VEREDAS y D\_ASERRAD. Por el contrario, las variables de proximidad que presentan una relación positiva con el proceso de deforestación, es decir que no hay gran pérdida de bosque en áreas próximas a estas zonas o elementos, son: D\_CORRPER, D\_CUERAGUA y D\_AREASPEC (Cuadro 2.10).

Estas mismas variables de proximidad tienen una relación similar (negativa o positiva) para los otros cambios de uso de la tierra (pecuario y residencial) en los que resultaron significativas, excepto el caso de las variables D\_HOGLEÑACA, D\_VEREDAS, D\_ASERRAD y D\_AREASPEC con respecto a la deforestación a uso pecuario. Un ejemplo de ello, es que la variable D\_AREASPEC tiene para el cambio a uso pecuario una relación negativa, lo cual reafirma la influencia del avance de la frontera pecuaria sobre el proceso de deforestación; no así para el cambio a uso agrícola, donde la cercanía a zonas de pastizales no influyen en la deforestación a este uso (Cuadro 2.10).

Respecto a las variables de ALTITUD y PENDIENTE, éstas presentaron una relación negativa con el proceso de deforestación a diferentes usos, lo que implica que a menor pendiente y altitud, mayor probabilidad de deforestación. Las variables DENPOB y MARGMALTA muestran coeficientes positivos, lo que indica que la deforestación se da mayormente en áreas que tengan estas condiciones de marginación y densidad poblacional; siendo un caso contrario para deforestación a uso agrícola y pecuario, la variable de grado de marginación media (MARGMEDIA) que presentó una relación negativa con estos dos cambios (Cuadro 2.10).

La variable PREDMANFTAL presentó un coeficiente negativo para el proceso de deforestación en los tres diferentes usos, lo cual indica que la presencia de esta condición ayuda a detener el proceso de deforestación, mediante la protección y manejo sustentable de los recursos forestales, lo cual ha sido reportado como tal para la UMAFOR Zacatlán en su Estudio Regional Forestal (SRMN, 2007).

Para el caso de la tenencia de la tierra, se presentaron relaciones diferentes para el proceso de deforestación, donde la variable TENENCEJIDAL y la variable TENENCPRIVADA tienen un coeficiente positivo para el cambio a uso agrícola, y un coeficiente negativo para el cambio a uso pecuario. Esto muestra que la deforestación a uso agrícola se da tanto en terrenos con propiedad privada como ejidal, siendo el caso contrario para la deforestación a uso pecuario.

Estos resultados difieren en algunos casos con los resultados de estudios similares en diversas regiones (Lambin *et al.*, 2001; Torres y Flores, 2001; Mas *et al.*, 2003; Vergara y Gayoso, 2004; Dupuy *et al.*, 2007; Nelson y Chomitz, 2009; Pineda *et al.*, 2009; Pineda *et al.*, 2011), lo cual puede deberse a los métodos utilizados, la escala aplicada y a las particularidades de cada región estudiada, aunque de manera general se puede concluir que las variables de proximidad a vías de comunicación, a zonas urbanas, a zonas agropecuarias, la pendiente y la altitud, la marginación muy alta y la densidad poblacional, son factores que siguen influyendo de manera negativa en los procesos de deforestación, específicamente en la UMAFOR Zacatlán. Así también, para el área de estudio, la variable de predios bajo manejo forestal autorizado, es un factor que ayuda a detener o revertir el proceso de deforestación.

Para realizar un análisis más detallado de los factores que pueden influir en el proceso de deforestación de una determinada región, se pueden incorporar otras variables como: Información sobre tala clandestina, incendios y salud forestal, la calidad y aptitud de los suelos, el nivel de educación de las poblaciones, la migración de habitantes, balanzas de precios de principales productos agropecuarios y silvícolas, los programas agrícolas, pecuarios y forestales implementados, o sectorizar más las variables comúnmente utilizadas. Con la

metodología descrita en la presente investigación esto es posible, ya que no limita el número de variables independientes a introducir y analizar.

Finalmente, como parte de la validación del modelo se presentan las medidas de asociación entre las probabilidades predichas y las respuestas observadas (Cuadro 2.11). De un total de 2,801,341,437 pares de observaciones, el 75.10% fueron concordantes y el 24.10% fueron discordantes. Un par de observaciones es concordante si están ordenados en la misma dirección tanto en la variable dependiente como la independiente. Contrariamente, si un par de observaciones se encuentra ordenado en sentido opuesto en cada variable, se considera como un par discordante. Un par empatado ocurre cuando no es concordante ni discordante o se presenta una situación combinada (SAS, 2002).

Cuadro 2.11. Medidas de asociación y coeficientes de correlación entre pares de variables

Medidas de asociación	Respuestas observadas	Coeficientes de correlación	Valor
Pares:	2,801,341,437	Somers'D:	0.511
Porcentaje concordante:	75.10	Gamma:	0.515
Porcentaje discordante:	24.10	Tau-a:	0.152
Porcentaje muerto:	0.80	c:	0.755
R <sup>2</sup> adj:	18.04%		

Los coeficientes mostrados (Somers'D, Gamma, Tau-a y c) determinan el grado de asociación entre variables, en relación con el número de pares concordantes y discordantes. Para estos coeficientes, los valores varían entre 1 y -1 donde el signo indica el sentido de la asociación y el 0 la independencia estadística, por lo que valores cercanos a 1 indican una asociación perfecta entre las variables (SAS, 2002).

Lo anterior indica que existe una asociación aceptable entre las variables respuesta y las variables independientes, lo cual no se refleja en el valor reportado de R<sup>2</sup>adj el cual se considera bajo ya que indica que sólo el 18.04% de la variable respuesta es explicada por las variables independientes. Sin embargo, se reporta

que en regresión logística, valores entre 0.2 y 0.4 son considerados aceptables (Eastman, 2003); y en este mismo sentido, González (2000) muestra las diferentes razones que pueden ayudar a explicar valores bajos de la  $R^2_{adj}$ .

#### **2.4.4. Mapas probabilísticos de cambios de uso de la tierra**

Una de las funciones principales de la regresión logística es estimar la probabilidad de aparición de cada una de las posibilidades de un suceso (análisis de predicción). Con los valores obtenidos de los coeficientes estimados, se construyeron modelos probabilísticos correspondientes a cada cambio de uso de la tierra y se aplicaron a la superficie forestal actual (2010). Lo anterior, para obtener la distribución espacial de las probabilidades de cambio de usos de la tierra de dicha superficie a cada cambio considerado en este estudio (Figura 2.5).

El rango de probabilidad de cambio de superficie forestal a uso agrícola va de 0 a 0.94 y los valores más altos se distribuyen principalmente en los municipios de Zacatlán, Chignahuapan, Aquixtla, Tetela de Ocampo e Ixtacamaxitlán. Por el contrario, los valores más altos del rango de probabilidad (0 a 0.74) para cambio a uso pecuario se distribuyen en los municipios de Ahuacatlán, Amixtlán, Camocuautla, Tepango de Rodríguez, Coatepec, Tepetzintla y Cuautempan. Esto va relacionado con los usos de la tierra predominantes en cada municipio. Los valores más altos de probabilidad de cambio a uso residencial se ubican en los municipios de Amixtlán, Zacatlán y Chignahuapan, siendo éstos los que presentan mayor crecimiento poblacional en el periodo analizado.



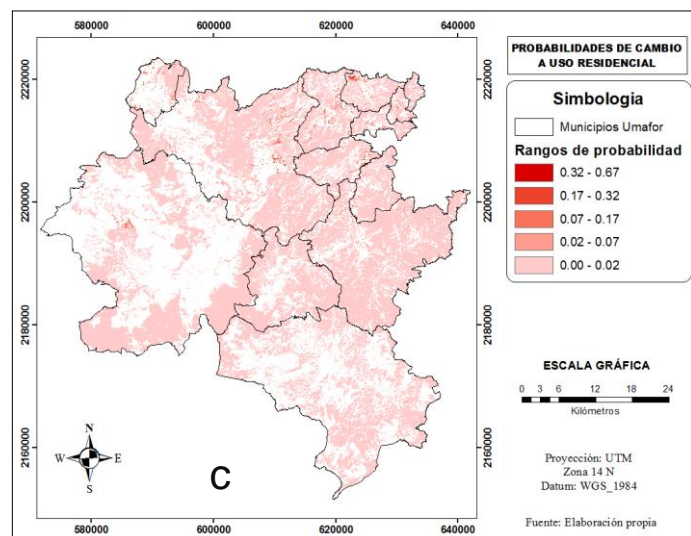
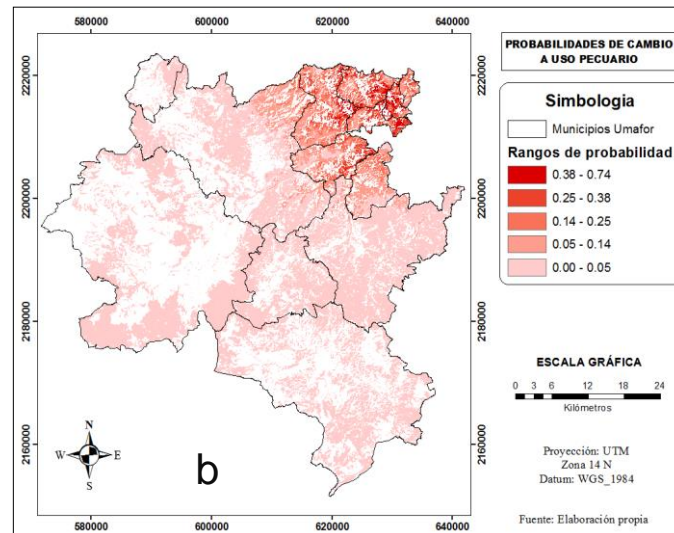
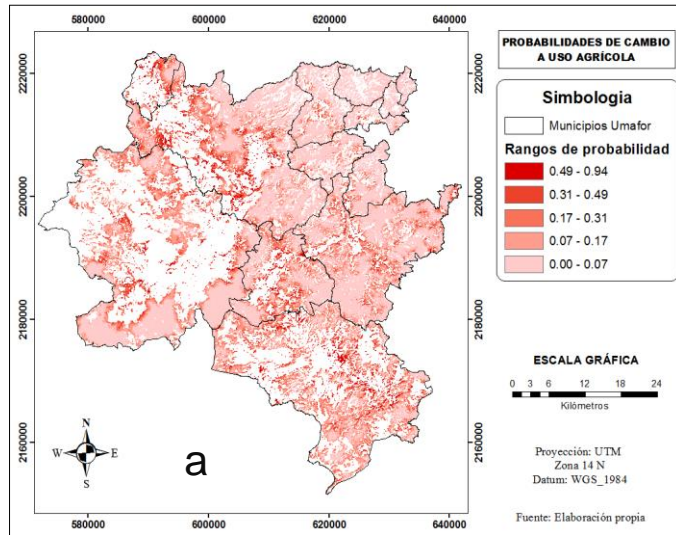


Figura 2.5. Probabilidades de cambio de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán: a) forestal/agrícola, b) forestal/pecuario, y c) forestal/residencial

La técnica de regresión logística utilizada y los modelos probabilísticos construidos presentan tanto fortalezas como debilidades. Entre las primeras, se tiene que la regresión logística permitió el análisis por separado de cada cambio de uso de la tierra, generando modelos probabilísticos con las variables que resultaron significativas para cada cambio, con la opción de incluir tantas variables como sean necesarias y exista la disponibilidad de información. Se considera como otra fortaleza que las variables incluidas en la presente investigación, son de las más representativas en la zona de estudio, y explican de manera confiable la dinámica y razones del proceso de deforestación en la región.

Como debilidades de este proceso, se considera que el modelo construido para cambio a uso residencial puede estar desbalanceado al contar con pocos datos de análisis para este cambio, lo que implica que el proceso de regresión logística no se complete o no se incluyan en el análisis variables independientes importantes; en esta situación, lo más recomendable sería conjuntar estos datos a otro cambio de uso de la tierra, o realizar solamente una regresión logística binomial (cambio y no cambio). Otra debilidad de los modelos construidos es la falta de actualización de algunas variables (vías de comunicación, hogares que usan leña y carbón, aserraderos clandestinos) para obtener la probabilidad de cambio de la superficie forestal actual, y la falta de información de algunas que pudieran ser importantes en el área de estudio (tala ilegal, incendios forestales, plagas y enfermedades).

#### **2.4.5. Escenarios futuros (2010-2030) de riesgo de deforestación**

Para la generación de los escenarios futuros de riesgo de deforestación, se utilizó la variable de crecimiento poblacional para el período 2010-2030, considerando que cada nuevo habitante requerirá para vivir de espacios de uso residencial, de uso agrícola y de uso pecuario, de acuerdo a la tendencia que la población ha venido presentando en el período de 1980 a 2010.

De esta manera, se extrajo en primer lugar la información del número de habitantes para los años 1980, 1995 y 2010 y sus correspondientes superficies de

uso de suelo para posteriormente obtener la densidad poblacional promedio por uso de suelo (agrícola –AG-, pecuario –PEC-, y residencial –RES-) para el período de 1980 a 2010 (Figura 2.6).

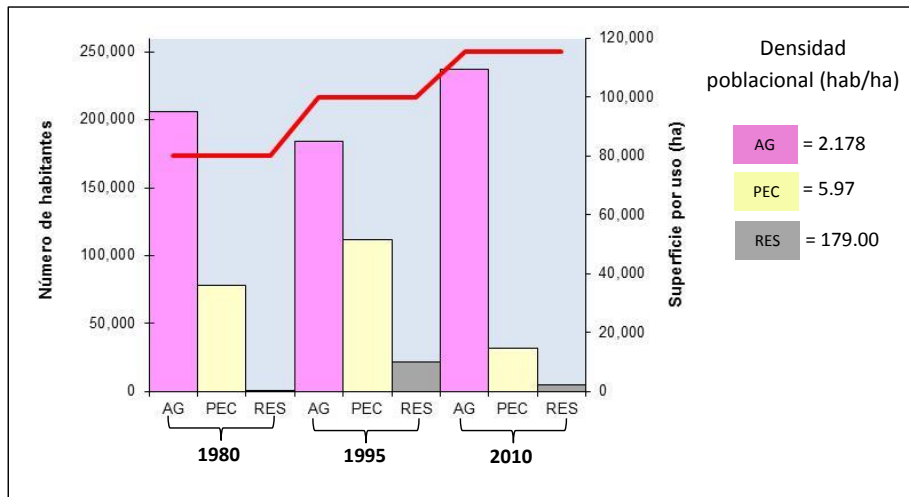


Figura 2.6. Densidad poblacional promedio por uso de la tierra de 1980 a 2010, para la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Mediante la información disponible de CONAPO (2010b) sobre la proyección poblacional al año 2030 para la zona de estudio, se obtuvo que el número de habitantes nuevos para el periodo de 2010 a 2030 será de 50,185 habitantes, y teniendo el promedio de densidad poblacional por uso de la tierra, se obtuvo que la superficie requerida por estos habitantes nuevos al año 2030 será de 23,042 ha de uso agrícola, 8,404 ha de uso pecuario y 280 ha para uso residencial. Estas superficies se asignaron a los correspondientes mapas de probabilidades de cambio de uso de la tierra forestal, obteniendo la distribución espacial del riesgo de deforestación para cada uso para el año 2030 (Figura 2.7).

La generación de escenarios de riesgo de deforestación puede realizarse de diferentes maneras; por ejemplo, se podría observar el efecto o impacto sobre el riesgo de deforestación ante el cambio en alguna de las variables predictoras (construcción de una nueva carretera, apertura de áreas agropecuarias, creación o ampliación de centros de población, etc.), o también en evaluar alguna política pública que pudiera incentivar o desincentivar la actividad agrícola o pecuaria, entre otras. En esta investigación se decidió generar un escenario considerado

optimista con base al crecimiento poblacional y a la densidad poblacional promedio por uso de suelo, teniendo la opción de modificar estas variables para generar escenarios pesimistas (mayor crecimiento poblacional y/o densidad poblacional al año actual).

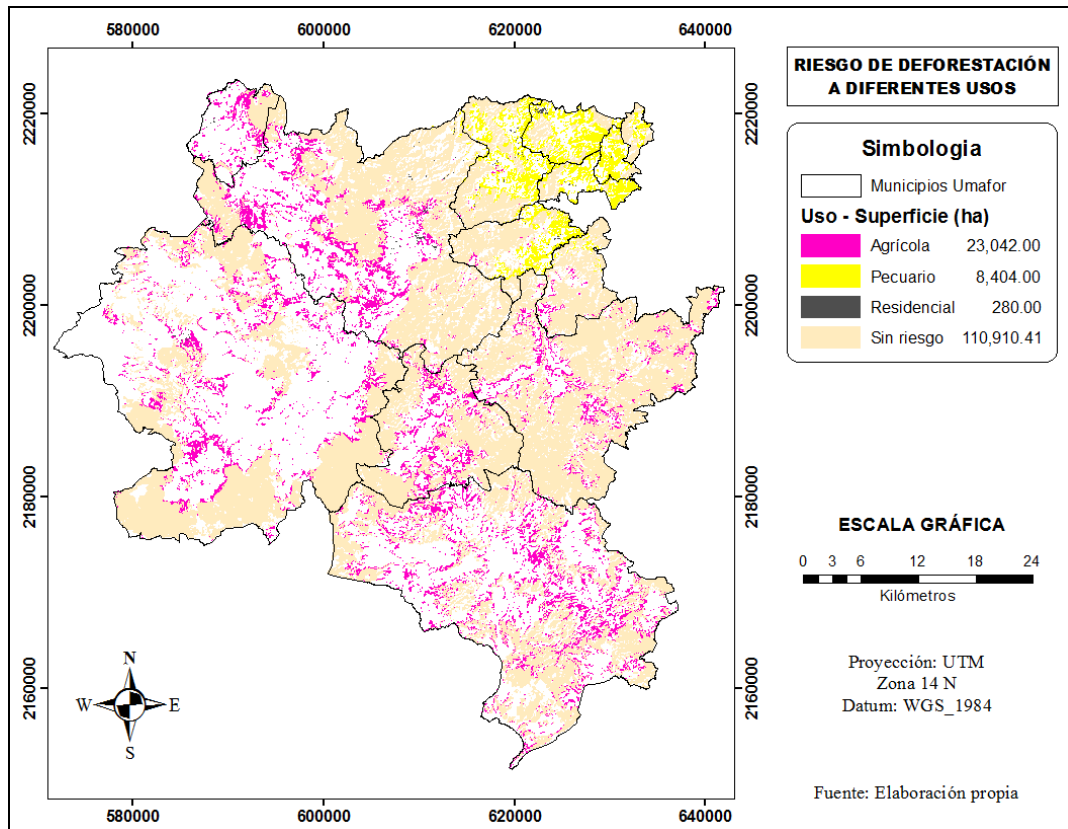


Figura 2.7. Distribución espacial de la superficie requerida por uso de la tierra, en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Posteriormente, con la finalidad de obtener el riesgo de deforestación en categorías de alto, medio y bajo riesgo, cada uno de los mapas se reclasificó agrupando la superficie de riesgo según su probabilidad de cambio, obteniendo los riesgos de deforestación por uso de la tierra como se muestra en la Figura 2.8.

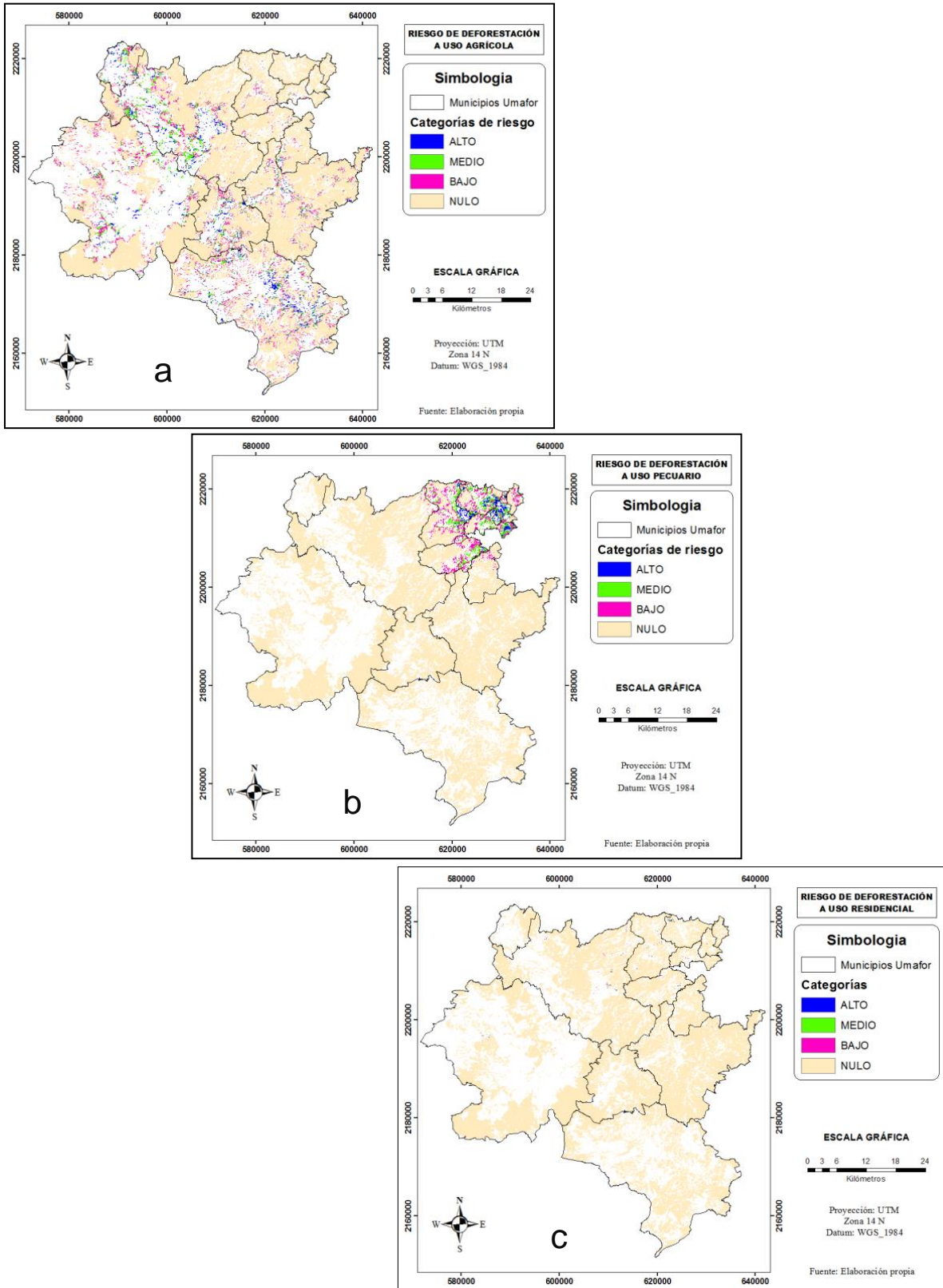


Figura 2.8. Riesgo de deforestación a diferentes usos en la UMAFOR Zacatlán (a) Agrícola; (b) Pecuario; y (c) Residencial.

La superficie con riesgo alto de deforestación hacia el uso agrícola es de 3,696 ha que representa el 16.04% de la superficie agrícola requerida para el año 2030 y se distribuye básicamente en los municipios de Zacatlán, Aquixtla e Ixtacamaxtitlán. Para la deforestación a uso pecuario, el mayor riesgo comprende una superficie de 1,194 ha misma que se distribuye en los municipios de Ahuacatlán, Amixtlán, Camocuautla y Tepango de Rodríguez, representando el 14.21% de la superficie total requerida para este uso. Por último, el riesgo de deforestación alto para el uso residencial se distribuye en el municipio de Amixtlán, siendo 37 ha de 280 requeridas para este uso en el año 2030 (Figuras 2.8 y 2.9).

En la Figura 2.9 se muestra una comparación de las superficies por categoría de riesgo y por tipo de uso, así como la superficie total de riesgo de deforestación obtenida del cruce de los mapas de la Figura 2.8.

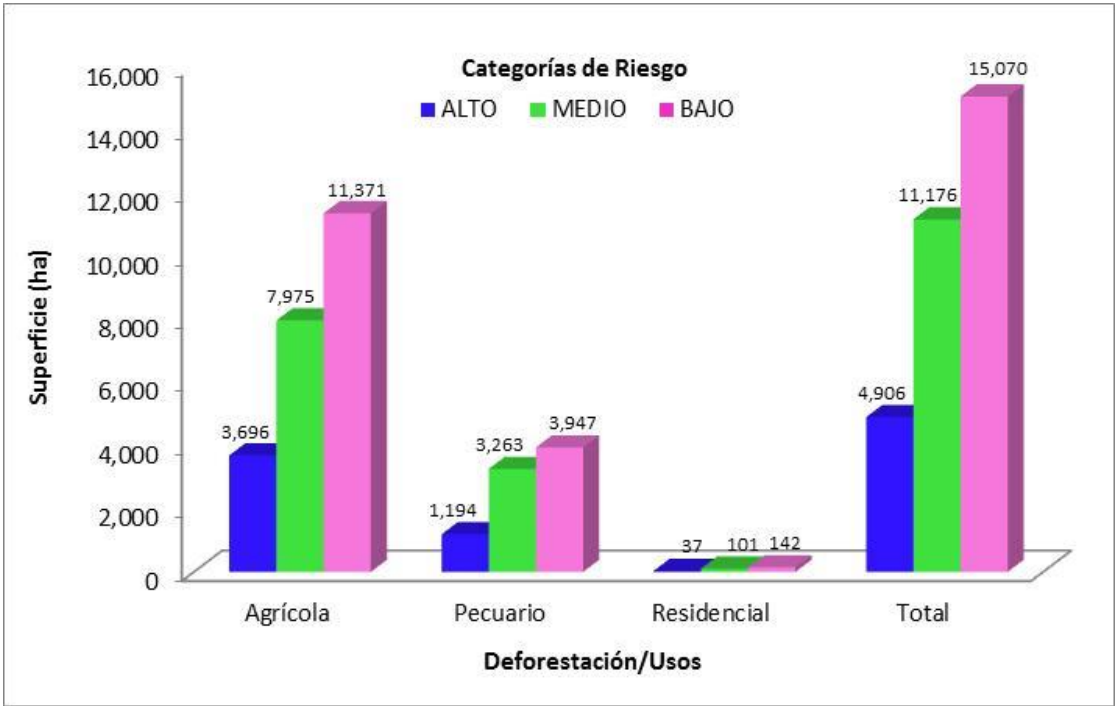


Figura 2.9. Distribución de superficies por categoría de riesgo de deforestación a diferentes usos, en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

La superficie total de riesgo de deforestación para la UMAFOR Zacatlán es de 31,152 ha que corresponde al 21.84% de la superficie forestal total (142,636.41 ha) del área de estudio. De ésta, la superficie con riesgo alto de deforestación son



4,906 ha (15.75% del total), con riesgo medio son 11,176 ha (35.88% del total) y con riesgo bajo 15,070 ha (48.38% del total). La distribución espacial de estas áreas, se observa en la Figura 2.10.

Esta superficie total de riesgo de deforestación (31,152 ha) difiere de la sumatoria de superficie de riesgo de deforestación para cada uso de la tierra (31,726 ha), debido que se presentaron similitudes entre categorías de los diferentes usos de la tierra, siendo éstas: 21 ha de riesgo alto de deforestación entre al menos dos de los tres usos considerados (agrícola, pecuario, residencial), 163 ha de riesgo medio y 390 ha de riesgo bajo en estas posibles combinaciones.

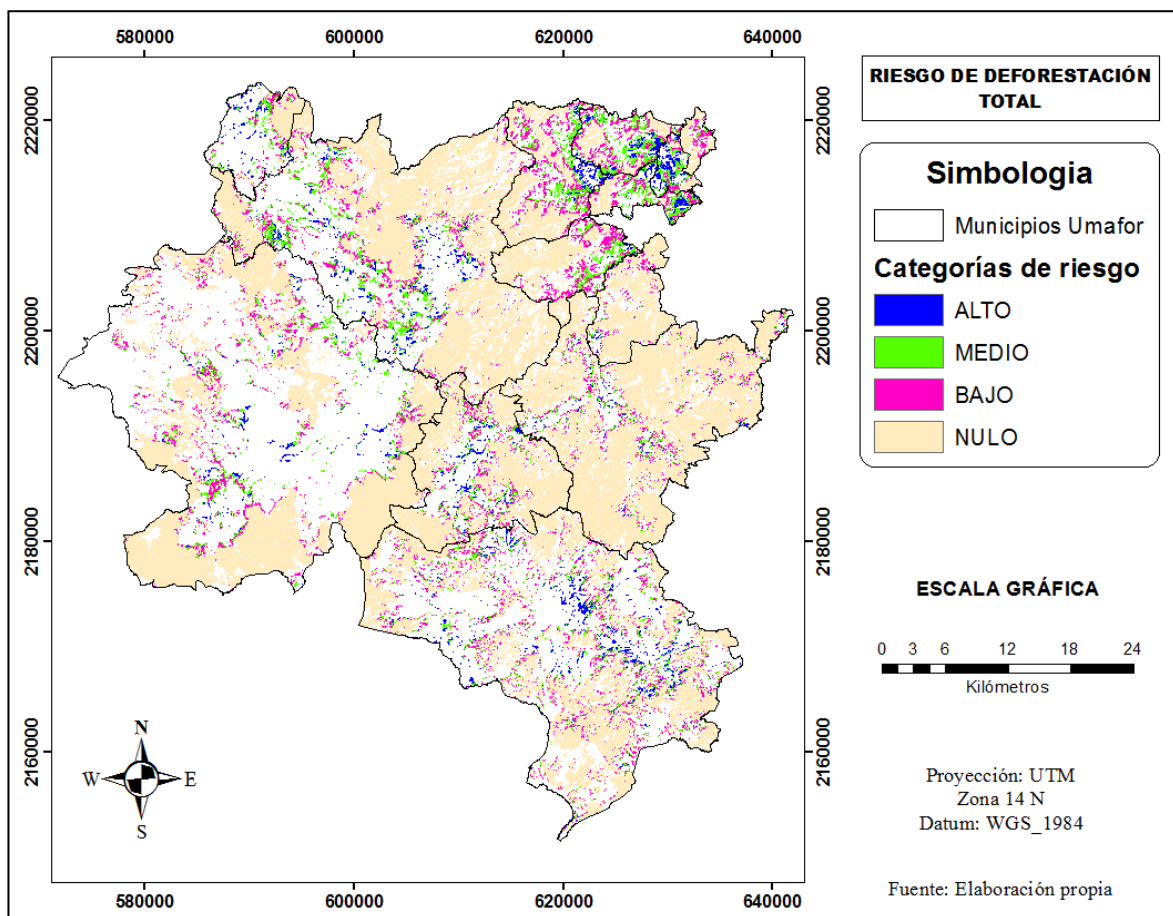


Figura 2.10. Riesgo de deforestación para la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Como se observa en la Figura 2.10, al conjuntar el riesgo de deforestación para cada uso, se genera el escenario base de riesgo de deforestación para el período

de 2010 a 2030, donde los municipios mencionados anteriormente (Ahuacatlán, Amixtlán, Aquixtla, Camocuautla, Ixtacamaxtitlán, Tepango de Rodríguez y Zacatlán) resultan propensos a presentar este proceso, o se mantienen y en algunos casos aumenta la superficie de riesgo alto de deforestación. Estos resultados se muestran de manera detallada por municipio en el Cuadro 2.12.

Cuadro 2.12. Superficie de riesgo de deforestación por municipio y porcentaje con respecto a su superficie forestal, en la UMAFOR Zacatlán.

Municipio	Superficie forestal (ha)	Riesgo de deforestación total (ha)				Porcentaje (%)
		Alto	Medio	Bajo	Total	
Ahuacatlán	6,007.29	296.47	879.49	1,205.30	2,381.27	39.64
Ahuazotepec	1,884.77	252.73	362.81	301.90	917.43	48.68
Amixtlán	2,813.74	276.74	860.81	762.14	1,899.68	67.51
Aquixtla	11,159.12	355.17	683.93	934.73	1,973.83	17.69
Camocuautla	1,006.14	365.68	324.27	150.56	840.51	83.54
Coatepec	916.34	1.96	36.69	198.26	236.91	25.85
Cuautempan	4,551.31	31.34	76.90	314.04	422.27	9.28
Chignahuapan	29,613.60	572.57	1,794.17	2,963.46	5,330.20	18.00
Tepango	1,843.48	233.80	614.98	456.67	1,305.45	70.81
Tepetzintla	4,772.25	42.66	532.64	934.06	1,509.37	31.63
Tetela	25,118.77	217.54	723.77	1,291.89	2,233.21	8.89
Ixtacamaxtitlán	24,869.35	1,327.64	2,161.15	3,423.10	6,911.89	27.79
Zacatlán	28,080.26	931.70	2,124.38	2,133.90	5,189.98	18.48

Los municipios con mayor riesgo de deforestación, respecto a su superficie forestal, son: Camocuautla (83.54%), Tepango de Rodríguez (70.81%) y Amixtlán (67.51%). Éstos se ubican en la parte noreste de la UMAFOR Zacatlán y se caracterizan por presentar Bosque Mesófilo de Montaña (BMM), Vegetación Secundaria de BMM y Sistemas Agroforestales (café bajo sombra). La superficie de estos ecosistemas forestales es propensa a registrar pérdidas en los próximos



30 años, por lo que su manejo adecuado y protección, independientemente de la valoración de sus servicios ambientales, se vuelve necesaria y urgente.

Aunque los municipios como Zacatlán, Ixtacamaxtitlán, Chignahuapan, Aquixtla, Ahuacatlán y Ahuazotepec presentan porcentajes relativamente bajos de riesgo de deforestación respecto al total de su superficie forestal, son los que concentran la mayor superficie de riesgo alto de deforestación y la distribución de la misma se encuentra muy dispersa, propiciando que si no se protegen estas áreas con riesgo, la fragmentación de la superficie forestal en el área de estudio podría continuar ocasionando la pérdida de importantes servicios ecosistémicos.

Con base a los resultados mostrados en el Cuadro 2.12 y a su ubicación espacial (Figura 2.10), se pueden implementar estrategias de manejo y protección por categoría de riesgo y por municipio, sin olvidar que este estudio se realizó a nivel regional (UMAFOR Zacatlán). Entre éstas, se mencionan las siguientes:

- ✓ Promover los ordenamientos ecológicos del territorio a nivel municipal, incluyendo estas áreas, según su riesgo de deforestación, en las políticas de manejo y conservación de recursos forestales.
- ✓ Incluir la protección y manejo sustentable de estas áreas, en las políticas de desarrollo forestal a nivel de la UMAFOR Zacatlán, a través de la Asociación Regional de Silvicultores.
- ✓ Promover políticas de asistencia técnica sobre el manejo sustentable de recursos forestales en los municipios donde haga falta, y fortalecer la misma donde ya exista.
- ✓ Proporcionar a los poseedores de los recursos forestales en riesgo, alternativas productivas rentables que satisfagan sus necesidades y mejoren su calidad de vida; no solo actividades diferentes de aprovechamiento de los recursos forestales, sino de generar los mercados y conocimientos para el buen manejo de los mismos, garantizando que cualquier otra actividad sea menos rentable, evitando así los cambios de uso de la tierra.

- ✓ Coordinar las políticas institucionales de desarrollo agrícola, pecuario, urbano, silvícola y ambientales, de tal manera que todas ellas se encaminen hacia un mismo objetivo, propiciando el desarrollo armónico y sustentable de estos sectores; evitando el deterioro del sector forestal a favor de los otros, y la duplicidad de inversión de recursos usados para recuperar superficies forestales afectadas por la implementación de políticas sectorizadas.

La adecuada implementación de las anteriores estrategias y otras que pudieran surgir, requiere que las mismas sean del conocimiento de los tomadores de decisiones a diferentes niveles, lo cual se pretende lograr a través del seguimiento y difusión de la presente investigación a instituciones gubernamentales, académicas, asociaciones civiles, prestadores de servicios técnicos, etc. Por otro lado, este apartado de la investigación abre espacios para el desarrollo de otros estudios en la UMAFOR Zacatlán, entre los cuales se sugieren los siguientes:

- Generación y comparación de diferentes escenarios (pesimistas y optimistas) de riesgo de deforestación, mediante otra modificación a la variable de crecimiento poblacional, la introducción de las variables que más inciden en el proceso de deforestación en el área de estudio o las que pudieran modificarse o generarse a raíz de los planes y programas de desarrollo para la región.
- Detección y análisis de cambios de uso de la tierra a diferente escala (municipal, microcuenca, comunidad) y temporalidad, para la generación de escenarios de áreas con riesgo de deforestación, tomando en cuenta factores que inciden en este proceso de acuerdo a las escalas espacio temporal analizadas.
- Detección y análisis de procesos de degradación o de sucesión de los diferentes tipos de vegetación existentes en el área. Lo anterior, debido a que en los recorridos de campo se observó que éstos se han ido modificando con el paso del tiempo, principalmente Bosques de Pino que están siendo sustituidos por Bosques de Encino, y BMM sustituidos por Vegetación Secundaria y Sistemas Agroforestales.

- Análisis de vulnerabilidad de los diferentes ecosistemas naturales de la región, ante el cambio climático.
- Investigaciones sobre la potencialidad de los ecosistemas forestales para brindar servicios ambientales, adjudicando de esta manera, la prioridad para su protección y conservación.
- Estudios relacionados a la estimación de costos de oportunidad de los diferentes cambios de uso de la tierra, incluyendo los impactos ambientales que este proceso genera.
- Análisis de las tendencias de los otros procesos de cambio de uso de la tierra (agrícola/pecuario/residencial a otros usos) identificando los patrones que inciden en estos cambios y generando escenarios útiles para la toma de decisiones respecto al desarrollo y ordenamiento adecuado del territorio.

## **2.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones**

- a) La clasificación de imágenes satelitales permitió obtener la distribución de los usos de la tierra en tiempo actual (2010) y pasado (1986 y 1995), lo que a su vez permitió la detección, cuantificación y localización espacial de los principales procesos de cambio de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, en un período de 24 años (1986-2010).
- b) El proceso de deforestación se cuantificó en la pérdida de 23,691 ha de superficie forestal, y el proceso de recuperación de la misma ocupó una superficie de 28,876.86 ha, existiendo a nivel regional una ganancia de superficie forestal de 5,185.35 ha. El proceso de deforestación en la UMAFOR Zacatlán es importante de atender, dado que propicia la pérdida y fragmentación de ecosistemas importantes para el país, como es el caso del Bosque Mesófilo de Montaña.
- c) La metodología utilizada en el presente trabajo para generar escenarios futuros de riesgo de deforestación, mediante el uso técnicas integradas en ArcGIS®,

Microsoft Office Excel<sup>®</sup> y SAS<sup>®</sup>, se considera útil para obtener resultados sobre la distribución espacial de las áreas con riesgo futuro de deforestación, a través del conocimiento retrospectivo de los factores que más inciden en este proceso. Para asegurar la confiabilidad de los resultados y la validez de la metodología, los escenarios mostrados deben sujetarse a una validación, mediante la calibración de los modelos con información obtenida del futuro.

- d) Los factores que más han incidido en el proceso de deforestación en la UMAFOR Zacatlán, son las de proximidad (a vías de comunicación, a zonas urbanas y a zonas agropecuarias), las biofísicas (pendiente y altitud), y las sociales (marginación muy alta y densidad poblacional). La superficie total con riesgo de deforestación al año 2030 corresponde a un 21.84% del total de superficie forestal y su mayor impacto se observa en la parte noreste de la UMAFOR Zacatlán.
- e) La localización espacial de áreas con riesgo futuro de deforestación, permite la planificación estratégica de desarrollo a nivel de la UMAFOR Zacatlán, promoviendo la protección y manejo sustentable de dichas áreas.

### **Recomendaciones**

Para evitar confusión en la clasificación de usos de la tierra, principalmente agrícola/pecuario y pecuario/forestal, se recomienda utilizar técnicas que apoyen la clasificación como la creación de imágenes de Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y de diferenciación de tipos texturales, entre otras.

### **2.6 LITERATURA CITADA**

- Allison, Paul D. (1999). Logistic regression using the SAS system: *Theory and application*. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 287 p.
- Cayuela, L. (2006). Deforestación y fragmentación de bosques tropicales montanos en los Altos de Chiapas, México. Efectos sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas* 15 (3): 192-198.

- Civco, D. L. (1989). Topographic normalization of landsat thematic mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55: 1303-1309.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). (2010a). Índice de marginación por entidad federativa y municipio (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de:  
[http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=478&Itemid=194](http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=478&Itemid=194)
- \_\_\_\_\_. (2010b). Proyecciones de población de los municipios de México 2010-2030 (En línea). Consultado en junio de 2013. Obtenido de:  
<http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>
- \_\_\_\_\_. (1998). Población rural y degradación ambiental. *In: La situación demográfica de México*. Secretaría de Gobernación, México, D.F., pp. 105-114.
- Chávez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 2025-303.
- Chuvienco, E. (2008). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio. 3ª edición. Editorial Aries, S. A., Barcelona, España.
- Clark Labs. (2006). Software IDRISI Andes. Clark University Worcester, Massachusetts, U.S.A.
- Díaz, G. J. R., J. F. Mas y A. Velázquez M. (2008). Monitoreo de los patrones de deforestación en el corredor biológico mesoamericano, México. *Interciencia* 33 (12): 882-890.
- Dupuy, R. J. M., J. A. González I., S. Iriarte V., L. M. Calvo I., C. Espadas M., F. Tun D. y A. Dorantes E. (2007). Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noreste de Quintana Roo. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 62: 104-124.
- Eastman, J. R. (2006). IDRISI Andes. *Guide to GIS and image processing*. Clark University Worcester, Massachusetts, U.S.A.: Clark Labs.

- \_\_\_\_\_. (2003). Guide to GIS and Image Processing, Kilimanjaro tutorial. Clark University Worcester, Massachusetts, U.S.A.: Clark Labs.
- ESRI. (2011). Software ArcGIS, versión 10.0. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Evangelista, O. V., J. López B., J. Caballero N. y M. A. Martínez A. (2010). Patrones espaciales de cambio de cobertura y uso del suelo en el área cafetalera de la sierra norte de Puebla. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM, 72:23-38.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2005a). Land cover classification concepts and user manual software version 2. Revisado por Antonio Di Gregorio (En línea). Consultado en octubre de 2012. Obtenido de: <http://www.fao.org/docrep/008/y7220e/y7220e00.HTM>
- \_\_\_\_\_. (2005b). Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005: Términos y definiciones. Roma, Italia.
- FAO/OAPN. (2009). Manual de Capacitación: Pago por servicios ambientales en áreas protegidas en América Latina. Programa FAO/OAPN. Roma, Italia.
- Flom, P. L. (2013). Multinomial and ordinal logistic regression using PROC LOGISTIC. NESUG (NorthEast SAS\* Users Group, Inc.). National Development and Research Institutes, Inc. (En línea). Consultado en marzo de 2013. Obtenido de: <http://www.nesug.org/proceedings/nesug05/an/an2.pdf>
- Franco, M. S., H. Regil G. y J. Ordoñez. (2006). Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. Madera y Bosques, 12(1), 17-28.
- Geist, H., y E. Lambin. (2001). What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub-national case study evidence. Louvain-la-Neuve, Belgium, LUC International Project Office: 116.
- González, G. M. J. (2000). Future scenarios of land use in the California Mojave Desert. Tesis de Doctorado. Universidad de Utah. Logan, Utah. 163 p.

- Geoghegan, J., L. Schneider y C. Vance. (2001). Temporal dynamics and spatial scales: Modeling deforestation in the southern Yucatan peninsular region. *GeoJournal*. 61: 353-363.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2013). Mapa Digital de México v5.0 (Tenencia de la tierra). (En línea). Consultado en abril de 2013. Obtenido de: <http://gaia.inegi.org.mx/mdm5/viewer.html>
- \_\_\_\_\_. (2010a). Red Hidrográfica Escala 1:50000, Edición 2.0. (En línea). Consultado en octubre de 2012. Obtenido de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/Topografia/Descarga.aspx>
- \_\_\_\_\_. (2010b). Censo de Población y Vivienda 2010. Resultados definitivos (En línea). Consultado en abril de 2012. Obtenido de: <http://www.censo2010.org.mx/> (Revisado el 27 de abril de 2012).
- \_\_\_\_\_. (2007). Cartas de Uso del suelo y vegetación (E1402-E1403-F1411-F1412) Escala 1:250000. Serie IV. Aguascalientes, Ags., México.
- \_\_\_\_\_. (2000). Censo de Población y Vivienda 2000. (En línea). Consultado en octubre de 2012. Obtenido de: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2000/default.aspx>
- \_\_\_\_\_. (1999). Conjunto de Datos Vectoriales (E14B13-E14B14-E14B15-E14B23-E14B24-E14B25-E14B33-E14B34-E14B35-F14D83-F14D84-F14D85) de las Cartas topográficas Escala 1:50000. Aguascalientes, Ags., México.
- \_\_\_\_\_. (1995). Ortofotos digitales blanco y negro. Escala 1:20000. Aguascalientes, Ags., México.
- \_\_\_\_\_. (1994). Cartas de Uso del suelo y vegetación (E1402-E1403-F1411-F1412) Escala 1:250000. Serie II. Aguascalientes, Ags., México.
- \_\_\_\_\_. (1986). Cartas de Uso del suelo y vegetación (E1402-E1403-F1411-F1412) Escala 1:250000. Serie I. Aguascalientes, Ags., México.
- Jiménez, M. M. J., M. J. González G. M. Escalona M., J. R. Valdez L. y C. Aguirre S. (2011). Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso de suelo urbano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(3): 389-406.

- Lambin, E., H. Geist and E. Lepers. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28: 205-241.
- Lambin, E., B. L. Turner, H. Geist, S. Agbola, A. Angelsen, J. Bruce, O. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. Richards, H. Skanes, W. Eteffen, G. Stone, U. Svedin, T. Veldkamp, C. Vogel and J. Xu. (2001) The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11: 261-269.
- Lambin, E. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Physical Geography*, 21: 375-393.
- Lesschen, J., P. Verburg and S. Staal. (2005). Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes: In land use and farming systems. LUCC Report Series No. 7. The International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya y LUCC Focus 3 Office, Wageningen University, the Netherlands.
- Machín, H. M. M, y M. Casas V. (2006). Valoración económica de los recursos naturales: Perspectiva a través de los diferentes enfoques de mercado. *Revista Futuros*. 4 (13): 9.
- Mahar, D. and R. Scheneider. (1994). Incentives for tropical deforestation: Some examples from Latin America. *In*: Brown, K. y D. Pearce (eds), *The causes of tropical deforestation*. University College London Press, London, pp. 56-78.
- Mas, J. F., A. Velázquez y S. Couturier. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso de suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental* 1(1): 23-39.
- Mas, J. F., H. Puig, J. L. Palacio y A. Sosa. (2003). Un modelo espacial de riesgo de deforestación. *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte, Brasil, pp. 1357-1363
- Mas, J. F., V. Sorani y R. Álvarez. (1996). Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, número especial 5: 43-57.



- Nelson, A. and K. M Chomitz. (2009). Protected area effectiveness in reducing tropical deforestation, A global analysis of the impact of protection status. Evaluation Brief 7. Washington, D.C.: The World Bank.
- Ochoa, G. S., y M. González E. (2000). Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, México. *Applied Geography*, 20: 17-42.
- Parker, C., A. Mitchell, M. Trivedi, y N. Mardas. (2009). *The Little REDD+ Book*. (2a ed.). Global Canopy Foundation. Oxford, United Kingdom. 136 p.
- Pineda, J. N. B., J. Bosque S., M. Gómez D. y R. Franco P. (2011) Análisis de los factores inductores de los cambios ocurridos en la superficie forestal del Estado de México en el período 1993-2000. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 56: 9-34.
- Pineda, J. N. B., J. Bosque S., M. Gómez D. y W. Plata R. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 69: 33-52.
- Reyes, H., S. Cortina, H. Perales, E. Kauffer y J. Fernández. (2003). Efecto de los subsidios agropecuarios y apoyos gubernamentales sobre la deforestación durante el período 1990-2000 en la región de Calakmul, Campeche, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 51: 88-106.
- SAS. (2002). *The logistic procedures. Getting started with SAS*. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- SDRSOT (Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial). (2013). Información proporcionada por la Dirección Forestal. Puebla, México.
- Serra, P., X. Pons y D. Sauri. (2005). Metodología para el análisis de las transformaciones paisajísticas de áreas rurales mediterráneas. Evolución, causas y consecuencias en el caso del Alto Ampurdán (Noreste de Cataluña). *Anales de Geografía* 25: 259-278.
- SEQC (Sociedad Española de Bioquímica Clínica y Patología Molecular). (2013). Regresión logística (en línea). Consultado en marzo de 2013. Obtenido de:

[http://www.seqc.es/es/Varios/7/40/Modulo\\_3:\\_Regresion\\_logistica\\_y\\_multipl  
e/](http://www.seqc.es/es/Varios/7/40/Modulo_3:_Regresion_logistica_y_multipl_e/)

SMRN (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2007). Diagnóstico Socioeconómico y de Manejo Forestal de la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán. Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan-Zacatlán, A.C. Puebla, México. 281 p.

Soares, F. B., R. Assuncao and A. Pantuzzo. (2002). Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an amazonian colonization frontier. *BioScience*, 51(12): 1059-1067.

Valdez, L. J. R., C. A. Aguirre S. y G. Ángeles P. (2011). Análisis de los cambios en el uso del suelo en la cuenca del Río Metztlán (México) usando imágenes de satélite: 1985-2007. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(3): 313-324.

Velázquez, A. (2008). La dinámica de la cubierta forestal de México. Página de la Sociedad Mexicana de Física (En línea). Consultado el 27 de abril de 2012. Obtenido de: <http://www.smf.mx/C-Global/webCubFor.htm>

Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz G., R. Mayorga S., P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso de la tierra en México. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F. *Gaceta Ecológica* (2): 31-37.

Velázquez, A., J. M. Núñez H., S. A. Couturier y G. Bocco V. (2011). Propuesta metodológica para normar la evaluación de la tasa de deforestación y degradación forestal en México. WWF, CCMSS, TNC, Centro Geo y CIGA UNAM. 25 p.

Vergara, G., y J. Gayoso. (2004). Efecto de factores físico-sociales sobre la degradación del bosque nativo. *Bosque* 25(1): 43-52.

Torres, R. J. M. y R. Flores X. (2001). Deforestation and land use change in Mexico. *J. Sustainable Forestry*, 12(1): 171-191.

## **CAPÍTULO III**

### **IDENTIFICACIÓN DE ZONAS APTAS PARA PROVEER SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS: RECARGA DE ACUÍFEROS**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

El servicio ambiental hidrológico es uno de varios servicios que los ecosistemas proporcionan a la sociedad, y siendo el agua un recurso natural indispensable para toda forma de vida existente en este planeta, la importancia de su conservación se vuelve prioritaria. Sin embargo, la valoración inadecuada de este servicio por la sociedad, a través de acciones de deforestación, degradación de zonas de recarga, contaminación de fuentes de agua y deficiente manejo del recurso, entre otras, pone en riesgo su permanencia, reduciendo la disponibilidad de fuentes de agua para usos múltiples.

El problema anterior se presenta en la zona centro, norte y noreste de México, donde el grado de presión fuerte sobre el recurso hídrico, ha propiciado la sobreexplotación de acuíferos, y específicamente para el estado de Puebla, las zonas de Tecamachalco, Palmar del Bravo y Tehuacán se encuentran bajo esta condición (CONAGUA, 2011). La sobreexplotación de acuíferos es una condición que requiere de acciones obligadas e inmediatas para su protección y rehabilitación, como es el establecimiento de zonas de veda que restringen el aprovechamiento de este líquido vital.

Para el caso de la UMAFOR Zacatlán, la situación no ha llegado a la condición de acuíferos sobreexplotados, pero como lo reporta el Estudio Regional Forestal (SMRN, 2007), sí ha sido notoria la disminución de caudales de ríos y disponibilidad de agua en manantiales y pozos. Se considera que esta situación es consecuencia del desconocimiento de las zonas donde principalmente se está efectuando la recarga hídrica, lo que conlleva a que existan procesos de deforestación, degradación y fragmentación de las mismas (SMRN, 2007). Por ello, es necesario que tanto los poseedores de recursos naturales, como

tomadores de decisiones en este ámbito y población en general, ubiquen las zonas que revisten importancia por su aporte a la recarga y mantenimiento de este líquido, con la finalidad de prevenir y detener procesos de deterioro de estas zonas, evitando llegar a medidas extremas que limiten su uso.

Existen diferentes metodologías para estudiar zonas de recarga de acuíferos, entre las cuales se mencionan: (1) Balance hídrico, que cuantifica a la recarga subterránea como el residual de otros flujos en su ecuación general (recarga potencial = precipitación – escorrentía – evapotranspiración - cambios en el almacenamiento) (Ruíz, 2012), aunque no necesariamente es usada en la determinación de zonas de recarga (Schosinsky y Losilla, 2000; Carrica y Lexow; 2004; Sophocleous, 2004; Pérez *et al.*, 2006; Schosinsky, 2006; García *et al.*, 2007; Monterroso *et al.*, 2009); (2) Método APLIS, el cual fue diseñado originalmente para acuíferos carbonatados, combina capas de información de las variables Altitud, Pendiente, Litología, formas de Infiltración y Suelos mediante Sistemas de Información Geográfica (Andreo *et al.*, 2004; Núñez *et al.*, 2006); (3) Otras, que se enfocan más en la ubicación espacial de zonas potenciales para recarga hídrica (Granados, 2005; Cruz y Salinas, 2006; Matus *et al.*, 2009; Kumar y Kumar, 2011) mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y la combinación de diversos factores que influyen en el proceso de recarga.

Por lo anterior, el presente capítulo de la investigación de tesis se enfocó a la determinación y ubicación espacial de zonas con aptitud para recarga hídrica subterránea en la UMAFOR Zacatlán, Puebla; mediante la integración de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), que implican un análisis espacial más detallado que las mencionadas anteriormente.

En este sentido, la integración de métodos de EMC y SIG genera una valiosa herramienta de apoyo en procesos de análisis espacial a través del modelado, en particular para la asignación/localización de actividades, gestión de recursos naturales, control del riesgo y la contaminación ambiental y, en general, para la ordenación del territorio (Gómez y Barredo, 2006). Aún con esto, existen pocos

estudios (Sánchez *et al.*, 2004; Achinelli *et al.*, 2010; Martínez *et al.*, 2010) que utilizan la integración de estas dos herramientas en la identificación de áreas potenciales para recarga hídrica, por lo que la presente investigación pretende ser una aportación en este aspecto, a través de los objetivos siguientes:

### **3.2. OBJETIVOS**

- a) Definir los criterios y subcriterios del medio biofísico que intervienen en el proceso de recarga hídrica subterránea en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.
- b) Identificar espacialmente áreas con aptitud para la recarga hídrica subterránea, que permitan implementar estrategias adecuadas para un manejo sostenible de las mismas.

### **3.3. MÉTODOS Y MATERIALES**

La identificación de áreas con aptitud para proveer servicios ambientales hidrológicos en la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán, se realizó mediante la integración de técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica; llevando a cabo, de manera general, el procedimiento esquematizado en la Figura 3.1, el cual se describe a continuación:

**1. Definición del objetivo o actividad.** Este paso se realizó mediante el análisis del diagnóstico realizado en la zona de estudio (SMRN, 2007), donde se señala que por procesos de deforestación y degradación, se están perdiendo y fragmentando ecosistemas forestales importantes, disminuyendo la cantidad y calidad de agua de ríos, manantiales y pozos de la región. Con base en esta situación, se optó por acotar el objetivo de servicios hidrológicos a la identificación de zonas aptas de recarga hídrica subterránea o recarga de acuíferos.

Se denomina recarga de acuíferos a la infiltración del agua del suelo que alcanza el nivel freático, alimentando los depósitos de agua subterránea (Matus *et al.*,

2009; Sánchez *et al.*, 2003; Sophocleous; 2004). El área donde ocurre la recarga se llama zona de recarga y son sitios donde la capacidad de infiltración es alta, siendo importante su identificación y ubicación espacial, a través del conocimiento de las características o factores del medio biofísico que facilitan o limitan este proceso de infiltración (INAB, 2003; Matus *et al.*, 2009).

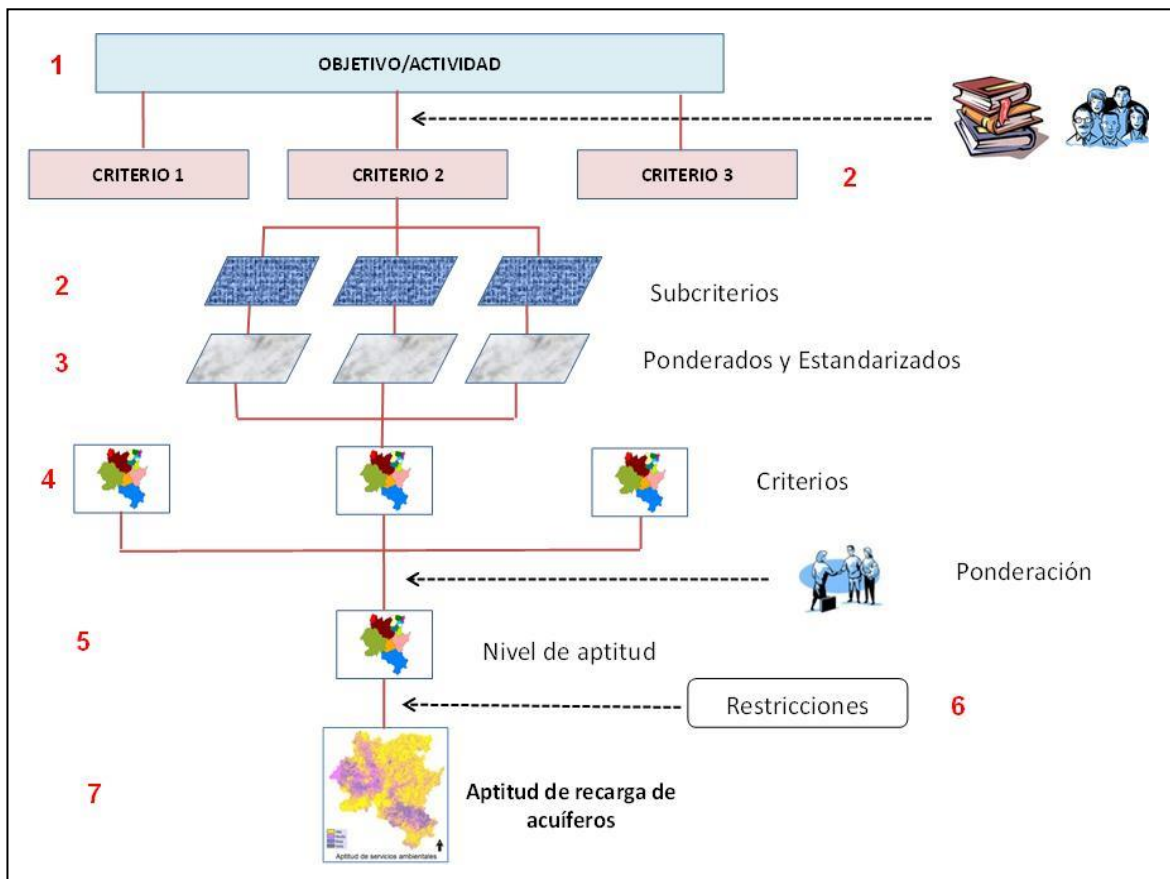


Figura 3.1. Esquema metodológico para identificar áreas con aptitud para proveer servicios ambientales hidrológicos.

**2. Definición de criterios y subcriterios.** Definido el objetivo, se procedió a identificar los factores que condicionan la recarga de un acuífero. En este sentido, diversos autores (Schosinsky y Losilla, 2000; INAB, 2003; Sophocleous, 2004; Sukia *et al.*, 2009) mencionan que éstos pueden ser de carácter geológico, edáfico, climático, de ocupación del suelo, morfológico, topográfico, de calidad del agua disponible, del costo del agua, administrativos y legales, entre otros.

Por tanto, mediante revisión de literatura de estudios similares (Cruz y Salinas, 2006; Matus *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2010; Kumar y Kumar, 2011), y de acuerdo a la información espacial disponible para el área de estudio, se definieron los criterios y subcriterios mostrados en el Cuadro 3.1, recopilando y conformando la base de datos cartográfica correspondiente en formato raster mediante el uso de ArcGis v10.

Cuadro 3.1. Criterios y subcriterios seleccionados para definir la aptitud de recarga de acuíferos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Criterio	Subcriterio	Unidad de medida	Fuente
Cobertura vegetal	Vegetación y uso del suelo	Categórica: 0 a 5	Elaboración propia mediante clasificación de imágenes Landsat TM 2010
Geología	Clases de rocas	Categórica: 0 a 3	INEGI (1989)
Topografía	Pendiente	Continua: Porcentaje	Elaboración propia con base al MDE (ver Capítulo 2.3.1)
Suelo	Textura	Categórica: 0 a 3	INIFAP y CONABIO (1995)
Clima	Precipitación Media Anual	Continua: Milímetros	CONABIO ( 2008)
	Evapotranspiración Real	Continua: Milímetros	CONABIO (2003)

**3. Valoración de clases y estandarización de subcriterios.** Debido a las escalas diferentes en las cuales se miden los subcriterios, es necesario resolver dos cuestiones: (a) Establecer rangos o clases para cada uno de los subcriterios y asignarles un valor de aptitud (muy baja a muy alta) respecto al objetivo en estudio; y (b) estandarizar los valores de cada clase para cada uno de los subcriterios, de tal manera que la combinación de los diferentes factores se realice sobre escalas comparables.

Para el primer caso (a), Gómez y Barredo (2006) mencionan que la asignación de valores puede estar basada en aspectos como: Trabajos previos, clasificaciones establecidas para ciertos criterios, análisis de acontecimientos previos en el área

de estudio y entrevistas con expertos y otras fuentes. Para la presente investigación, este proceso se basó en la revisión de trabajos previos y en las características inherentes de cada subcriterio al aporte de mayor o menor capacidad de infiltración de agua, así como a las particularidades del área de estudio.

Para el segundo caso (b), y con la finalidad de estandarizar los valores de todos los subcriterios en un rango de 0 a 255, se realizó una estandarización proporcional a la aptitud de cada clase por subcriterio (muy baja a muy alta), dividiendo cada uno de los valores de cada clase por el máximo de ellos (Voogd, 1983) y multiplicando por 255, proceso que se completó mediante la reclasificación de los mapas de subcriterios en el programa IDRISI Andes (Clark Labs, 2006).

**4. Ponderación de criterios y subcriterios.** Al contar con los mapas de subcriterios estandarizados, el paso siguiente fue la asignación de un valor de ponderación que representa la contribución de cada subcriterio y criterio al cumplimiento del objetivo de recarga de acuíferos. Esta ponderación se realizó mediante la técnica de comparaciones pareadas (Saaty, 1980) en el contexto del Proceso Analítico Jerarquizado (PAJ) de Evaluación Multicriterio (Malczewski, 1999).

La técnica de comparación por pares, parte de establecer una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de criterios o subcriterios a ponderar, así se establece una matriz en la cual se compara la importancia de cada criterio sobre cada uno de los demás; posteriormente, se determina el “eigenvector” principal, el cual establece los pesos de los criterios (valores de ponderación), y el “eigenvalor” máximo que proporciona un Índice de Consistencia (IC) como una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de criterios (Saaty, 1980).



El valor definitivo a observar para determinar la consistencia de las matrices, es la Razón de Consistencia (RC) que se establece a partir del cociente entre el valor del IC y un Índice Aleatorio ya establecido (Saaty, 1980); de tal manera que para valores de  $RC \geq 0.10$ , los juicios de valor deben ser revisados ya que no son lo suficientemente consistentes para establecer los pesos de los criterios, en cambio una  $RC < 0.10$  indica consistencia aceptable en la matriz (Malczewski, 1999).

Para la obtención de la ponderación de los criterios y subcriterios considerados en esta investigación, se diseñó y aplicó una encuesta (Anexo 3.1) de manera directa a 13 profesionales relacionados con el tema de estudio (recarga de acuíferos), verificando en cada caso, la RC de cada matriz contestada. Cada encuesta contenía dos matrices, una para ponderar los criterios considerados (clima, suelo, topografía, geología y cobertura vegetal), y otra para ponderar los subcriterios (precipitación media anual y evapotranspiración real) del criterio clima. La técnica utilizada no requiere que las encuestas sean aplicadas a una muestra obtenida estadísticamente, ya que sólo se busca la opinión de expertos en el tema de estudio para construir la matriz definitiva, que en todo caso podría realizarse a través de talleres o paneles de expertos.

De las matrices correspondientes a los criterios, se obtuvo un valor promedio para cada celda por encima de la diagonal de celdas con valor de 1, constituyendo una matriz final de comparación de criterios, verificando nuevamente su RC, obteniendo de esta manera, los valores definitivos de importancia o prioridad relativa para cada criterio utilizado en este estudio, considerando la opinión de los expertos en el tema.

Para el caso de los subcriterios, al ser una matriz de dos elementos no es necesario obtener la RC, por lo que solamente se realizó un promedio de los valores asignados en cada matriz, para obtener los valores definitivos de ponderación de cada subcriterio. Estos procedimientos fueron realizados mediante la opción Weigth del Módulo Decisión Support de IDRISI Andes (Clark Labs, 2006).

**5. Evaluación o regla de decisión.** En esta etapa del proceso, primero se combinaron los mapas de subcriterios estandarizados y ponderados para obtener los mapas de criterios, actividad que sólo se realizó con los subcriterios de clima, ya que los otros subcriterios representan por si mismos los mapas de criterios estandarizados.

Posteriormente, al tener todos los mapas de criterios estandarizados (clima, suelo, topografía, geología y cobertura vegetal) y con la información de su ponderación derivada del análisis de las encuestas aplicadas a expertos, estos criterios se combinaron para obtener un mapa preliminar de aptitud del terreno.

Para lo anterior, se utilizó la técnica de Combinación Lineal Ponderada (Weighted Linear Combination-WLC) integrada en el módulo MCE de IDRISI Andes (Clark Labs, 2006), la cual multiplica cada mapa de criterios (cada celda raster dentro de cada mapa) por su correspondiente ponderación y luego suma los resultados (Eastman, 2006; Gómez y Barredo, 2006).

**6. Restricciones.** Las restricciones consideradas en este estudio para ubicar las áreas no adecuadas para la recarga de acuíferos fueron: Usos del suelo Residencial y de Cuerpos de agua, obtenidos mediante la clasificación de imágenes satelitales (ver Capítulo 2.4.1). La técnica WLC en el módulo MCE permitió incluir el mapa de restricciones, obteniendo en un solo procedimiento el mapa de aptitud final para recarga de acuíferos.

**7. Gradientes de Aptitud Final.** El mapa de aptitud final es el que muestra las áreas aptas para recarga de acuíferos en el mismo intervalo de valores que el de los mapas de criterios usados (0 a 255), donde el valor más alto (255) representa la mayor aptitud para el objetivo dado, y el valor más bajo (0) representa una aptitud nula para el objetivo de recarga de acuíferos. Por tal motivo, se consideró necesario realizar una reclasificación de los valores mostrados en el mapa de aptitud final, para obtener un mapa de gradientes de aptitud.

Este proceso se realizó en IDRISI Andes (Clark Labs, 2006) mediante la reclasificación del mapa de aptitud final en cuatro clases de aptitud: Alta (de 160 a 255), media (de 100 a 160), baja (de 60 a 100) y nula (de 0 a 60).

### **3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.4.1. Principales factores biofísicos para la recarga de acuíferos**

Se encontró que los principales factores del medio biofísico que determinan la recarga hídrica subterránea en la UMAFOR Zacatlán, son: (a) cobertura vegetal, (b) topografía, (c) clima, (d) suelo, y e) geología.

A continuación se describe de manera general cada uno de ellos, así como también se muestran los valores de estandarización asignados de acuerdo a su posibilidad de recarga. Su visualización espacial se muestra en la Figura 3.2.

##### **(a) Cobertura vegetal: Usos del suelo y tipos de vegetación**

Por los distintos usos y aprovechamientos que se le puede adjudicar, la cobertura vegetal es uno de los elementos más cambiantes y con mayor influencia de la actividad humana (Matus *et al.*, 2009). Su uso inadecuado puede disminuir la posibilidad de recarga de un área determinada, por ello es necesario identificar los tipos de coberturas, que por sus características, favorecen la infiltración del agua, otorgándoles una importancia más elevada que a aquellos que limitan este proceso.

Cuadro 3.2. Potencial de la cobertura vegetal para la recarga hídrica en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Tipo de vegetación/Uso del suelo	Coberturas que se incluyen	Posibilidad de recarga	Clase	Estandarización
Bosque Mesófilo de Montaña/Bosque Encino	Bosque mesófilo, bosque de encino, vegetación secundaria y sistemas agroforestales (cafetales)	Muy alta	5	255
Bosque de Coníferas/Latifoliadas	Bosque de pino, de abies, de juniperus, de pino-encino, sus diferentes asociaciones y vegetación secundaria.	Alta	4	204
Matorrales	Matorral desértico rosetófilo, y espacios abiertos de otros tipos de vegetación.	Moderada	3	153
Pecuario	Pastizales con cobertura permanente y zonas en descanso con vegetación herbácea.	Baja	2	102
Agrícola/Suelo desnudo	Cultivos agrícolas temporales y suelo desnudo.	Muy baja	1	51

Fuente: Elaboración propia.

El criterio de cobertura vegetal se consideró como los distintos tipos de cubierta vegetal existentes en el área de estudio, agrupándose por sus características y la manera en que influyen a la recarga de acuíferos, en tipos de vegetación generales y usos de suelo (Cuadro 3.2), asignándoles de acuerdo a su posibilidad de recarga, su valor de estandarización, donde el valor más alto implica mayor posibilidad de recarga.

#### (b) Topografía: Pendiente

La topografía es la configuración física de la superficie de la tierra, integrándose por superficies planas, cóncavas y convexas a través de las cuales el agua se mueve dispersándose en distintas direcciones (UNESCO, 1986). Por tanto, es un criterio básico al delimitar zonas para recarga hídrica, y en esta investigación se consideró para representar a este criterio, a la pendiente del terreno.

La pendiente está directamente relacionada con la escorrentía superficial. En sitios con pendientes suaves, el agua se mueve lentamente y permanece por más tiempo en contacto con el suelo, lo que favorece el proceso de infiltración; caso contrario ocurre en terrenos con pendientes fuertes (Matus *et al.*, 2009).

En la UMAFOR Zacatlán existen pendientes que van desde 0%, terrenos planos cuyo uso principal es el agrícola, hasta más de 300%, y diversas cañadas distribuidas en toda el área de estudio. Con base en recorridos de campo y visualización en ArcGIS v10 (ESRI, 2011) para diferentes intervalos de pendiente, se clasificó a este criterio como se muestra en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Posibilidad de recarga hídrica para el criterio de topografía en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Micro-relieve	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Clase	Estandarización
Plano a casi plano	0-6	Muy alta	5	255
Moderadamente ondulado	6-15	Alta	4	204
Ondulado/cóncavo	15-45	Moderada	3	153
Escarpado	45-65	Baja	2	102
Fuertemente escarpado	> 65	Muy baja	1	51

Fuente: Matus *et al.*, 2009)

#### (c) Clima: Precipitación media anual (PMA) y Evapotranspiración real (EVR)

En este estudio, el clima se considera uno de los criterios más importantes en el proceso de recarga hídrica subterránea; debido a que las procedencias de esa recarga son principalmente debido a la infiltración de la lluvia, pudiendo existir infiltración de las aguas superficiales (en sitios poco lluviosos) y transferencia de agua desde otros acuíferos (Custodio, 1998).

Dentro del criterio clima, se considera que los factores que afectan la recarga hídrica son, la evapotranspiración (debido a las pérdidas de agua por evaporación y transpiración de las plantas) y la precipitación pluvial (INAB, 2003). La UMAFOR

Zacatlán presenta un intervalo de precipitación media anual que va desde 600 a 4000 mm, existiendo mayor posibilidad de recarga donde mayor precipitación hay. Por el contrario, donde mayor evapotranspiración real existe, la posibilidad de recarga disminuye por las pérdidas de agua debido a este proceso; el área de estudio presenta un intervalo de evapotranspiración real que va de 400 a 900 mm (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Posibilidad de recarga hídrica según los subcriterios de clima, para la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

PMA (mm)	Potencial de recarga	Clase	Estandarización	EVR (mm)	Posibilidad de recarga	Estandarización
>2500	Muy alta	5	255	400-500	Muy alta	255
2000-2500	Alta	4	204	500-600	Alta	204
1200-2000	Moderada	3	153	600-700	Moderada	153
800-1200	Baja	2	102	700-800	Baja	102
<800	Muy baja	1	51	800-900	Muy baja	51

PMA= Precipitación media anual; EVR= Evaporación real. Fuente: Elaboración propia.

#### (d) Suelo: Textura

Dentro de las propiedades del suelo, es importante conocer y entender cuáles son las que pueden favorecer o limitar la recarga de acuíferos. En este sentido Matus *et al.* (2009) mencionan a la textura, porosidad y contenido de materia orgánica.

Para el presente estudio, se consideró a la textura como una de las propiedades que más influyen en el proceso de infiltración de agua, siendo que en suelos con textura gruesa se dan buenos niveles de recarga hídrica; por el contrario, suelos con textura fina, como los arcillosos y compactos dificultan la recarga hídrica. La UMAFOR Zacatlán presenta los tres niveles diferentes de textura (gruesa, media y fina), por lo que se les asignó el valor correspondiente de estandarización (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Posibilidad de recarga hídrica del suelo según su textura, en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Textura	Posibilidad de recarga	Clase	Estandarización
Gruesa (arenosos)	Alta	5	255
Media (francos)	Moderada	3	153
Fina (arcillosos)	Baja	1	51

Fuente: Elaboración propia

(e) Geología: Clases de rocas

El estrato geológico fue otro de los criterios considerados en este estudio, éste permite determinar si la recarga es subsuperficial o profunda. Puede existir una zona con las mayores posibilidades de recarga para los anteriores criterios, pero si el estrato geológico es material rocoso que no permite el paso del agua, no habrá recarga hídrica subterránea, sino que se formará un flujo de agua subsuperficial, con movimiento horizontal que saldrá a la superficie a través de un manantial o alimentará a un río (INAB, 2003).

El tipo de rocas que existen en la UMAFOR Zacatlán se muestran en el Cuadro 3.6, así como su respectivo valor de estandarización acorde a su posibilidad de recarga hídrica, según las clasificaciones de permeabilidad que ofrecen diversos autores (Custodio y Llamas, 1976; Meléndez y Fuster, 1978; INAB, 2003).

Cuadro 3.6. Posibilidad de recarga hídrica del estrato geológico en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Entidad/Clase	Tipo de roca	Posibilidad de recarga	Clase	Estandarización
Suelo	Aluvión	Alta	5	255
Sedimentaria	Brecha sedimentaria, caliza, caliza-lutita, conglomerado, limolita-arenisca y lutita.	Moderada	3	153
Ígnea extrusiva	Andesita, basalto, brecha volcánica básica, dacita, diorita, riodacita, riolita, toba ácida, tonalita y volcanoclástico.	Baja	1	51

Fuente: Elaboración propia

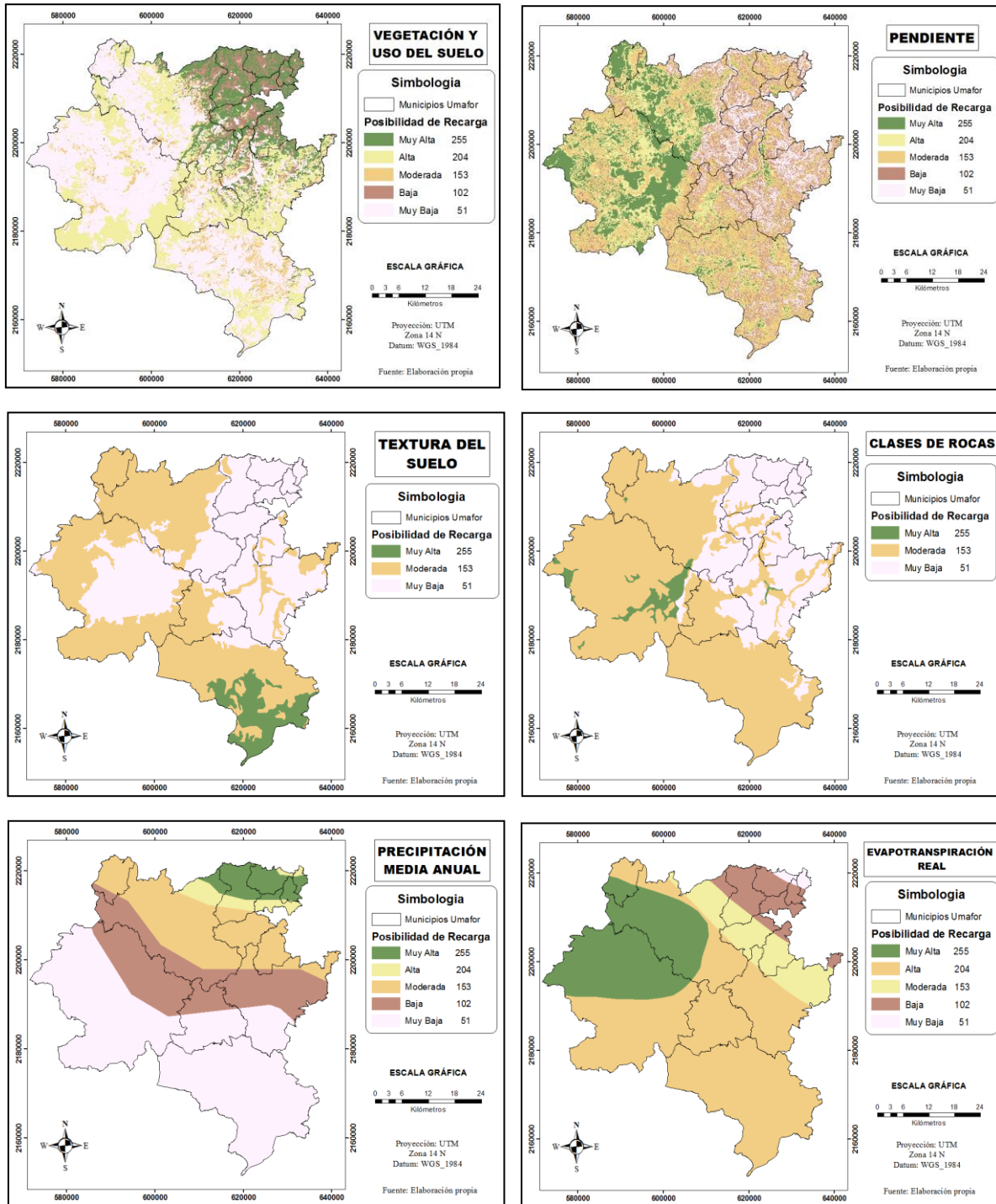


Figura 3.2. Factores biofísicos que condicionan la posibilidad de recarga hídrica subterránea en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.



Como resultado de las encuestas aplicadas, se obtuvo que la mayoría de los expertos concuerdan en que los cinco criterios descritos anteriormente y utilizados en la presente investigación, son los factores biofísicos básicos que definen la recarga hídrica subterránea; sin embargo, también coinciden en que existen otros subcriterios que son importantes para la definición de áreas aptas para la recarga de acuíferos (Cuadro 3.7). Las razones de que no fueran considerados en la presente investigación, son básicamente por acotamiento en tiempos, dado que varios de ellos requieren de su elaboración o actualización para el área de estudio.

**Cuadro 3.7. Otros subcriterios que deben considerarse para la definición de áreas con aptitud para la recarga de acuíferos**

<b>Criterio</b>	<b>Subcriterios</b>
Cobertura vegetal	Estratos de vegetación, composición de especies, porcentaje de cobertura vegetal, prácticas de manejo forestal, agrícolas y pecuarias.
Topografía	Altitud, exposición, forma del relieve (cóncava, convexa, etc).
Clima	Intensidad de la lluvia, períodos de lluvia, vientos, temperatura, radiación solar, humedad relativa.
Suelo	Profundidad, pedregosidad, estructura, materia orgánica.
Geología	Fallas y fracturas, contenido mineral de las rocas.

Algunos de estos subcriterios son utilizados principalmente en investigaciones bajo el método de balance hídrico, dado que su obtención inmediata en formato espacial es complicada; por lo que su elaboración a nivel local o regional se vuelve necesaria si se pretenden utilizar en la zonificación espacial de áreas aptas para recarga hídrica.

Por otro lado, algunos subcriterios pueden incurrir en correlaciones muy elevadas entre sí, por lo que la utilización de los mismos debe hacerse con cuidado extremo para no sobrestimar valores de un mismo criterio a través de sus subcriterios, situación que Gómez y Barredo (2006) y Eastman (2006) señalan en el apartado de selección de criterios dentro del proceso de Evaluación Multicriterio.

Así también, es importante tener en cuenta que cada objetivo planteado al inicio del procedimiento, tiene sus propios factores y restricciones, así como sus valores de ponderación; por lo que la definición del objetivo y la elección de sus factores se vuelven cruciales para la obtención de resultados aceptables.

Se considera que una limitante en este procedimiento, es que la información requerida de factores debe estar en formato espacial y georreferenciada, lo que puede llegar a limitar la inclusión de todos los que pudieran ser necesarios. Para ello, se debe realizar una buena recopilación de criterios y generar, si es posible, la información que pudiera estar faltando o cuya escala es muy grande y es posible mejorarla. Finalmente, recordar que son modelos, y que sus resultados estarán en función de la calidad de la información que se use.

#### **3.4.2. Mapa de gradientes de aptitud para la recarga de acuíferos**

Derivado de las encuestas aplicadas a expertos en el tema, se obtuvo al criterio clima como el más importante para el proceso de recarga hídrica, ya que pueden existir las condiciones de suelo, cobertura vegetal, topografía y geología, pero si no hay precipitación en la zona, nada se infiltrará. Bajo este mismo razonamiento, el siguiente criterio considerado como importante fue la geología, donde para que exista recarga subterránea se requiere de un estrato geológico que permita el paso del agua.

Por tanto, la ponderación de cada criterio mostrado en el Cuadro 3.8 reflejan la importancia de su influencia a la recarga hídrica subterránea, siendo el resultado de la ponderación promedio de las encuestas realizadas; a través de los cuales se obtuvo la zonificación de áreas aptas para la recarga de acuíferos en la UMAFOR Zacatlán (Figura 3.3).

Cuadro 3.8. Ponderación de criterios y subcriterios para recarga de acuíferos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Criterio	Subcriterio	Ponderación de subcriterios	Ponderación de criterios
Clima	Precipitación media anual	0.70	0.28
	Evapotranspiración real	0.30	
Geología	Clases de rocas	-	0.22
Cobertura vegetal	Vegetación y usos del suelo	-	0.19
Suelo	Textura	-	0.19
Topografía	Pendiente	-	0.12

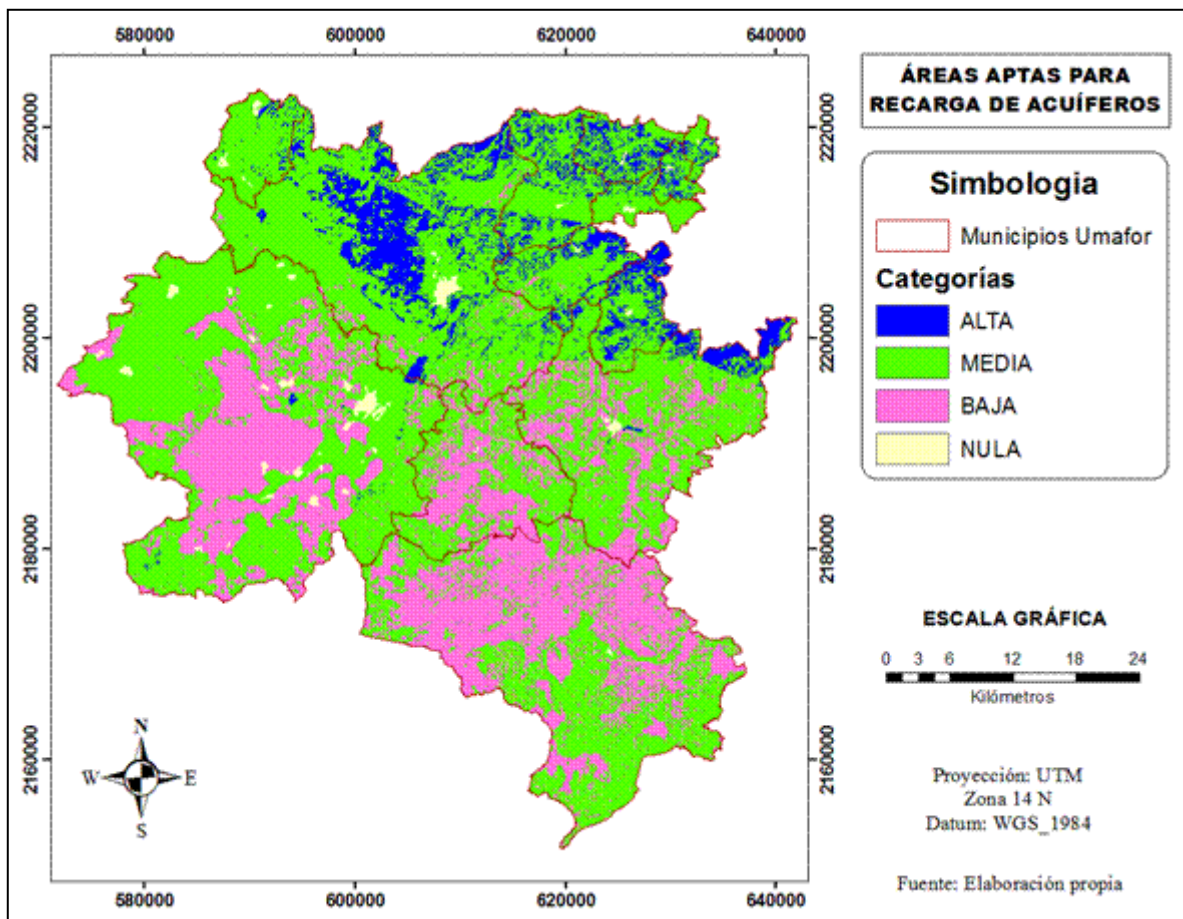


Figura 3.3. Ubicación espacial de zonas con aptitud para recarga de acuíferos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Por sus características biofísicas, en la UMAFOR Zacatlán predominan las áreas con aptitud media o moderada para la recarga de acuíferos, ya que ocupan una superficie de 169,995.01 ha que corresponde al 63.19% de la superficie total de la UMAFOR. Le sigue la superficie con aptitud baja (75,100.09 ha) con un 27.92% del total, y la aptitud alta (21,315.35 ha) que cubre un 7.92% de la superficie total del área de estudio. De manera general, el territorio de la UMAFOR Zacatlán se clasifica con buena aptitud para que ocurra la recarga hídrica subterránea, ya que la cantidad de agua que se precipita y queda disponible, tiene de moderadas a altas posibilidades de que se infiltre y recargue los acuíferos de la región. La distribución de superficies de áreas aptas por municipio se presenta en el Cuadro 3.9.

Cuadro 3.9. Superficies y porcentajes de áreas aptas para la recarga hídrica respecto a la superficie de cada municipio de la UMAFOR Zacatlán.

Municipio	Superficie total (ha)	Aptitud alta		Aptitud media		Aptitud baja	
		ha	%	ha	%	ha	%
Ahuacatlán	9,129.78	1,958.15	21.45	7,143.17	78.24	3.56	0.04
Ahuazotepec	6,069.97	315.64	5.20	5,580.45	91.94	0.00	0.00
Amixtlán	4,449.82	1,401.28	31.49	3,015.29	67.76	0.00	0.00
Aquixtla	16,672.54	0.00	0.00	9,218.78	55.29	7,442.70	44.64
Camocuautla	1,616.34	485.65	30.05	1,109.18	68.62	0.00	0.00
Chignahuapan	75,922.90	190.37	0.25	47,839.85	63.01	26,492.41	34.89
Coatepec	1,225.36	245.83	20.06	964.91	78.75	0.00	0.00
Cuautempan	6,131.66	2,294.17	37.42	3,752.07	61.19	48.37	0.79
Ixtacamaxtitlán	56,083.06	0.12	0.00	25,628.41	45.70	30,340.88	54.10
Tepango	2,871.76	226.41	7.88	2,573.75	89.62	0.00	0.00
Tepetzintla	7,089.24	1,637.96	23.10	5,324.33	75.10	103.89	1.47
Tetela	32,845.13	2,180.82	6.64	21,659.29	65.94	8,819.06	26.85
Zacatlán	48,894.69	10,378.93	21.23	36,185.52	74.01	1,849.23	3.78

Las zonas con aptitud alta se distribuyen en la parte norte y noreste de la UMAFOR Zacatlán, abarcando parte de los municipios de Zacatlán, Ahuacatlán, Amixtlán, Camocuautla, Coatepec, Tepetzintla, Cuautempan y Tetela de Ocampo. De éstos, los que presentan mayor porcentaje de superficie con aptitud alta, respecto a su superficie total son Cuautempan (37.42%), Amixtlán (31.49%) y Camocuautla (30.05%); aunque Zacatlán es el que abarca la superficie mayor (10,378.93 ha) del total de la superficie con aptitud alta (Cuadro 3.8). Estos municipios, y específicamente las zonas con aptitud alta, se caracterizan por presentar bosque mesófilo de montaña, sistemas agroforestales, bosque de encino y bosque de pino.

El Estudio Regional Forestal (SRMN, 2007) señala que la disminución de caudales en ríos, manantiales y pozos se hace más notoria en los meses de abril y mayo, en los municipios de Tetela de Ocampo, Chignahuapan, Amixtlán, Aquixtla e Ixtacamaxtitlán. En este sentido, sólo el municipio de Amixtlán y una pequeña porción de Tetela de Ocampo, presentaron áreas con aptitud alta para la recarga hídrica subterránea, por lo que la conservación de las mismas se vuelve prioritaria.

Las zonas con aptitud media se distribuyen en todos los municipios de la UMAFOR Zacatlán, ocupando los porcentajes más altos con respecto a la superficie total de cada municipio, excepto por Ixtacamaxtitlán cuya superficie de aptitud baja supera las otras dos categorías (Cuadro 3.8). Las condiciones de los factores biofísicos (clima, geología, cobertura vegetal, topografía, suelos) son muy diversas en cada uno de estos municipios, pero al obtener la categoría de aptitud media indica que existe la posibilidad de aumentar la capacidad de infiltración y retención de agua en estas zonas, a través del mejoramiento de las condiciones de los factores biofísicos que pueden ser modificados, como la cobertura vegetal y el suelo.

Las zonas con aptitud baja se localizan en los municipios de Chignahuapan, Aquixtla, Tetela de Ocampo e Ixtacamaxtitlán, donde existe un mayor desarrollo

de áreas agrícolas extensas, así como tipos de vegetación de matorral o de bosque abierto y registro de precipitaciones bajas, lo que limita la recarga de acuíferos. Estos mismos municipios, presentan escasez de agua (SMRN, 2007), es por ello que se vuelve necesaria la implementación de estrategias que mejoren las condiciones de estas áreas. De esta manera, municipios como Ixtacamaxtlán y Chignahuapan que presentan condiciones favorables para la recarga hídrica por las características intrínsecas de los factores de geología o suelos, pueden mejorar su capacidad de recarga a través de acciones (reforestaciones, obras de conservación de suelos, mejores prácticas de manejo agropecuarias, etc.) que aumenten el potencial de los otros factores, para este objetivo en particular.

Respecto a los aprovechamientos de agua registrados para la UMAFOR Zacatlán (Figura 3.4), se tienen un total de 38 aprovechamientos subterráneos (pozos) con profundidades de extracción que van de 7 a 200 m y un volumen concesionado total de 4,322,725.00 Mm<sup>3</sup>; un total de 60 aprovechamientos superficiales (49 manantiales, 4 de arroyos y 7 de ríos) con un volumen concesionado total de 2,836,371.70 Mm<sup>3</sup>. El destino del agua de estos aprovechamientos es para uso agrícola, público urbano, doméstico, pecuario, industrial y acuacultura (CONAGUA, 2013).

Como se observa en la Figura 3.4, existen zonas de aptitud alta que no registran muchos aprovechamientos subterráneos dentro del área de estudio, como es el caso de los municipios de la parte noreste de la UMAFOR Zacatlán; y que al presentar un potencial alto para la recarga hídrica, las convierte en áreas importantes que se deben conservar y manejar adecuadamente como reservorios de agua para un futuro próximo, o en áreas que se deben proteger dado que abastecen este líquido vital a otros municipios colindantes de la UMAFOR. Así también, la presencia de varios aprovechamientos subterráneos en zonas con aptitud alta, como el caso del municipio de Zacatlán, indica la importancia de estas zonas de recarga en la provisión permanente del recurso agua.

Por otro lado, las zonas con aptitud alta aseguran una provisión continua de agua en manantiales (Figura 3.4), dado que los mismos son la salida natural de agua de un acuífero a la superficie terrestre en un punto localizado (INAB, 2003; Rebollo, 2013). Es importante resaltar también, que muchos de los aprovechamientos, tanto subterráneos como superficiales, se localizan en zonas con aptitud media para la recarga hídrica, por lo que la protección y el mejoramiento de las condiciones de estas áreas, a través de estrategias de manejo, se considera necesaria.

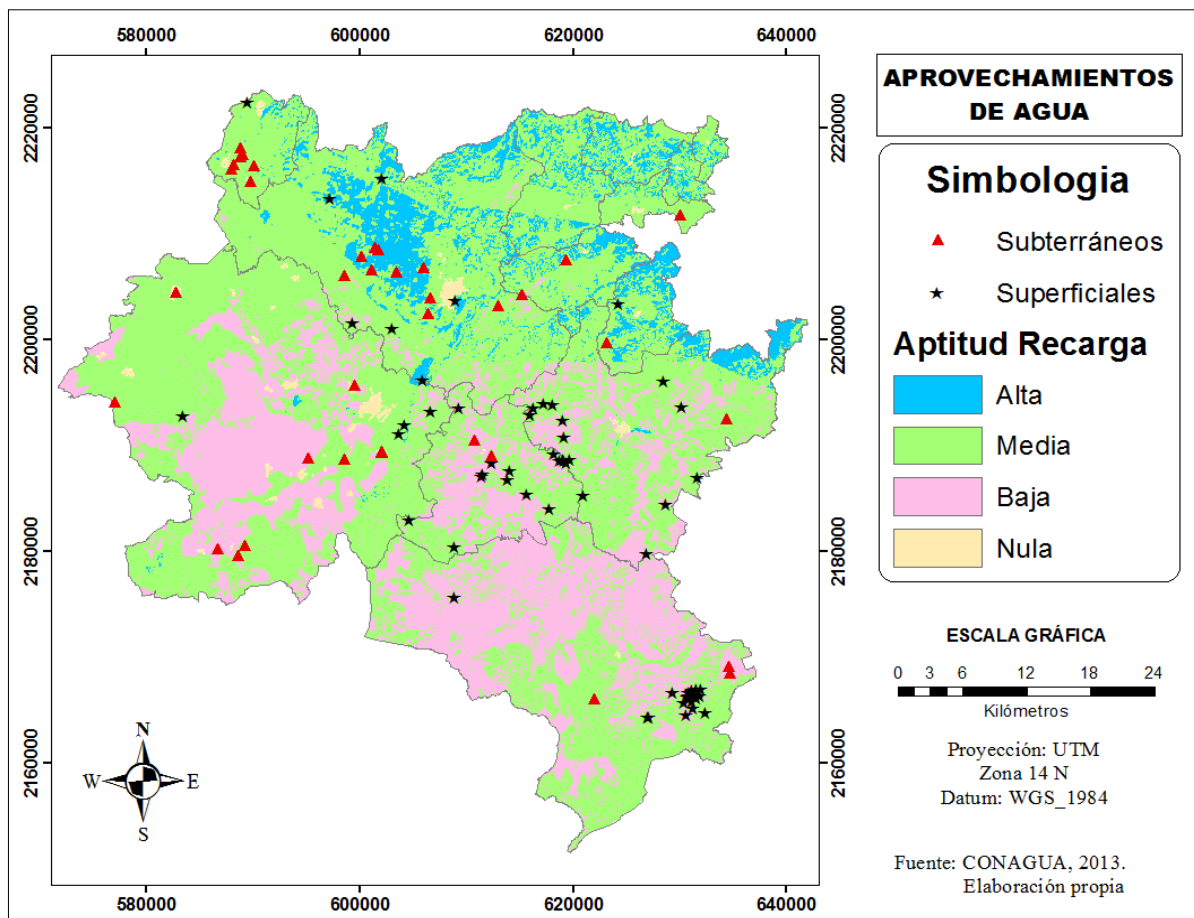


Figura 3.4. Aprovechamientos subterráneos y superficiales de agua en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Con base en lo anterior, en el Cuadro 3.10 se mencionan algunas estrategias generales que pueden considerarse para el manejo, por categoría, de las áreas aptas para recarga hídrica subterránea identificadas en la UMAFOR Zacatlán; así

también se mencionan las que deben instrumentarse para todas las áreas aptas, sin importar su categoría.

Cuadro 3.10. Estrategias propuestas para implementar en las áreas aptas para recarga hídrica subterránea de la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Nivel de Aptitud	Superficie (ha)	Estrategias
Alta	21,315.35	<p>Promover su conservación, a través del pago de servicios hidrológicos y la canalización de apoyos de organizaciones enfocadas a la conservación.</p> <p>Mejores prácticas de manejo en sistemas agroforestales.</p> <p>Regulación y control de las actividades productivas a desarrollarse en estas áreas.</p>
Media	169,995.01	<p>Reconversión de áreas agrícolas y pecuarias a forestales o sistemas agroforestales.</p> <p>Restauración de zonas degradadas y fragmentadas.</p> <p>Establecimiento de obras de conservación de suelo y agua.</p> <p>Manejo y conservación de sistemas agroforestales ya existentes.</p>
Baja	75,100.09	<p>Mejores prácticas agrícolas y pecuarias, como: Rotación de cultivos, de praderas, uso de abonos verdes, asociación de cultivos.</p> <p>Fomento al establecimiento de sistemas agroforestales.</p> <p>Obras de conservación de suelo y agua.</p> <p>Reconversión de áreas agrícolas y pecuarias a forestales, a través de reforestaciones, plantaciones o sistemas agroforestales.</p>
<b>Aplicables a todas las categorías</b>		
<p>Promover la inclusión de estas áreas en ordenamientos ecológicos del territorio, para su protección, manejo y aprovechamiento sustentable, según sea el caso</p> <p>Protección y aprovechamiento racional de las fuentes de abastecimiento de agua ubicadas en cada una de las áreas, ya sean pozos, manantiales o corrientes superficiales.</p> <p>Manejo de aguas residuales y fuentes de contaminación en cada una de las zonas.</p> <p>Capacitación a los dueños y poseedores del territorio, sobre la implementación de las estrategias anteriores.</p>		

Cada una de estas estrategias y algunas más específicas que pudieran surgir, requieren del conocimiento detallado de cada área, ya que factores como la oferta y demanda de agua, la calidad de la misma, la tenencia de la tierra, usos y



costumbres de pueblos indígenas, situación socioeconómica de los pobladores, etc., definirán la factibilidad de implementar o no determinadas estrategias, buscando siempre el consenso y participación de los principales actores en el manejo de sus recursos.

Los resultados obtenidos en la presente investigación se consideran correctos y adecuados a las condiciones del medio biofísico y ambiental del área de estudio, acorde a los recorridos realizados en campo; sin embargo, es necesario realizar estudios cuantitativos a nivel local sobre las áreas ya identificadas, como balances de agua para verificar y validar las diferencias entre las mismas.

Así también, para enriquecer los resultados obtenidos, es necesario agregar al análisis otros subcriterios del medio biofísico, que por falta de disponibilidad de la información y alcances del objetivo general de esta investigación no se contemplaron; con lo cual, se obtendrían áreas aptas con mayor precisión y mayor valor ambiental. La inclusión de criterios de índole social, económico o político, se consideran necesarios cuando lo que se desea es conocer la factibilidad para el desarrollo del servicio considerado, dado que este tipo de criterios ayuda o limita aún más la aptitud de estos espacios para la provisión del servicio ambiental considerado.

Por último, a través de la difusión de los resultados obtenidos, atender el problema de desconocimiento de la sociedad y tomadores de decisiones de todos los niveles, respecto a la ubicación y capacidad de diferentes áreas para la recarga hídrica en la UMAFOR Zacatlán; con la finalidad de aplicar las estrategias correspondientes a cada zona, conservando, mejorando y recuperando a través del manejo adecuado cada una de ellas, evitando problemas futuros de escasez de este servicio ambiental importante.

### **3.5. CONCLUSIONES**

La integración de técnicas de SIG y EMC permitió identificar las zonas aptas para recarga hídrica subterránea en la UMAFOR Zacatlán, lo que permite a su vez elaborar y aplicar estrategias de manejo, conservación y recuperación de las zonas con diferente aptitud para el objetivo perseguido; por lo cual, se recomienda el uso de estas técnicas para estudios similares.

Se determinó que los factores del medio biofísico que contribuyen a la recarga hídrica subterránea en la región de estudio, son: Clima (precipitación media anual y evapotranspiración real), Geología (tipos de rocas), Cobertura vegetal (tipos de vegetación y usos de suelo), Suelos (textura) y Topografía (pendiente).

Se obtuvo que la UMAFOR Zacatlán posee un aptitud media para la recarga hídrica subterránea, dado que al 63.19% de su superficie total le corresponde este nivel de aptitud. Las áreas con aptitud alta (7.92%) se localizan básicamente en la parte norte y noreste del área de estudio.

El uso de encuestas para aplicar el método de Proceso Analítico Jerarquizado, se considera aceptable porque permite ponderar los criterios de un determinado objetivo lo que asegura resultados más congruentes con la realidad al obtener gradientes de aptitud; aunque es necesario ser precavidos en su uso y vigilar la consistencia de las respuestas en cada encuesta. Se recomienda, en la medida de lo posible, la realización de talleres de expertos donde se obtenga a través de consenso, una sola matriz de comparación de criterios.

### **3.6. LITERATURA CITADA**

Achinelli, M., R. Perucca y H. Ligier. (2010). Evaluación multicriterio para la zonificación del servicio ecosistémico en el macrosistema Ibera: Amortiguación Hídrica. *In*: Laterra, P., E. G. Jobbagy y J. M. Paruelo (Eds). Valoración de servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial (pp.485-510). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina.

- Andreo, B., J. Vías, J. A. López G., F. Carrasco, J. J. Durán y P. Jiménez. (2004). Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero* 115, 2.
- Carrica, J. C. y C. Lexow. (2004). Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59 (2): 281-290.
- Clark Labs. (2006). Software IDRISI Andes. Clark University Worcester, Massachusetts, U.S.A.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2013). Localizador REPDA (Registro Público de Derechos de Agua) de aguas nacionales, zonas federales y descargas de aguas residuales (En línea). Consultado en noviembre de 2013. Obtenido de:  
<http://sigaims.conagua.gob.mx/Website/Localizador/viewer.htm>
- \_\_\_\_\_. (2011). Atlas del agua en México 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. 185 p.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2003). Catálogo de metadatos geográficos. *In*: Maderey Laura, E. (1990). "Evapotranspiración real" en Hidrogeografía IV.6.6. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- \_\_\_\_\_. (2008). Catálogo de metadatos geográficos. *In*: Vidal-Zepeda, R. (1990). "Precipitación media anual" en Precipitación IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1:4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Cruz, F. A. y F. Salinas G. (2006). Localización de las zonas y cuantificación de la recarga en la cuenca de la Paz, B.C.S. *Geos* 26 (1): 45
- Custodio, G. (1998). Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evolución y la incertidumbre. *Boletín Geológico y Minero* (109-4): 13-29.
- Custodio, E. y M. R. Llamas. (1976). Hidrología subterránea. 2 ed. Tomo I. Ediciones Omega, Barcelona, España. 556 p.

- Eastman, J. R. (2006). IDRISI Andes. Guide to GIS and image processing. Clark University Worcester, Massachusetts, U.S.A. 309 p.
- ESRI. (2011). Software ArcGIS, versión 10.0. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc.
- García, C. I., A. Martínez O., A. Ramírez S., A. Niño C., A. J. Rivas y L. Domínguez B. (2007). La relación agua-bosque: Delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del Río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. *In*: H. Cotler (Comp.). El manejo integral de cuencas en México. 2ª edición (pp. 113-130). SEMARNAT-INE, México, D. F.
- Granados, O. A. (2005). Usos de sistemas de información geográfica y sistemas de teledetección en la identificación y mapeo de potenciales zonas de recarga hacia acuíferos del desierto de Chihuahua. CRISOL: Fusión de ideas 1(1):55-76.
- Gómez, D. M., y J. I. Barredo C. (2006). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 2ª edición. Alfaomega, México, D.F. 279 p.
- INAB (Instituto Nacional de Bosques). (2003). Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico. Guatemala, GT. 106 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (1989). Cartas Geológicas (E1402-E1403-F1411-F1412) Escala 1:250000. Serie I. Aguascalientes, Ags., México.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) y CONABIO. (1995). Carta Edafológica. Escala 1:250 000. México.
- Kumar, B. and U. Kumar. (2011). Ground water recharge zonation mapping and modeling using Geomatics techniques. International Journal of Environmental Sciences. 1 (7): 1670-1681.
- Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York.

- Martínez, G. G., J. J. Díaz G., O. Cosío G. (2010). Análisis morfométrico en la cuenca hidrológica San José del Cabo, B.C.S. México: Una aproximación en la identificación de potenciales áreas de captura. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 27 (3): 581-592.
- Matus, O., J. Faustino y F. Jiménez. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Serie técnica. Boletín técnico/CATIE No. 38. Turrialba, C.R.
- Meléndez, B. y J. M. Fuster. (1978). *Geología*. 4ª edición. Madrid, España: Paraninfo. 911 p.
- Monterroso, R. A. I., J. D. Gómez D. y J. A. Tinoco R. (2009). Servicios ambientales hidrológicos bajo escenarios de cambio climático en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. *Madera y Bosques* 15(2): 5-26.
- Núñez, P. E. P., A. Cardona B., J. Castro L., H. Robles B. y F. J. Escalona A. (2006). Definición de las zonas de recarga en la cuenca hidrológica de Calera, Zacatecas. *Geos* 26 (1): 44.
- Pérez, M. O., C. Delfín, A. Fregoso, H. Cotler y M. Equihua. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. Instituto Nacional de Ecología. *Gaceta Ecológica* 76: 47-66.
- Rebollo, L. F. (2013). Hidrogeología: Balance hídrico de un sistema acuíferos. Departamento de Geología, Universidad de Alcalá (En línea). Consultado en noviembre de 2013. Obtenido de:  
[https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-67044/TAB42351/T5-Balance%20h%EDdrico%20de%20un%20sistema%20acu%EDfero.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-67044/TAB42351/T5-Balance%20h%EDdrico%20de%20un%20sistema%20acu%EDfero.pdf)
- Ruíz, A. A. D. (2012). Zonas potenciales para la recarga de acuíferos en la subcuenca del Río Ahuehuepan, Taxco, Guerrero. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. 66 p.
- Saaty, T. (1980). *The analytical Hierarchy Process*. Mc Graw Hill, New York.
- Sánchez, K., F. Jiménez, S. Velásquez, M. Piedra y E. Romero. (2004). Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas

prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica. Comunicación técnica de Recursos Naturales y Ambiente, 88-95.

Sánchez, V. A. S., R. M. García N. y A. Palma T. (2003). La cuenca hidrográfica: Unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SMRN (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2007). Diagnóstico Socioeconómico y de Manejo Forestal de la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán. Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan-Zacatlán, A.C. Puebla, México. 281 p.

Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central, 34-35: 13-30.

Schosinsky, G. y M. Losilla. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central 23: 43-55.

Sophocleous M. (2004). Groundwater recharge. *In*: Silveira, L., Wohnlich S., y Usunoff, E. J. (eds). Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK (En línea). Consultado en octubre de 2012. Obtenido de: [<http://www.eolss.net>].

Sukia, I. J., M. Willem S. y J. Carrera R. (2009). Recarga de acuíferos mediante agua de lluvia. Proyecto de Tesina de Doctorado CODI: 708-TES-EG/CA-3151. Universidad Politécnica de Cataluña, Madrid, España. 105 p.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). (1986). Agua, vida y desarrollo: Manual de uso y conservación del agua en zonas rurales de América Latina y el Caribe. Tomo 2 Elementos. INCA Editorial Mendoza, Argentina.

Voogd, H. (1983). Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning. London: Pion.

## CAPÍTULO IV

### METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR ÁREAS PRIORITARIAS: UNA PROPUESTA PARA SU IDENTIFICACIÓN EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA

#### 4.1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas naturales proporcionan a la sociedad una amplia gama de servicios de provisión, regulación, de soporte, y culturales (MEA, 2003). Ellos son la base de la subsistencia, desarrollo económico y social del que depende la humanidad (Gómez y Groot, 2007). Por tanto, se deben manejar adecuadamente para mantenerlos saludables y no comprometer la generación de los servicios ambientales que producen (Machín y Casas, 2006). Como consecuencia, es importante la creación de estrategias y programas de conservación y manejo sustentable de los recursos naturales (SEMARNAT, 2006; Koleff *et al.*, 2009).

Debido al costo alto que representa la conservación de grandes superficies (Razola *et al.*, 2006; Sánchez *et al.*, 2008) y a las limitaciones de recursos, principalmente de tipo económico, la conservación debe centrarse en áreas donde se produzcan los mayores beneficios y los esfuerzos invertidos deriven en los mayores impactos, principalmente ambientales (Razola *et al.*, 2006; SEMARNAT, 2006; Benegas y León, 2009; Ceballos *et al.*, 2009; Geneletti *et al.*, 2011).

Un aspecto fundamental para alcanzar una conservación eficaz es definir, conocer y priorizar los lugares en que se debe actuar primero (Benegas y León, 2009; Geneletti *et al.*, 2011). Esto se logra a través de la identificación de áreas prioritarias para la conservación (Sánchez *et al.*, 2008; Arriaga *et al.*, 2009; Ceballos *et al.*, 2009; Koleff *et al.*, 2009), la cual es una herramienta valiosa que permite orientar y optimizar los esfuerzos del estudio, conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

Desde 1997, en México, diversas iniciativas auspiciadas por instituciones gubernamentales y no gubernamentales, nacionales e internacionales han concentrado los esfuerzos de investigación en la identificación de regiones prioritarias para la conservación de la biodiversidad a nivel nacional (Arriaga *et al.*, 2009). Más recientemente, se han realizado investigaciones para la selección de áreas prioritarias de conservación de la biodiversidad con enfoques regional, temático o sobre ecosistemas y especies de particular interés (Ceballos *et al.*, 2009; March *et al.*, 2009; Koleff y Urquiza, 2011); así como identificación de áreas prioritarias con otros objetivos de conservación (servicios ambientales hidrológicos, captura de carbono), de protección de cuencas o de restauración de ecosistemas (Geneletti *et al.*, 2011; SEMARNAT, 2011).

En la UMAFOR Zacatlán, la conservación de los recursos naturales, específicamente de zonas forestales, ha estado centrada en el Programa Nacional de Pago por Servicios Ambientales bajo la operación de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). En este sentido, de 2003 a 2013, se ha apoyado la conservación de 3,152.23 ha, con un monto invertido de 5,326,084.84 pesos (CONAFOR, 2012; 2013a). Aún con esto, se considera que la problemática de deterioro y fragmentación de los recursos naturales en la UMAFOR Zacatlán (SMRN, 2007) requiere de una mayor implementación de estrategias de conservación y manejo sustentable de sus recursos, que permita atender áreas prioritarias de acuerdo a su potencialidad de brindar servicios ambientales específicos con riesgo de desaparición por procesos de deforestación.

Las metodologías para identificar áreas prioritarias pueden tener diferentes aproximaciones, desde las meramente intuitivas o cualitativas hasta las analíticas cuantitativas (SEMARNAT, 2006). En las últimas tres décadas, se han diseñado y desarrollado varios modelos computarizados para apoyar el proceso de la identificación de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad (Blumentrath, 2011); sin embargo, actualmente no existe una recopilación y análisis comparativo de metodologías integrales que hayan sido usadas en la identificación de áreas prioritarias para conservación.



Bajo este contexto, esta investigación realiza, por una parte, un análisis crítico y comparativo de las metodologías encontradas en la literatura que han sido utilizadas para identificar áreas prioritarias para conservación de recursos naturales, con la finalidad de conocer las fortalezas y limitaciones de las metodologías actuales, en relación al concepto de un área prioritaria y lo que implica. Con base a ello, poder elegir o combinar la(s) metodología(s) más adecuada(s) de acuerdo al objetivo específico que se persiga, antes de iniciar el proceso de toma de decisiones en la identificación de áreas de conservación.

Por otro lado, se pretende aportar elementos para una propuesta metodológica que identifique áreas prioritarias para conservación, en una región forestal importante del estado de Puebla, mediante la combinación de áreas con potencial de provisión de servicios ambientales hidrológicos y su riesgo futuro de deforestación, generando estrategias para la adecuada toma de decisiones.

#### **4.2. OBJETIVOS**

- i. Realizar un análisis comparativo de las metodologías usadas en la identificación de áreas prioritarias para conservación de recursos naturales, con la finalidad de seleccionar y proponer una metodología que pueda ser usada en correcta identificación de áreas prioritarias.
- ii. Identificar áreas prioritarias de conservación en la UMAFOR Zacatlán, Puebla, mediante la combinación de escenarios de riesgo de deforestación y la aptitud de servicios ambientales hidrológicos.
- iii. Formular estrategias de manejo para la conservación de las áreas identificadas como prioritarias.

#### **4.3. REVISIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS USADAS EN LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS**

##### **(a) Revisión de metodologías usadas en la identificación de áreas prioritarias**

La necesidad de conservar los recursos naturales ha estado siempre presente desde las civilizaciones más antiguas, siendo las áreas protegidas una de las principales estrategias para promover la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad (CONABIO *et al.*, 2007; Ceballos *et al.*, 2009; Geneletti *et al.*, 2011). Sin embargo, en la mayoría de los países, incluido México, los sistemas de áreas protegidas fueron seleccionados sin considerar una metodología específica (CONABIO *et al.*, 2007) y en muchos casos, las áreas definidas no fueron representativas para el objetivo básico de conservación.

Recientemente, la investigación se ha centrado más en el desarrollo de métodos y modelos cuantitativos, específicos para la conservación de la biodiversidad (Razola *et al.*, 2006; Ceballos *et al.*, 2009; March *et al.*, 2009), existiendo pocas metodologías con enfoques de priorización diferentes al de conservación de la biodiversidad (Koleff y Urquiza, 2011; SEMARNAT, 2011).

Para la presente investigación, y derivado de la terminología usada por diversos autores (Arriaga *et al.*, 2000; Galindo *et al.*, 2009; SEMARNAT, 2011), las áreas prioritarias para la conservación de los recursos naturales son representaciones espaciales del territorio donde confluyen atributos ambientales, biofísicos, socioeconómicos, culturales o políticos, específicos y óptimos para un objetivo dado; y cuya permanencia se encuentra en riesgo inminente por causas naturales, antropógenas o ambas.

##### **Identificación de áreas prioritarias: Métodos cualitativos**

Los métodos cualitativos se basan en análisis relativamente simples y se definen, en gran medida por la experiencia de expertos. Históricamente, estos métodos se han utilizado para la selección de áreas naturales protegidas y prioritarias (SEMARNAT, 2006), haciendo uso de criterios como el valor escénico del paisaje,

los usos recreativos, la presencia o ausencia de aprovechamientos forestales o la mera disponibilidad del terreno (Margules *et al.*, 2002; CONABIO *et al.*, 2007; Sánchez *et al.*, 2008; Ceballos *et al.*, 2009; Koleff *et al.*, 2009; Koleff y Urquiza, 2011).

Los métodos cualitativos se consideran simples, rápidos y fáciles de aplicar, y de costo bajo en comparación con los métodos cuantitativos. Sin embargo, dado el carácter subjetivo que cada experto utiliza para la definición de las áreas, los resultados pueden volverse irrepetibles e inconsistentes, además de presentar gran incertidumbre y un margen de error elevado en las delimitaciones de dichas áreas prioritarias (SEMARNAT, 2006).

Ante la crisis ambiental actual y la necesidad de una mayor precisión de los estudios, resulta indispensable que las áreas prioritarias sean identificadas a través de métodos cuantitativos (Sánchez *et al.*, 2008). Por lo cual, esta revisión soslaya profundizar en el análisis de metodologías cualitativas.

### **Identificación de áreas prioritarias: Métodos cuantitativos**

Los métodos cuantitativos permiten reducir la incertidumbre y la inconsistencia de los resultados mediante diferentes aproximaciones estadísticas; además, se pueden realizar análisis cuantitativos de la información biofísica con que cuenta el área de interés. Con el apoyo de la estadística espacial, se pueden generar modelos predictivos de los fenómenos a diferentes escalas espacio-temporales (SEMARNAT, 2006). De esta manera, una característica básica de los métodos cuantitativos es la utilización de modelos espaciales estadísticos y de optimización para el procesamiento de sus criterios, aunque también incluyen en su proceso metodológico, el uso de técnicas cualitativas como la realización de talleres locales y regionales, la aplicación de encuestas, la consulta a expertos, otros.

El Cuadro 4.1 muestra una recopilación de: (a) diferentes metodologías cuantitativas encontradas en la literatura, y (b) técnicas espaciales utilizadas como herramientas metodológicas. Las primeras se caracterizan por ser muy específicas

para estudios de conservación de la biodiversidad e incluyen en sus procesos diversos modelos computarizados de métodos de optimización y análisis estadístico espacial; las segundas son técnicas más generales que permiten identificar áreas prioritarias con enfoques diferentes al de conservación y son integradas en software de sistemas de información geográfica. Para cada metodología y técnica se presenta el objetivo de priorización, la descripción, el tipo de criterios utilizados, sus ventajas y desventajas y las referencias de los estudios que las describen o aplican (Cuadro 4.1).

(b) Análisis comparativo de metodologías usadas en la identificación de áreas prioritarias para conservación de recursos naturales

La elección o definición de una metodología en particular para identificar áreas prioritarias puede resultar complejo porque dependerá del objetivo específico de priorización, de los criterios seleccionados e información disponible para su análisis y de la escala a la que se desea priorizar, lo que resulta ser diferente para cada caso de estudio. Sin embargo, existen elementos básicos que deben considerarse al momento de seleccionar áreas prioritarias para conservación. En este sentido, Pressey y Taffs (2001), Margules *et al.* (2002), Ceballos *et al.* (2009), sugieren que se deben entender y analizar dos conceptos: La vulnerabilidad (probabilidad o inminencia de destrucción o alteración de vegetación natural) y la unicidad o irremplazabilidad (improbabilidad de que un área candidata para lograr un objetivo de conservación sea reemplazada satisfactoriamente por otra).

Si se consideran estos dos conceptos (vulnerabilidad e irremplazabilidad) como el análisis de las amenazas o restricciones que aumentan o limitan la prioridad de un área determinada, entonces de las metodologías mostradas en el Cuadro 4.1 sección (a), las correspondientes a la Planificación Ecorregional, el Análisis de Vacíos y la Metodología REDD+ cumplen con estos elementos, al incluir en sus análisis la identificación de amenazas a los elementos objetivo de conservación.

Cuadro 4.1. Metodologías generales utilizadas para la selección de áreas prioritarias de conservación de ecosistemas.

Nombre del método	Objetivo de priorización	Descripción de la metodología	Criterios utilizados	Ventajas	Desventajas	Referencias
(a) Metodologías cuantitativas utilizadas para la identificación de áreas prioritarias						
Planificación Ecorregional  (Diseño para la Conservación de The Nature Conservancy)	Conservación de la diversidad de especies, comunidades y sistemas ecológicos	Se pone énfasis en la conservación de la totalidad de comunidades y ecosistemas (no sólo aquellos que son raros), en la conservación a escalas geográficas y niveles de organización biológica múltiples y en el reconocimiento del valor de la planificación biológica completa basada en límites ecorregionales y no geopolíticos.	Ecología Biofísicos Sociales Económicos Políticos	Utilizado para grandes espacios geográficos y para todo tipo de ecosistemas.  Incluye la identificación de amenazas y establecimiento de estrategias para conservación  Metodología sistemática, eficiente, repetible y participativa	Requiere disponibilidad de información georreferenciada de calidad para grandes espacios geográficos.  Requiere el conocimiento y guía de expertos en diferentes áreas temáticas  Costoso para aplicación a nivel regional, local o para priorizar un solo servicio ecosistémico	(Arrivillaga y Windevoxhel, 2008; Galindo <i>et al.</i> , 2009; Groves <i>et al.</i> , 2000; Kappelle, 2007; Loos, 2011; Pronatura y TNC, 2007).
Metodología del Ordenamiento Ecológico del Territorio	Conservación de la biodiversidad	Se usan criterios biológicos, estadísticos y técnicos estandarizados para determinar las áreas prioritarias para la conservación de la diversidad biológica. Utilizando métodos de modelación estadísticas, SIG's y modelos de optimización, se considera la aproximación más conveniente en el contexto del ordenamiento ecológico de una región	Ecología Biofísicos Sociales Económicos	El uso de modelos probabilísticos permite el análisis a escala regional, basada en muestreos a escala local  Se reduce la incertidumbre e inconsistencia de los resultados  Realza el análisis de conflictos de usos del territorio	Para poder realizar los análisis y la modelación estadística, se requiere un nivel adecuado (suficiente) de información ecológica y biológica de los elementos a conservar.  No incluye el análisis de amenazas como tal, aunque estas pueden ser parte de las restricciones en los modelos de optimización.  Da prioridad a los límites político-administrativos del	(SEMARNAT, 2006).

Nombre del método	Objetivo de priorización	Descripción de la metodología	Criterios utilizados	Ventajas	Desventajas	Referencias
					territorio.	
Análisis de vacíos (Gap Analysis)	Conservación de la biodiversidad	Proceso en el cual se identifica y examina la presencia de la biodiversidad en un sistema de áreas protegidas para determinar cuáles elementos no están representados, o lo están de manera insuficiente y en que áreas protegidas se encuentran. Posteriormente, esta información es utilizada para identificar áreas prioritarias o designar nuevas áreas que requieran acciones de conservación. Es considerado como la principal herramienta para el establecimiento de prioridades en la planificación de áreas protegidas.	Biofísicos Sociales Económicos Conservación	Incluye amenazas Evita traslapes de conservación de áreas Modelos de distribución de especies. Valiosa fuente de información para otros estudios más detallados o específicos Asigna valores de protección a los sitios de conservación Incluye propiedad o tenencia de la tierra	Requiere la información de la red de áreas de conservación ya existente Escala utilizada debe ser similar a la utilizada en las áreas de conservación ya existentes Límites del análisis acordes a los límites de las áreas existentes (nivel estatal) Solo representación (distribución) del elemento de interés, no viabilidad del mismo (calidad del hábitat, abundancia de la especie, tendencia de la población, etc)	(CONABIO <i>et al.</i> , 2007; Groves <i>et al.</i> , 2000; Jennings, 2000; Koleff y Urquiza, 2011; Koleff <i>et al.</i> , 2009; Rentería <i>et al.</i> , 2011).
REDD+ (Reducción de Emisiones por derivadas de la Deforestación y Degradación de los bosques)	Conservación de áreas forestales	Metodologías que permiten priorizar áreas para la implementación de proyectos REDD, basadas en el análisis de las distintas variables que permiten la cuantificación de los múltiples beneficios de los bosques, incluyendo su vulnerabilidad a ser destruidos o convertidos a otros usos.	Biofísicos Sociales Económicos Ambientales Institucionales Legales	Aplicable a escalas nacional, regional y local. Incluye la modelación de escenarios de provisión de servicios y de sus amenazas. Aplicable a la conservación de los beneficios por separado o en conjunto de las áreas forestales.	Requiere disponibilidad de información georreferenciada, detallada y de calidad para los diferentes niveles de escala. Requiere el conocimiento y guía de expertos en diferentes áreas temáticas.	(Bertzky <i>et al.</i> , 2011; Harris <i>et al.</i> , 2008; Parker <i>et al.</i> , 2009; SEMARNAT, 2010).

Nombre del método	Objetivo de priorización	Descripción de la metodología	Criterios utilizados	Ventajas	Desventajas	Referencias
(b) Técnicas espaciales utilizadas como herramientas metodológicas en la identificación de áreas prioritarias						
Análisis multicriterio (EMC)	Manejo del recurso hídrico. Priorización de cuencas. Focalización de apoyos	Conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones. Su fin básico es investigar un número de alternativas de decisión bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto, lo cual hace posible generar soluciones compromiso y jerarquizar las alternativas de acuerdo al objetivo planteado.	Biofísicos Sociales Económicos Productivos	Permite utilizar y combinar un sinnúmero de criterios e indicadores, para cualquier objetivo de priorización que se desee. Permite el estudio a cualquier escala, unidades de medida y límites territoriales. Se reduce la incertidumbre e inconsistencia de los resultados	Más enfocado a los análisis de aptitud. No incluye el análisis a detalle de amenazas, restricciones o riesgos. Los procesos pueden ser técnicamente complejos, que requieran el apoyo de expertos. Riesgo de que pueda ser utilizado de manera indiscriminada.	(Gómez y Barredo, 2006; Sánchez <i>et al.</i> , 2004; SEMARNAT, 2011).
Algebra de mapas	Pago de servicios hidrológicos. Compensación de servicios ecosistémicos. Desarrollo forestal. Manejo de cuencas. Restauración y reforestación.	Es la combinación matemática de las capas de los mapas, mediante tres tipos de operaciones básicas: Modificación de los valores de los datos de atributo por medio de una constante, transformación de los valores por una operación estándar y combinación de capas diferentes de datos para producir un resultado compuesto.	Biofísicos Biológicos Biogeo-gráficos Sociales Económicos Ambientales	No requiere información especializada ni detallada. Aplicable a cualquier objetivo de priorización que se desee. Estudios a diferentes escalas y límites territoriales.	Análisis cuantitativos simples. Carácter subjetivo en el análisis de los criterios. Gran incertidumbre y margen de error elevado Resultados irrepetibles e inconsistentes.	(Benegas y León, 2009; Eastman, 2006; Escalante, 2003; Fonseca <i>et al.</i> , 2011; Vargas <i>et al.</i> , 2009).

Es necesario enfatizar que el Análisis de Vacíos es un proceso que determina cuáles elementos no están representados o lo están de manera insuficiente, en una red de áreas de conservación ya existente, y con base en ello identifica áreas nuevas. Esto permite aplicarlo antes de cualquier otro estudio, por ejemplo una planificación ecorregional (Groves *et al.*, 2000) o en combinación con otros métodos (Rentería *et al.*, 2011).

La Planificación Ecorregional es una metodología enfocada a la conservación sistemática y con una base de conocimiento científico de la biodiversidad en ambientes terrestres, de agua dulce, costeros y marinos (Kappelle, 2007), por lo que su aplicación a la conservación de otros servicios ecosistémicos debe analizarse detalladamente y considerar si con adecuaciones pertinentes puede ser utilizable. Para estos casos, es más recomendable la metodología REDD+ ya que permite incluir el análisis de los múltiples servicios ecosistémicos en un contexto socioeconómico y a escalas nacional, regional o local; aunque su procedimiento está limitado a ambientes terrestres.

Por otra parte, la metodología incluida en el Ordenamiento Ecológico del Territorio (México) (Cuadro 4.1), es un proceso que no incluye a detalle el análisis de amenazas, considerándolas como parte de las restricciones de usos del territorio, además de confinar la conservación a límites político-administrativos del mismo. Aún con esto, se considera una metodología recomendable para la identificación de áreas prioritarias con el enfoque de conservación de la biodiversidad, ya que propone el uso de los diferentes análisis estadísticos espaciales que permiten la reducción de incertidumbre e inconsistencias de los resultados.

Una limitación generalizada de las metodologías cuantitativas descritas anteriormente (Cuadro 4.1), lo representan las restricciones inherentes al uso de métodos de optimización, cuya aplicación y uso adecuado depende del conocimiento del usuario, del objetivo específico de priorización y de la cantidad, calidad y disponibilidad de criterios y datos (Blumentrath, 2011).



La identificación de áreas prioritarias puede tener enfoques diferentes al de conservación, como son: Protección y manejo del recurso hídrico, manejo de cuencas, focalización de apoyos o programas gubernamentales, compensación o pago de servicios ecosistémicos, manejo forestal, restauración y reforestación forestal, entre otros. Se considera que la investigación y desarrollo de metodologías para estos enfoques han recibido poca atención, como es el caso específico de la restauración forestal (Geneletti *et al.*, 2011). Por lo anterior, el Cuadro 4.1 sección (b) incluye al Análisis Multicriterio y el Algebra de Mapas como herramientas metodológicas utilizadas para la identificación de áreas prioritarias, aplicadas a los enfoques mencionados.

El Análisis Multicriterio es una herramienta útil para el proceso de toma de decisiones, ya que permite seleccionar, analizar y combinar un sinnúmero de criterios e indicadores, generando alternativas de solución jerarquizadas de acuerdo al objetivo planteado. El análisis cuantitativo que se hace con los datos reduce la incertidumbre e inconsistencia de los resultados. Una debilidad importante a considerar en el análisis multicriterio es que se debe incluir la opinión de expertos o personas interesadas en el tema, quienes deben de asignar pesos o ponderaciones a los criterios y que indicarán la importancia relativa entre los mismos, lo que lo hace subjetivo (Dykstra, 1984), esto podría evitarse si se considera una muestra representativa de la población de interés. Tampoco se incluye un análisis detallado de amenazas o restricciones que es indispensable para otorgar la categoría de prioritaria a un área determinada, por lo que su uso podría ser más adecuado para la identificación de áreas potenciales y óptimas. En caso de optar utilizarla como metodología para la identificación de áreas prioritarias, debe considerarse sólo como un método de optimización, que combinado con otros métodos o procedimientos de análisis estadístico permitan la definición correcta de un área prioritaria.

El Algebra de Mapas es la herramienta espacial utilizada con más frecuencia para la identificación de áreas prioritarias, siendo también la más sencilla, al realizar análisis cuantitativos simples y en muchos casos de carácter subjetivo; sus

resultados pueden llegar a presentar gran incertidumbre y un elevado margen de error. Se considera que el Algebra de Mapas debe verse como la herramienta final de análisis de cualquier proceso, debe existir un análisis cuantitativo previo y adecuado de los criterios, indicadores, amenazas o restricciones; o su uso debe sustituirse por métodos de optimización.

En suma, se considera que la metodología de Planificación Ecorregional resulta ser la más adecuada para aplicarse a grandes espacios geográficos y con multiplicidad de objetivos de priorización, lo que conlleva que puede resultar costosa en su aplicación por la cantidad y calidad de información que requiere, pero también es la más completa, eficiente y repetible en todo tipo de ecosistemas (terrestre, acuático). La metodología REDD+ y la del Ordenamiento Ecológico del Territorio son adaptables a escalas nacional, regional y local, con objetivos de priorización específicos y con requerimientos de información espacial detallada, lo que también las convierte en metodologías costosas si son aplicadas a grandes espacios geográficos, reduciendo su costo y aumentando su eficiencia en espacios más pequeños. La metodología de Análisis de Vacíos es totalmente recomendable cuando se desea evaluar y mejorar el sistema de áreas naturales protegidas de un determinado lugar, su combinación con otros métodos arroja excelentes resultados para la identificación de espacios prioritarios no considerados en un sistema de conservación ya establecido.

La combinación de las técnicas espaciales de Análisis Multicriterio y Algebra de Mapas, con otros modelos de análisis estadístico espacial y métodos de optimización puede resultar la metodología más completa, eficiente y económica para aplicarse a escalas regional y local; dado que permite realizar las combinaciones de técnicas necesarias para los análisis por separado de criterios y amenazas, ajustándose a la información existente o generándola al nivel que se requiera, de acuerdo a la disponibilidad de recursos humanos y financieros. Esta investigación realiza esta combinación, adecuando una metodología que es aplicada en la definición de áreas prioritarias hidrológicas en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

## 4.4. MÉTODOS Y MATERIALES

### 4.4.1. Área de estudio

Esta investigación se llevó al cabo en la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán, la cual se localiza al norte del estado de Puebla. Forma parte de la Sierra Madre Oriental y del Eje Neovolcánico. Comprende trece municipios de la Sierra Norte de Puebla que cubren una superficie de 2,690.02 km<sup>2</sup> (269,002 hectáreas), siendo éstos: Ahuacatlán (006), Ahuazotepec (008), Amixtlán (014), Aquixtla (016), Camocuautla (028), Coatepec (030), Cuautempan (039), Chignahuapan (053), Ixtacamaxitlán (083), Tepango de Rodríguez (162), Tepetzintla (167), Tetela de Ocampo (172) y Zacatlán (208) (Figura 4.1).

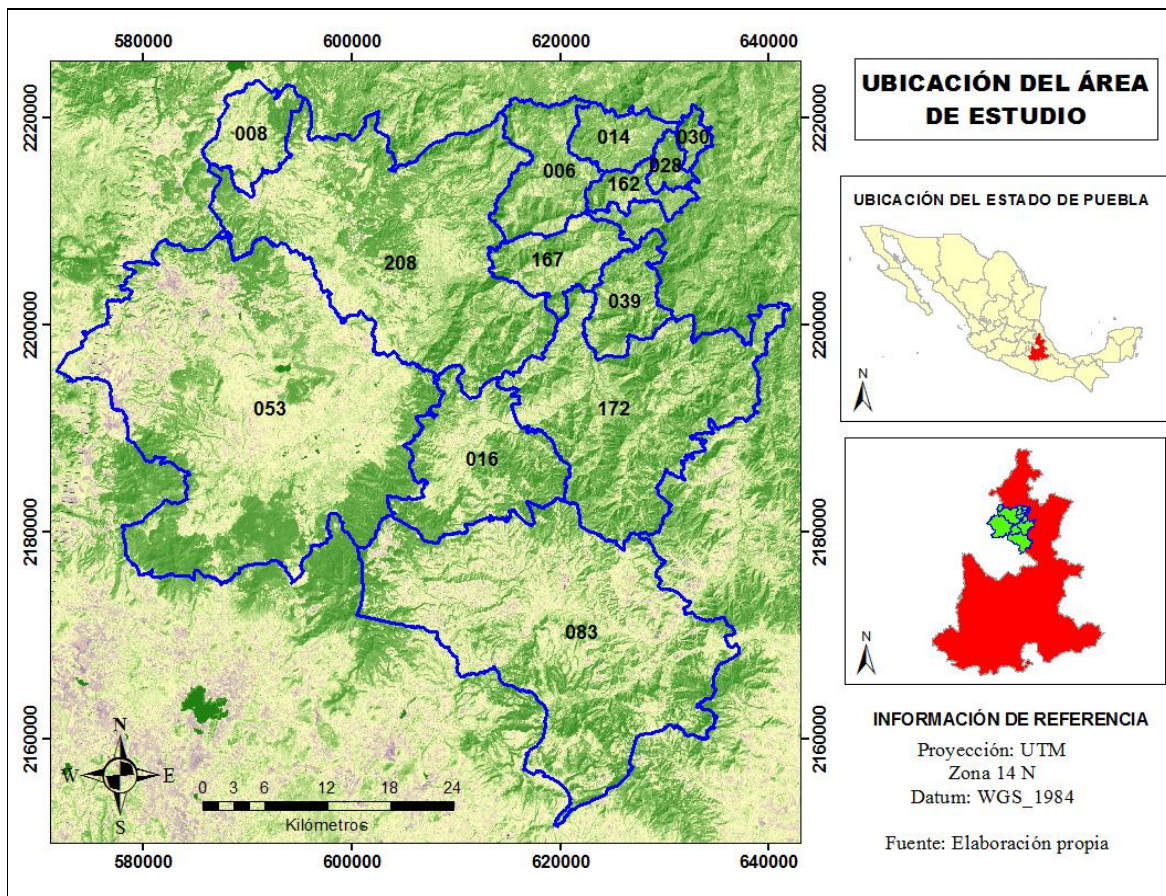


Figura 4.1. Ubicación geográfica de la UMAFOR Zacatlán, Puebla

En el área de estudio predomina el clima templado subhúmedo con lluvias en verano (47.58% de su superficie). Las temperaturas promedio en el año son desde los 10°C hasta los 22°C. La precipitación promedio varía desde los 600 a los 2,000 mm, sólo una mínima fracción noreste de la región recibe precipitaciones de 2,500 mm en el año (SMRN, 2007). El intervalo altitudinal, presenta sitios que van desde los 430 m en las partes bajas del municipio de Coatepec hasta 3 440 m en el Peñón del Rosario en el límite norte de Tlaxcala (SMRN, 2007).

Los principales tipos de vegetación existentes en la UMAFOR Zacatlán, están representados por Bosque de Pino, Bosque de Pino-Encino, Bosque de Encino, Bosque de Encino-Pino, Bosque de Abies, Bosque de Táscate, Bosque Mesófilo, Matorral Desértico Rosetófilo y Vegetación Secundaria arbustiva y herbácea de los diferentes tipos de vegetación (ver Capítulo I).

Los ecosistemas principales en la UMAFOR son: templado-frío, tropical y zonas semiáridas. En el templado-frío, los tipos de vegetación son los bosques de oyamel, de pino, de pino-encino, de encino-pino, de otras coníferas o bosque de táscate y bosque de encino. El ecosistema tropical presenta el bosque mesófilo de montaña y una parte reducida de selva mediana subperenifolia. El ecosistema de zonas semiáridas lo caracteriza el matorral desértico rosetófilo (SMRN, 2007).

#### **4.4.2. Propuesta metodológica para la identificación de áreas prioritarias para conservación**

El Capítulo II de este documento de tesis realiza un análisis retrospectivo (1986-2010), actual y prospectivo (2010-2030) de cambios de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán, identificando y analizando los diferentes patrones (naturales, sociales, económicos) que rigen estos cambios y estimando anticipadamente, a través de la proyección del crecimiento poblacional las áreas forestales con riesgo de deforestación, teniendo como resultado un mapa que muestra la distribución espacial de dichas áreas. Aunado a lo anterior, en el Capítulo III, se identificaron y aplicaron criterios biofísicos para la zonificación de áreas aptas para recarga



El proceso para el cruce de las áreas con riesgo de deforestación y la aptitud de servicios ambientales hidrológicos, se realizó mediante una multiplicación en Raster Calculator de ArcGIS v10 (ESRI, 2011), obteniendo diferentes combinaciones de aptitud y riesgo y clasificando estas combinaciones en áreas con prioridad alta, media y baja, según se ilustra en la Figura 4.3. Las áreas con nulo riesgo de deforestación y nula aptitud de recarga de acuíferos, fueron excluidas del proceso, para sólo obtener las áreas que presentaran algún nivel de prioridad.

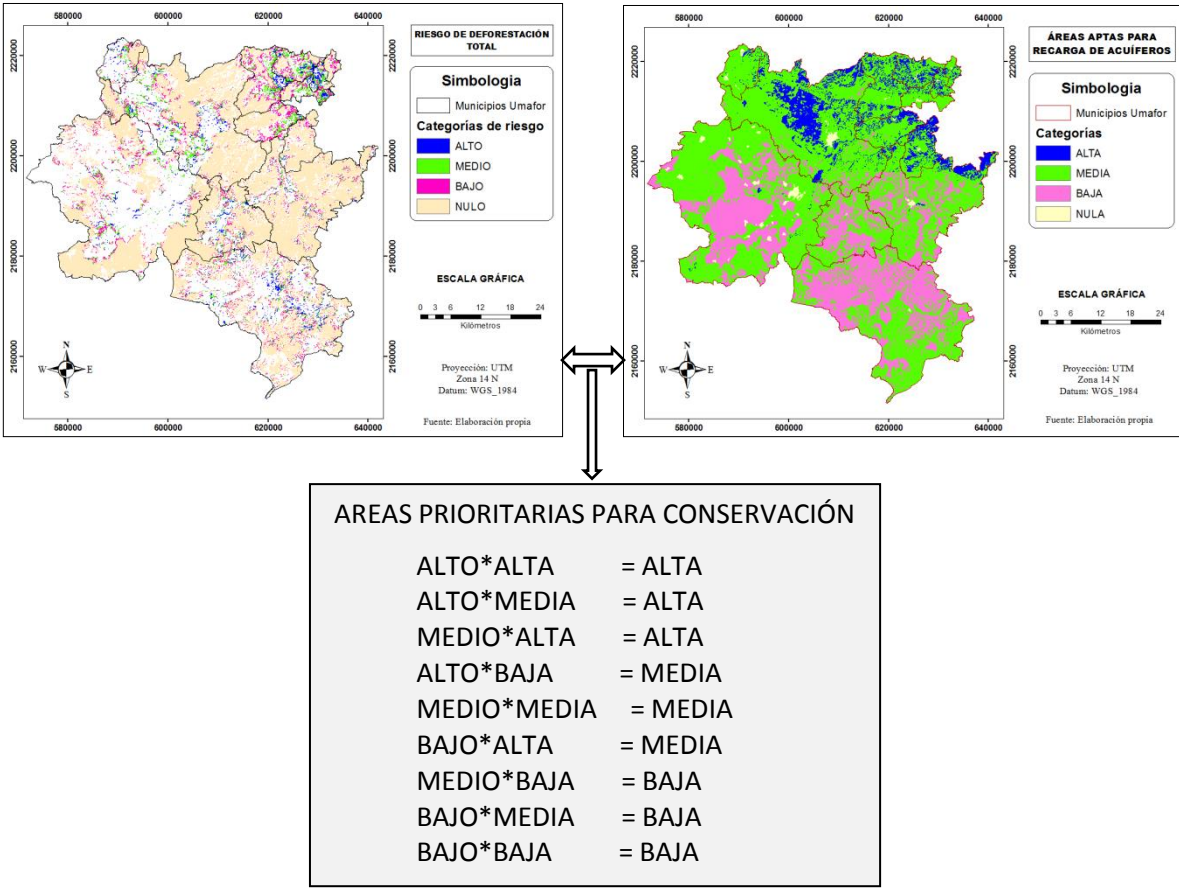


Figura 4.3. Obtención de áreas prioritarias para conservación en la UMAFOR Zacatlán.

La validación de las diferentes categorías de áreas prioritarias obtenidas se realizó mediante recorridos en campo, visitando sitios específicos de cada una de estas categorías; y a través de entrevistas directas con personal de presidencias municipales y prestadores de servicios técnicos forestales de la región,

comparando las áreas que ellos consideran como prioritarias para la conservación y sus razones, con las áreas obtenidas como prioritarias en la presente investigación.

## **4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.5.1. Áreas prioritarias para conservación en la UMAFOR, Zacatlán, Puebla**

La distribución espacial de las áreas prioritarias en sus gradientes de alta, media y baja prioridad para la UMAFOR Zacatlán, se ilustran en la Figura 4.4. El porcentaje mostrado en la misma, corresponde al porcentaje de superficie que cada categoría de área prioritaria abarca, respecto al total de la superficie (269,002 ha) de la UMAFOR Zacatlán. De esta manera, las áreas con alta prioridad de conservación ocupan una superficie aproximada de 5,727 ha (2.13%), las áreas con prioridad media una superficie de 9,981 ha (3.71%), y las áreas con baja prioridad para conservación una superficie de 13,313 ha (4.95%).

Las áreas con prioridad alta se distribuyen principalmente en los municipios de Ahuacatlán, Amixtlán, Camocuautla, Tepetzintla, Zacatlán, Ahuazotepec, Aquixtla e Ixtacamaxtitlán. Estas áreas se caracterizan por presentar las mejores condiciones biofísicas para la recarga hídrica subterránea (servicio ambiental hidrológico), así como el mayor riesgo de deforestación al año 2030.

Las áreas con prioridad media se encuentran aledañas a las áreas de alta prioridad, abarcando parte de los municipios de Chignahuapan, Ahuazotepec, Zacatlán, Tepetzintla, Ahuacatlán, Tepango de Rodríguez, Amixtlán y Camocuautla. Son áreas que pueden presentar un riesgo alto de deforestación pero una aptitud baja para recarga hídrica subterránea; así también, una aptitud alta para la recarga de acuíferos, pero un riesgo bajo de deforestación; o valores medios tanto para aptitud como para riesgo. Representan áreas importantes a tomarse en cuenta, ya que su riesgo de deforestación puede aumentar debido a la generación de escenarios alternativos, o su aptitud puede mejorar por la



implementación de estrategias para elevar la recarga de acuíferos, y cualquier cambio en estos aspectos, aumentaría su nivel a áreas con prioridad alta.

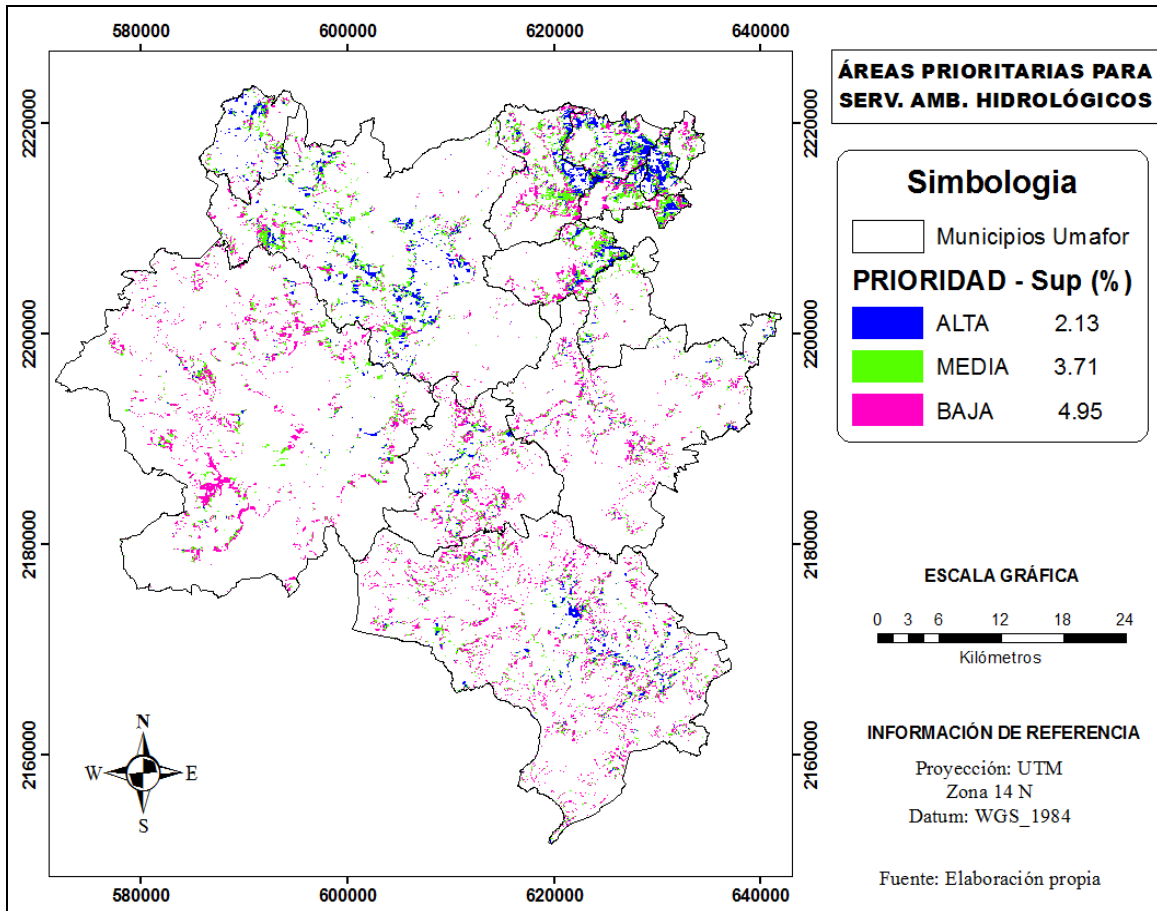


Figura 4.4. Áreas prioritarias para conservación por servicios ambientales hidrológicos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Las áreas con prioridad baja de conservación se distribuyen en los municipios que se caracterizan básicamente por presentar riesgo bajo de deforestación, y de aptitud media a baja de recarga de acuíferos, como son: Chignahuapan, Tetela de Ocampo y Cuautempan.

En relación a las áreas con prioridad alta, la Figura 4.5 muestra el porcentaje que las mismas ocupan de acuerdo a la superficie de cada municipio y respecto a la superficie total de las áreas con prioridad alta. De esta manera, los municipios con mayor superficie de áreas con prioridad alta, respecto a su superficie municipal son: Camocuautla con 490.97 ha (30.38%), Amixtlán con 762.24 ha (17.13%) y



Tepango de Rodríguez con 297.40 ha (10.36%). Por otro lado, los municipios que tienen mayor superficie de áreas con prioridad alta respecto al total de superficie (5,727.04 ha) de esta categoría, son: Zacatlán con 1,456.10 ha (25.42%), Ixtacamaxtitlán con 842.29 ha (14.71%) y Amixtlán con 762.23 ha (13.31%).

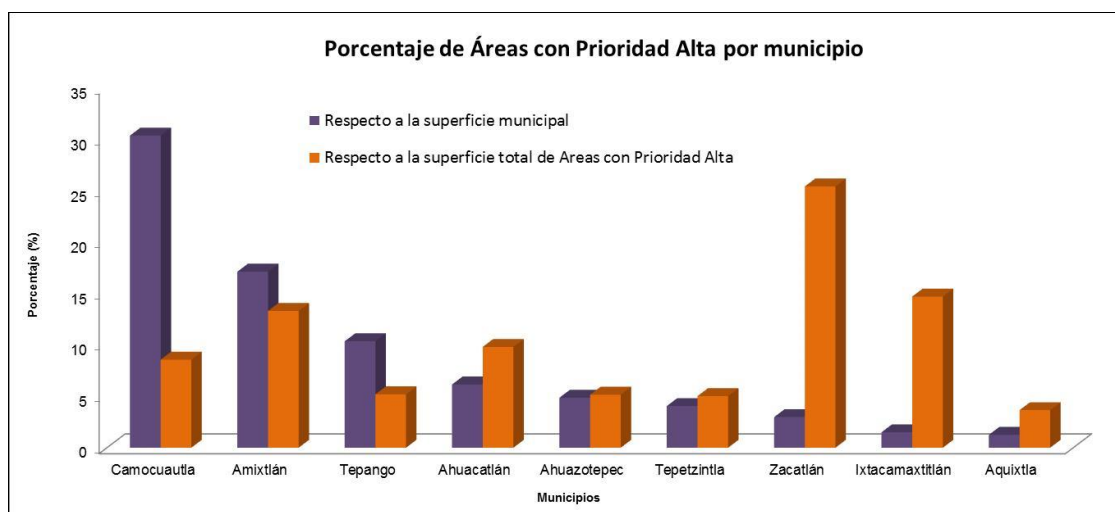


Figura 4.5. Áreas con prioridad alta para municipios de la UMAFOR Zacatlán.

Los municipios de Zacatlán e Ixtacamaxtitlán aun cuando presentan la mayor superficie de áreas con prioridad alta, éstas se encuentra muy dispersas lo que complica su atención e inclusión en programas de pago por servicios ambientales; aunque es precisamente por esta condición (fragmentación) que su conservación se vuelve necesaria para evitar la continuidad del deterioro de los recursos naturales. Por otro lado, los municipios de Amixtlán, Ahuacatlán y Camocuautla presentan menos superficie de áreas con prioridad alta, aunque más compactas, lo que puede facilitar su manejo y la implementación de estrategias por categoría. La distribución de las áreas prioritarias en sus diferentes categorías se observa a detalle en el Anexo 4.1, donde se muestran la distribución de las mismas a nivel municipal.

Los servicios ambientales hidrológicos incluyen varios beneficios como son: Recarga de acuíferos, mantenimiento de la calidad de agua, reducción de sedimentos de la cuenca, conservación de manantiales, reducción del riesgo de inundaciones, regulación de los flujos pluviales, regulación de la erosión, entre

otros (Madrid, 2011; Perevochtchikova y Vázquez, 2011). Bajo este enfoque, esta investigación se concretó en uno de estos beneficios hidrológicos (recarga de acuíferos), dado que para cada servicio específico los criterios utilizados pueden ser diferentes y sobre todo interactuar de formas diversas.

De esta manera, se obtuvieron las áreas prioritarias para conservación del servicio ambiental hidrológico específico (recarga de acuíferos) que como se muestra en la Figura 4.6 se localizan en diferentes lugares a las zonas elegibles 2013 para pago de servicios ambientales hidrológicos (CONAFOR, 2013b).

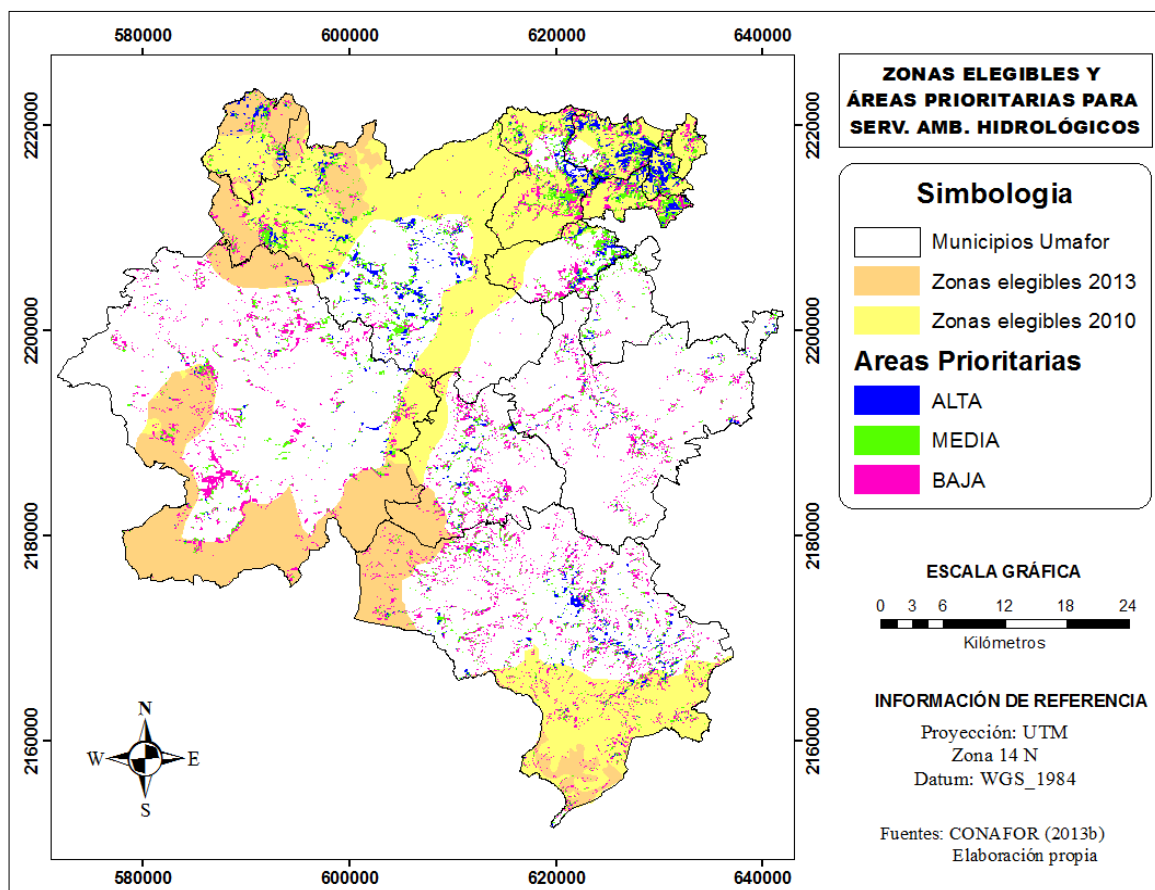


Figura 4.6. Ubicación de zonas elegibles para PSAH y áreas prioritarias para conservación de SAH en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Una de las estrategias implementadas en la UMAFOR Zacatlán para la conservación de recursos forestales, ha sido el programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), siendo las áreas elegibles bajo los criterios emitidos por la CONAFOR, las sujetas a este tipo de estrategia. Algunos de los

criterios utilizados en esta delimitación de áreas elegibles y en los requisitos establecidos en la convocatoria correspondiente, se consideran limitantes para la inclusión de áreas que pudieran ser importantes en la provisión de servicios ambientales específicos, entre los cuales se encuentran: Superficie mínima requerida (100 ha), polígonos compactos de superficie arbolada con determinada cobertura forestal (>50%) y demás criterios de prelación (DOF, 2013) que minimizan la importancia de los factores del medio biofísico para la provisión de un determinado servicio ambiental.

Los municipios que han resultado beneficiarios desde 2003 por el PSAH, han sido Chignahuapan, Ahuazotepec, Zacatlán, y los límites entre Aquixtla e Ixtacamaxtitlán (CONAFOR, 2012; 2013a). En 2010, las áreas elegibles para PSAH incluían municipios de la parte noreste de la UMAFOR Zacatlán (CONAFOR, 2010), situación que ya no se dio en 2013; aunque los sistemas agroforestales no estén dentro de zonas elegibles, pueden acceder a este tipo de apoyos (DOF, 2013). Sin embargo, ninguno de los municipios mencionados y otros del área de estudio han sido apoyados por el PSAH, considerando que las posibles razones para ello son la fragmentación por el tipo de tenencia de la tierra y la gran diversidad de usos de suelo tenidos. Por ello, la ubicación de áreas con prioridad alta en municipios como Amixtlán, Ahuacatlán, Tepetzintla, Camocuautla, Tepango de Rodríguez e Ixtacamaxtitlán representa una gran oportunidad de inclusión en programas de conservación por el servicio ambiental hidrológico evaluado.

Con lo anterior, se pretende romper con el esquema de polígonos arbolados compactos que requieren de grandes superficies (>100 ha) para poder ser apoyadas; impulsando, de esta manera, esquemas que consideren la diversidad de usos de suelo (agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, etc.). Lo anterior, congruente con lo que menciona Madrid (2011), que serían esquemas locales de PSA que tomaran en cuenta la diversidad de mosaicos ecosistémicos del territorio, y no sólo las superficies arboladas.

Esto también va relacionado con los usos de la tierra existentes en las áreas con prioridad alta resultantes en esta investigación, los cuales en la parte noreste de la UMAFOR Zacatlán, son combinaciones entre sistemas agroforestales, bosque mesófilo de montaña, vegetación secundaria, cultivos agrícolas perennes y pastizales; y que de acuerdo a lo que algunos autores mencionan (Bruijnzeel, 2004; Smith *et al.*, 2006; Madrid, 2011), los servicios ambientales hidrológicos no se proveen exclusivamente en coberturas forestales, sino también en usos alternativos de la tierra como pastizales, cultivos perennes y agricultura con buen manejo de suelo y agua.

La inclusión del riesgo de deforestación, como la característica específica que le otorga a las áreas su categoría de prioritarias, se considera importante, ya que de acuerdo al diagnóstico del área de estudio (SRMN, 2007) son los procesos de deforestación los que más han impactado en el deterioro y pérdida de los servicios ambientales en la región; situación que difiere de la opinión de autores como (Bruijnzeel, 2004; Schnepf y Cox, 2006; Madrid, 2011) quienes mencionan que la pérdida de servicios hidrológicos se debe más a malos manejos del suelo y el territorio (contaminación por agroquímicos, basura, aguas residuales, minería, etc.), que a la pérdida de bosques.

Lo anterior, se considera es diferente en cada región de estudio, y no necesariamente es un solo factor (deforestación o malos manejos del territorio) el que impacta en la pérdida de servicios hidrológicos, sino que precisamente es la combinación de varios de ellos lo que más pone en riesgo la provisión de los servicios ambientales. Finalmente, y para atender de manera adecuada el problema de pérdida del servicio ambiental en cuestión, se debe partir del diagnóstico del área de estudio, y atender desde todos los flancos los factores (sea deforestación, degradación, malos manejos del suelo, fragmentación, etc.) que inciden en esta pérdida.

En este sentido, es importante recordar que durante la construcción del modelo de riesgo de deforestación (ver Capítulo II) se identifican las principales causas (naturales, económicas, sociales) que intervienen en el proceso de deforestación a

nivel regional, y se tiene la posibilidad de generar las estrategias e invertir el recurso necesario para modificar las tendencias específicas que originan la deforestación, deteniendo este proceso y conservando, de manera efectiva y a largo plazo, los recursos naturales y servicios ambientales en riesgo.

Así también, para atender otras posibles causas de la pérdida de servicios hidrológicos en la región, los resultados de la presente investigación permiten un manejo integral pero diferenciado del territorio, al generar estrategias específicas para cada categoría (alta, media, baja) de área prioritaria (Figura 4.6) y de áreas aptas (ver Capítulo III), buscando mantener o mejorar las condiciones del territorio para el servicio hidrológico en cuestión, a través del manejo adecuado de los diferentes usos de la tierra.

Las áreas prioritarias optimizan los recursos invertidos en la conservación y manejo sustentable de recursos naturales, por ello deben ser la base de políticas públicas con este enfoque; y para una correcta identificación de estas áreas, se requiere la aplicación de metodologías que permitan los análisis cuantitativos de los elementos objeto de interés. Al respecto, la combinación de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), Regresión Logística (RL) y Algebra de Mapas (AM) en un ambiente de Sistemas de Información Geográfica (SIG) integra una metodología adecuada para la identificación de áreas prioritarias, siendo ésta la utilizada y propuesta en la presente investigación.

Dentro de las ventajas de la utilización de esta metodología se encuentran: (1) La determinación de la aptitud o potencial del territorio para cualquier objetivo o actividad, sin límites de criterios a introducir y analizar, (2) Permite el análisis detallado y cuantitativo de las amenazas del objeto de conservación, (3) Puede aplicarse a escalas regional o local, con límites políticos-administrativos, biofísicos, territoriales, etc., (4) Permite la integración de otras técnicas metodológicas, (5) Al arrojar resultados por separado, da opción de adicionar y combinar resultados de otros análisis (aptitud para otros servicios ambientales, otras amenazas) para enriquecer el resultado final de áreas prioritarias.

Algunas desventajas que se observaron, en el desarrollo de la presente investigación, para la metodología propuesta, son: (1) Las restricciones de disponibilidad de información espacial para todos los criterios y variables que se requieren en los diferentes análisis (aptitud, amenazas); (2) La divergencia de escalas de la información espacial disponible, lo cual se agudiza en estudios a nivel local; y (3) La falta de actualización de la información espacial disponible.

Para fortalecer lo anterior, se sugiere asumir con mucho cuidado la información espacial a utilizar en los diferentes análisis; generando y actualizando, siempre que sea posible, dicha información dado que los resultados estarán en función de la cantidad y calidad de la información utilizada.

Por último, respecto a la validación en campo de las diferentes categorías de áreas prioritarias, se comprobó que las obtenidas a través de la presente investigación concuerdan con las áreas identificadas a nivel municipal como importantes para conservación, debido a que son áreas donde se encuentran fuentes de agua (manantiales) que abastecen las poblaciones aledañas, y que están bajo presión constante por cambios de uso de la tierra, por ubicarse cerca de centros de población, zonas agrícolas o pecuarias. Asimismo, mediante la validación se detectó el interés de la población por conocer más sobre sus recursos naturales y por poder participar en proyectos integrales que además de promover la conservación de sus ecosistemas, les brinden la oportunidad de aprovechar de manera sustentable los recursos de su región.

#### **4.5.2. Estrategias de manejo y conservación de las áreas prioritarias**

En el Cuadro 4.2 se proponen algunas estrategias de manejo que pueden llevarse a cabo en las áreas prioritarias identificadas para la UMAFOR Zacatlán, donde se indican los posibles actores involucrados en su implementación, seguimiento y participación. Posteriormente, se describen cada una de estas propuestas.

Cuadro 4.2. Estrategias propuestas para la atención de áreas prioritarias en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

<i>Estrategias / Actores</i>	CONAFOR	Gobierno Estatal	Gobierno Municipal	PST	ARS	Dueños de RN	Sociedad general
1. Fortalecer e iniciar presencia de asesoría	X	X	X	X	X		
2. Talleres de diagnóstico	X	X	X	X	X	X	
3. Programas de educación y capacitación ambiental	X	X	X	X	X	X	X
4. Canalizar fuentes de financiamiento	X	X	X	X	X		
5. Realizar esquemas de manejo diferenciado				X	X	X	
6. Incidir en ordenamientos territoriales y políticas públicas		X	X		X	X	

PST: Prestadores de Servicios Técnicos    ARS: Asociación Regional de Silvicultores de Chignahuapan-Zacatlán, A.C.

1. Fortalecer la presencia de asesoría para el manejo de recursos naturales, y dar inicio a la misma donde no exista, ya que ha sido uno de los factores que más ha limitado el aprovechamiento sustentable de los recursos, principalmente en la zona norte, noreste y sur de la UMAFOR Zacatlán. Lo anterior, mediante la instalación de promotoras forestales, presencia de prestadores de servicios técnicos, designación de responsables de ecología a nivel municipal.
2. Iniciar o dar seguimiento a talleres de diagnóstico para el manejo sustentable de recursos naturales, donde se haga partícipes a los habitantes que se encuentran dentro y alrededores a cada categoría de áreas prioritarias.
3. Al mismo tiempo, iniciar programas de educación y capacitación ambiental a diferentes niveles de población, con la finalidad de que la misma reconozca y

valore en todos los sentidos sus recursos naturales (forestales, suelo, agua, aire, etc), y las diferentes formas de manejo que pueden aplicar para el aprovechamiento sustentable de los mismos.

4. Canalizar fuentes de financiamiento a través de la generación de mercados locales de pago por servicios ambientales hidrológicos, y de diversas instituciones relacionadas a la conservación; donde la fragmentación de la tenencia de la tierra y la diversidad de usos no sean un obstáculo para que las áreas prioritarias puedan acceder a este tipo de apoyos para su conservación y buen manejo.
5. Realizar esquemas de manejo diferenciado para cada categoría de área prioritaria (baja, media, alta) y usos de la tierra, como: Programas de conservación de especies nativas, reconversión o recuperación de áreas forestales, manejo orgánico de sistemas agroforestales, etc.
6. Incidir en los ordenamientos territoriales y en las políticas públicas de todos los niveles para la inversión de recursos que garanticen la conservación y manejo sustentable de las áreas prioritarias identificadas bajo la metodología propuesta.

Algunas estrategias aquí propuestas son de manera general para las áreas identificadas como prioritarias, ya que hacerlo de manera específica requiere de un diagnóstico más profundo de las condiciones biofísicas, ambientales, socioeconómicas y legales de dichas áreas, y de la población que se encuentra dentro o aledaña a las mismas.

Así también, la implementación de las mismas, requiere en primer lugar de la difusión y seguimiento de los resultados obtenidos en la presente investigación, lo cual se pretende realizar a través de reuniones, talleres, conferencias, congresos, etc., abarcando de manera escalonada la diversidad de actores involucrados e interesados en el manejo y aprovechamiento adecuado de los recursos forestales de la UMAFOR Zacatlán. Siendo esto, una etapa posterior al presente trabajo de investigación.



## 4.6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- a) La metodología utilizada permitió, por un lado, el análisis cuantitativo de los criterios del medio biofísico que optimizan la identificación de áreas aptas para recarga hídrica subterránea, a través de la herramienta de Evaluación Multicriterio (EMC). Por otro lado, permitió el análisis cuantitativo de una de las amenazas más importantes para la continua provisión de este servicio ambiental hidrológico, que es el proceso de deforestación, generando escenarios futuros de esta amenaza, a través de técnicas como: Análisis multitemporal de imágenes satelitales y regresión logística. Finalmente, al combinar los resultados obtenidos por separado para la aptitud del servicio ambiental y las amenazas al mismo, en un ambiente de sistemas de información geográfica, se obtuvo la identificación de áreas prioritarias para conservación.
- b) Se identificaron para la UMAFOR Zacatlán un total de 29,021 ha prioritarias para conservación del servicio hidrológico de recarga hídrica subterránea, que corresponde al 20.35% de la superficie forestal del área de estudio, y de las cuales 5,727 ha son de prioridad alta, 9,981 ha de prioridad media y 13,313 ha de prioridad baja. Los municipios considerados prioritarios, por su superficie con prioridad alta para conservación, son: Camocuautla, Amixtlán, Tepango de Rodríguez, Zacatlán e Ixtacamaxtitlán.
- c) Estos resultados permitieron la generación de estrategias de manejo y conservación de los recursos forestales del área de estudio, constituyéndose la identificación de áreas prioritarias como la etapa inicial en el diseño de políticas públicas para la inversión de recursos financieros en el ámbito de la conservación de recursos naturales.

## Recomendaciones

La metodología utilizada en esta investigación consideró la identificación de áreas prioritarias en un marco exclusivamente del medio biofísico y con su riesgo de deforestación como única amenaza a su permanencia; siendo posible y necesario incluir criterios de tipo social y económico que potencialicen la provisión del servicio hidrológico considerado (oferta y demanda de agua), así como otras amenazas (contaminación de fuentes de agua, vulnerabilidad por cambio climático, degradación y fragmentación de ecosistemas) que puedan aumentar la prioridad de las áreas identificadas.

Se sugiere también la realización de otros estudios que contemplen objetivos específicos para el servicio ambiental hidrológico (provisión de agua de calidad, recarga hídrica subsuperficial –manantiales-), o para otros servicios ambientales (captura de carbono, conservación de la biodiversidad, belleza escénica, otros), que combinados muestren un panorama más amplio de la potencialidad y prioridad de conservación de los diferentes usos de suelo en la región de estudio.

### 4.7. LITERATURA CITADA

Arriaga, C. L., V. Aguilar y J. M. Espinoza. (2009). Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad. *In*: Sarukhán, J. (Coord). Capital natural de México vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio (pp. 433-457). CONABIO, México, D.F.

Arriaga, C. L., J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (Coords.). (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México. Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tacerca.html>.

Arrivillaga, A., y N. Windevoxhel. (2008). Evaluación ecorregional del arrecife mesoamericano: Plan de conservación marina. The Nature Conservancy. Guatemala, GT. 30 p. + Anexos.

- Benegas, L. y J. León. (2009). Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas: la experiencia del programa Focuenas II. *Serie Técnica. Informe Técnico No. 378*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Bertzky, M., C. Ravilious, A. L. Araujo N., V. Kapos, D. Carrión, M. Chiu y B. Dickson. (2011). Carbono, biodiversidad y servicios ecosistémicos: Explorando los beneficios múltiples Ecuador. UNEP-WCMC. Cambridge, Reino Unido. 24 p.
- Blumentrath, S. (2011). Site prioritization models and their suitability for assessing and designing policy mixes for biodiversity conservation and ecosystem services provision: A comparison of software packages. Technical briefs, Issue No. 4. Obtenido de:  
<http://policymix.nina.no/Publications/Technicalbriefs.aspx>.
- Bruijnzeel, L. A. (2004). Los bosques tropicales y los servicios ambientales: Acaso los árboles impiden ver el terreno? Agriculture, Ecosystems and Environment. Facultad de Hidrología y las Ciencias de la Vida y la Tierra. Amsterdam, Holanda (en línea). Consultado en noviembre de 2013. Obtenido de:  
[http://intranet.catie.ac.cr/intranet/posgrado/recursos\\_naturales/Clase%204/Lecturas/Bruijnzeel\\_AGEE-Spanish\\_translation.pdf](http://intranet.catie.ac.cr/intranet/posgrado/recursos_naturales/Clase%204/Lecturas/Bruijnzeel_AGEE-Spanish_translation.pdf)
- Ceballos, G., E. Díaz P., H. Espinosa, O. Flores V., A. García, L. Martínez, E. Martínez M., A. Navarro, L. Ochoa, I. Salazar y G. Santos B. (2009). Zonas críticas y de alto riesgo para la conservación de la biodiversidad de México. *In: Sarukhán, J. (Coord). Capital natural de México vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio (pp. 575-600)*. CONABIO, México, D.F.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), TNC (The Nature Conservancy), PRONATURA (Pronatura, A.C.), y FCF-UANL (Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León). (2007). Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad terrestre de México: Espacios y especies. Talleres Gráficos de México, México, D.F. 128 p.

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2010). Zonas elegibles para PSAH 2010 (en línea). Consultado en abril de 2011. Obtenido de: <http://www.cnf.gob.mx:81/emapas/>.

\_\_\_\_\_. (2012). Información del programa de pago por servicios ambientales hidrológicos del período 2003 al 2011. Oficio GSAB-0319/12 de la Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque. Zapopan, Jal.

\_\_\_\_\_. (2013a). Resultados de PRONAFOR 2013 y PROARBOL 2012 (en línea). Consultado en noviembre de 2013. Obtenido de: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/tramites-y-servicios/apoyos-2013> y <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/tramites-y-servicios/apoyos-2012>.

\_\_\_\_\_. (2013b). Zonas elegibles para PSAH 2013 (en línea). Consultado en noviembre de 2013. Obtenido de: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/tramites-y-servicios/apoyos-2013>.

Dykstra, D. P. 1984. Mathematical programming for natural resource management. McGraw-Hill Book Company. New York, U.S.A. 309 p.

DOF (Diario Oficial). (2013). Reglas de operación del Programa Nacional Forestal 2013. Tercera Sección, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 8 de marzo de 2013. México, D.F.

Eastman, J. R. (2006). IDRISI Andes. Guide to GIS and image processing. Clark University Worcester, Massachusetts, U.S.A. 328 p.

Escalante, E. T. (2003). Determinación de prioridades en las áreas de conservación para los mamíferos terrestres de México, empleando criterios biogeográficos. Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Zoología. 74 (2):211-237.

ESRI. (2011). Software ArcGIS, versión 10.0. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc.

Fonseca, G. W., H. Chaves K., F. Alice G., y J. M. Rey B. (2011). Cambios en la cobertura del suelo y áreas prioritarias para la restauración forestal en el Caribe de Costa Rica. Comunicación Técnica Recursos Naturales y Ambiente. 59-60: 99-107.

- Galindo, G., D. Marcelo, N. R. Bernal, L. K. Vergara y J. C. Betancourt. (2009). Planificación ecorregional para la conservación de la biodiversidad en el Caribe Continental Colombiano. Serie Planificación Ecorregional para la Conservación de la Biodiversidad No. 1. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Agencia Nacional de Hidrocarburos, The Nature Conservancy e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C. Colombia. 24 p.
- Geneletti, D., F. Orsi, E. Lanni y A.C. Newton. (2011). Identificación de áreas prioritarias para la restauración de bosques secos. *In*: Newton, A. C. y Tejedor, N. (Eds). Principios y práctica de la restauración del paisaje forestal: Estudios de caso en las zonas secas de América Latina (pp. 289-326). Gland, Suiza: UICN y Madrid, España: Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas.
- Gómez, D. M., y J. I. Barredo C. (2006). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 2ª edición. Alfaomega, México, D.F. 279 p.
- Gómez, B. E. y R. de Groot. (2007). Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. Ecosistemas. 16 (3): 4-14.
- Groves, C., L. Valutis, D. Vosick, B. Neely, K. Wheaton, J. Touval y B. Runnels. (2000). Diseño de una geografía de la esperanza: Manual para la planificación de la conservación ecorregional. Volúmenes I y II, 2ª edición, The Nature Conservancy. 215 p.
- Harris, N. L., S. Petrova, F. Stolle and S. Brown. (2008). Identifying optimal areas for REDD intervention: East Kalimantan, Indonesia as a case study. Environ. Res. Lett. 3 (2008) 035006.
- Jennings, M. D. (2000). Gap analysis: Concepts, methods, and recent results. Landscape Ecology. 15: 5-20.
- Kappelle, M. (Coord). (2007). Estándares para la planificación ecorregional: Lecciones aprendidas del Programa Parques en Peligro en América Latina y el Caribe. The Nature Conservancy. San José, Costa Rica. 20 p.

- Koleff, P., M. Tambutti, I.J. March, R. Esquivel, C. Cantú y A. Lira N. (2009). Identificación de prioridades y análisis de vacíos y omisiones en la conservación de la biodiversidad de México. *In: Sarukhán, J. (Coord), Capital natural de México vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 651-718). CONABIO. México, D.F.
- Koleff, P. y T. Urquiza H. (coords.). (2011). Planeación para la conservación de la biodiversidad terrestre en México: Retos en un país megadiverso. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México, D.F. 250 p.
- Loos, S. (2011). Marxan analyses and prioritization of conservation areas for the Central Interior Ecoregional Assessment. *BC Journal of Ecosystems and Management*. 12 (1): 88–97. Obtenido de <http://jem.forrex.org/index.php/jem/article/>
- Machín, H. M. M. y M. Casas V. (2006). Valoración económica de los recursos naturales: Perspectiva a través de los diferentes enfoques de mercado. *Revista Futuros*. 4 (13): 9.
- Madrid, R. L. (2011). Los pagos por servicios ambientales hidrológicos: Más allá de la conservación pasiva de los bosques. *Investigación Ambiental* 3(2): 52-58.
- March, I. J., M.A. Carvajal, R.M. Vidal, J.E. San Román y G. Ruiz. (2009). Planificación y desarrollo de estrategias para la conservación de la biodiversidad. *In: Sarukhán, J. (Coord), Capital natural de México vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 545-573). CONABIO. México, D.F.
- Margules, C. R., R. L. Pressey and P. H. Williams. (2002). Representing biodiversity: data and procedures for identifying priority areas for conservation; *J. Biosci. (Suppl. 2)*, 27 (4):309-326.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2003). *Ecosystems and human well-being: A framework for assessment*. Island Press. Washington, DC. 245 p.
- Parker, C., A. Mitchell, M. Trivedi, y N. Mardas. (2009). *The Little REDD+ Book*. (2a ed.). Global Canopy Foundation. Oxford, United Kingdom. 136 p.

- Perevochtchikova, M. y A. Vázquez. (2011) Los servicios ambientales hidrológicos como herramienta alternativa de gestión integral del recurso hídrico en el Distrito Federal. II Congreso Nacional de Cuencas Hidrográficas, Villahermosa, México. 18-20 de mayo 2011.
- Pressey, R. L. and K. H. Taffs. (2001). Scheduling priority conservation action in production landscapes: priority areas in western New South Wales defined by irreplaceability and vulnerability to vegetation loss. *Biological Conservation*. 100: 345-376
- PRONATURA (Pronatura México, A.C.) y TNC (The Nature Conservancy). (2007). Biodiversidad del centro y occidente de México. Planeación Ecorregional: Avances y Próximos Pasos. Parques en Peligro / USAID. México. 80 p.
- Razola, I., J.M. Rey B., E. de la Montaña y L. Cayuela L. (2006). Selección de áreas relevantes para la conservación de la biodiversidad. *Ecosistemas*. 15 (2):34-41.
- Rentería, A., L., C. Cantú A., E. Estrada C., J. Marmolejo M., y F. González S. (2011). Representatividad de los tipos de vegetación en las áreas naturales protegidas de Durango. *Rev. Mex. Cien. For.* 2 (3):69-82.
- Sánchez, K., F. Jiménez, S. Velásquez, M. Piedra y E. Romero. (2004). Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica. *Comunicación técnica de Recursos Naturales y Ambiente*, 88-95.
- Sánchez, C. V., P. Illoldi, M. Linaje, T. Fuller y S. Sarkar. (2008). ¿Por qué hay un costo en posponer la conservación de la diversidad biológica en México? *CONABIO. Biodiversitas*. 76: 7-12.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2011). Protocolo de áreas prioritarias 2011: Marco metodológico. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 104 p.
- \_\_\_\_\_. (2010). Visión de México sobre REDD+. Hacia una estrategia nacional. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 57 p.

- \_\_\_\_\_. (2006). Métodos para identificar áreas prioritarias de conservación de la biodiversidad para el ordenamiento ecológico. *In*: SEMARNAT. Manual del proceso de ordenamiento ecológico (pp. 223-254) (Anexo 6). México, D. F.
- Schnepf, M., y C. Cox (eds). (2006). Environmental benefits of conservation on cropland: The status of our knowledge. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.
- Smith, M., D. de Groot, D. Perrot M. and G. Bergkamp. (2006). Pay establishing payments for watershed services. Gland, Switzerland: IUCN. Reprint, Gland, Switzerland.
- SMRN (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2007). Diagnóstico Socioeconómico y de Manejo Forestal de la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán. Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan-Zacatlán, A.C. Puebla, México. 281 p.
- Vargas, G. A., S. Aguilar M., M.A. Castillo S., E. Esquivel B., M.A. Hernández V., A.M. López G. y S. Quechulpa M. (2009). Programa estatal para la compensación por servicios ecosistémicos: Una propuesta para Chiapas. CONABIO. Corredor Biológico Mesoamericano México Serie Acciones/Número 5. México, D. F. 54 p.



## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES E IMPLICACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES GENERALES**

México, siendo un país megadiverso, posee múltiples recursos naturales que proporcionan a la sociedad una amplia gama de bienes y servicios ambientales. Estos recursos han sido aprovechados y manejados a través del tiempo y espacio. Sin embargo, en ocasiones, la sociedad en el afán de satisfacer sus necesidades ha hecho mal uso y manejo de los recursos naturales de los que dispone, poniendo en riesgo la permanencia y productividad de los mismos. Procesos de degradación y deforestación de los ecosistemas forestales, son algunos de los efectos del uso indiscriminado e irracional de los recursos naturales.

La Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) Zacatlán, Puebla, no escapa a esta situación, reportándose en su Estudio Regional Forestal del 2007 (ERF) (ver Capítulo I) la existencia de procesos de deforestación y degradación en un 14% de su superficie en un periodo de 14 años (1986-2000), trayendo como consecuencias pérdidas en biodiversidad, cantidad y calidad de agua, deslaves e inundaciones, entre otras.

En este contexto, surge la necesidad de generar estrategias que promuevan la conservación y manejo sustentable de los recursos forestales; y siendo la conservación de grandes superficies muy costosa, se requiere de la identificación de áreas prioritarias que reúnan los más altos valores ambientales y más altos riesgos de permanencia, con la finalidad de optimizar los recursos invertidos en la conservación de las mismas.

Por tanto, y derivado de las necesidades de investigación planteadas en el ERF de la UMAFOR Zacatlán, Puebla, se realizó la presente investigación cuyo objetivo general fue la integración y aplicación de una metodología que permitiera la adecuada identificación de áreas prioritarias para conservación de servicios ambientales hidrológicos, como una herramienta que sirva a los tomadores de

decisiones en la generación y aplicación de estrategias para la conservación y manejo adecuado de los recursos forestales de la región.

De esta manera, el estudio se integró de cinco capítulos: (I) Marco de referencia; (II) Detección y análisis de cambios de uso de la tierra y escenarios de deforestación; (III) Identificación de zonas aptas para proveer servicios ambientales hidrológicos (recarga hídrica subterránea); (IV) Metodologías para determinar áreas prioritarias: Una propuesta para su identificación en la Sierra Norte de Puebla; y (V) Conclusiones e implicaciones.

El Capítulo I consistió en una caracterización del área de estudio y de los temas de referencia considerados en la investigación. Contiene un diagnóstico de las características biofísicas, sociales y económicas del área de estudio, así como una revisión del cambio de uso de la tierra y de la identificación de áreas prioritarias para conservación en México y en la UMAFOR Zacatlán, concluyendo con un análisis de la problemática y necesidades de investigación planteadas para la región en su Estudio Regional Forestal.

Este marco de referencia, permitió entender la necesidad de realizar estudios de cambios de uso de la tierra, de preferencia a nivel regional y local, dado que la influencia de los factores que inciden en los procesos de deforestación difieren de acuerdo a la escala, y deben ser entendidos al nivel de donde se requiera tomar decisiones. Así también, permitió detectar la necesidad de identificar áreas prioritarias para conservación de servicios ambientales, en el contexto de realmente proteger las áreas que así lo requieran, adecuando el manejo de los recursos forestales para su mejor aprovechamiento.

El Capítulo II realizó la detección y análisis de cambios de uso de la tierra en la UMAFOR Zacatlán en un período de 24 años (1986-2010), y determinó los diferentes patrones (biofísicos, sociales y económicos) que rigen tales cambios, obteniendo las probabilidades de cambio de usos de la tierra de la superficie forestal del área de estudio. Con base en esta información y la proyección del crecimiento poblacional, se obtuvieron e identificaron espacialmente las áreas

forestales con riesgo futuro de deforestación en un período de 20 años (2010-2030).

Con los resultados del Capítulo II, se concluyó que en la UMAFOR Zacatlán, aun cuando existe a nivel regional una ganancia de superficie forestal de 5,185.35 ha, el proceso de deforestación es importante de atender, dado que registró en el período analizado (1986-2010) la pérdida de 23,691.51 ha de superficie forestal, propiciando la fragmentación de los diversos ecosistemas forestales de la región, y generando pérdidas en la cantidad y calidad de los servicios ambientales que éstos proveen a la sociedad. Por otro lado, se obtuvo que las variables que más influyen en la deforestación a nivel regional son las de proximidad a vías de comunicación, a zonas urbanas y a zonas agropecuarias, la pendiente, la altitud, la marginación muy alta y la densidad poblacional; por lo cual, atender desde la base estos factores a través de la planeación estratégica de los programas de desarrollo, ayudará a detener el proceso de deforestación.

Por último, se obtuvieron para este Capítulo II, las áreas con riesgo futuro de deforestación, siendo para la UMAFOR Zacatlán un total de 31,152 ha que corresponde al 21.8% de la superficie forestal actual, y de las cuales un 15.75% (4,906 ha) son de riesgo alto de deforestación. Esta información permite una adecuada planificación de desarrollo regional y la implementación de estrategias que eviten la pérdida de las áreas identificadas con algún tipo de riesgo de deforestación.

En otro tenor, el Capítulo III realizó la identificación de áreas aptas para recarga hídrica subterránea, considerado éste un servicio ambiental hidrológico importante en la región de estudio. Se determinaron los factores biofísicos básicos que contribuyen a la recarga hídrica y mediante la combinación espacial de los mismos, se identificaron para la UMAFOR Zacatlán un total de 21,315.35 ha con aptitud alta para la provisión de este servicio ambiental hidrológico, 169,995.01 ha con aptitud media y 75,100.09 ha con aptitud baja. Los resultados obtenidos sugieren que la UMAFOR Zacatlán posee una aptitud media para la recarga hídrica subterránea, lo cual es posible mejorar mediante la aplicación de

estrategias de manejo que recuperen las condiciones del territorio para una mayor capacidad de provisión de este servicio ambiental.

El Capítulo IV se centró primero en una revisión y análisis comparativo de las metodologías utilizadas para identificar áreas prioritarias para conservación de recursos naturales. Este análisis permitió conocer las fortalezas y limitaciones de las diferentes metodologías e integrar la más apropiada al objetivo perseguido en la presente investigación. De esta manera, se realizó una combinación de diversas técnicas metodológicas (clasificación de imágenes satelitales, análisis multitemporal, regresión logística, evaluación multicriterio y álgebra de mapas) en un ambiente de sistemas de información geográfica, integrando una metodología que permitió la identificación de áreas prioritarias para conservación de servicios ambientales hidrológicos en la UMAFOR Zacatlán, Puebla.

Los resultados obtenidos indican que en la UMAFOR Zacatlán, existen zonas dispersas que tienen alto potencial para la recarga hídrica subterránea y al mismo tiempo, son propensas de desaparecer por su riesgo de deforestación alto, convirtiéndose entonces en áreas con prioridad alta para su conservación (5,727.00 ha). Así también, existen zonas con media (9,981.00 ha) y baja (13,313.00 ha) prioridad para conservación, cuya inclusión en el manejo diferenciado de los recursos forestales se vuelve necesaria.

La correcta identificación de áreas prioritarias permite una adecuada toma de decisiones para la conservación y manejo sustentable de los recursos forestales de la región de estudio, garantizando además que los recursos invertidos en este sector sean optimizados, obteniendo los mayores beneficios ambientales a corto y largo plazo.

## **5.2. IMPLICACIONES: FORTALEZAS Y DEBILIDADES**

### **Fortalezas**

El objetivo final de la presente investigación lo constituye la identificación de áreas prioritarias para conservación de servicios ambientales, y en este sentido, la

aplicación de una metodología adecuada acorde al concepto integral de áreas prioritarias, es fundamental. Derivado de ello, una de las principales fortalezas del presente estudio, es la integración de una metodología cuantitativa que reúne las características necesarias para analizar e identificar espacialmente áreas prioritarias para conservación de servicios ambientales hidrológicos.

En este sentido, la fortaleza de la metodología utilizada, es que permite la determinación y análisis cuantitativo de los elementos básicos que constituyen un área prioritaria, conformados en dos conceptos: (1) La aptitud de provisión del servicio ambiental y, (2) La modelación futura de sus amenazas. Adicionalmente, y tomando en cuenta las ventajas que cada una de las herramientas y técnicas metodológicas presentan por separado, se considera que la integración de las mismas, permite la identificación de áreas prioritarias con diferentes objetivos de conservación (hidrológicos, biodiversidad, captura de carbono, belleza escénica, etc), a diferentes escalas espacio-temporal (nacional, regional, municipal, local) y sin límites territoriales específicos, pudiendo ser estos tanto político-administrativos (estatal, municipal, ejidal) como biofísicos (cuenca, microcuenca) o cualquiera que el objetivo de conservación requiera (Unidad de Manejo Forestal).

Así también, permite la incorporación y combinación de tantos criterios, subcriterios y variables específicas, ajustándose a la información existente o generándola al nivel de detalle que se requiera, de acuerdo a la disponibilidad de recursos humanos y financieros para ello.

Por último, el desarrollo y resultados de la presente investigación tienen implicaciones positivas, en el ámbito de conservación de recursos forestales, de tipo político-legal, científico, social, económico y ambiental, de la manera siguiente:

- Político-legal: La información generada, servirá como base sólida y una herramienta valiosa para la toma de decisiones, la construcción y aplicación de las políticas públicas para la conservación y manejo sustentable de los recursos forestales de la región de estudio. La metodología utilizada podría ser una propuesta para redireccionar la forma en que la CONAFOR selecciona sus

áreas prioritarias, dando un enfoque más regional y una mayor importancia a los criterios naturales, por sobre los socioeconómicos. Adicionalmente, las bases de datos y demás productos obtenidos, podrán servir en un momento dado como insumos para la construcción de leyes, reglamentos y normas oficiales, así como toma de decisiones asociadas al servicio ambiental analizado.

- Científico: Las metodologías desarrolladas en la presente investigación tienen la finalidad de ser reproducibles y perfectibles a nivel regional y local, motivando el desarrollo de otras investigaciones que incidan en el diseño de políticas preventivas de conservación de los recursos naturales; adicionalmente, la información y bases de datos generados pueden ser utilizadas en otras investigaciones más específicas y necesarias para el área de estudio. Con esto se contribuye a la generación de conocimiento y procesos metodológicos confiables para el estudio de los recursos naturales.
- Económico: El desarrollo de la investigación permitió la generación de estrategias y alternativas de manejo de los recursos naturales existentes en las áreas prioritarias, lo cual podría incidir directamente en mejorar la calidad de vida de los poseedores de dichos recursos y poblaciones aledañas a las áreas prioritarias, a través de proyectos de aprovechamiento y conservación de sus recursos. Así también, contribuye como insumo para una valoración económica de los recursos forestales existentes en la región, y generación de mercados basados en mecanismos locales de pago por servicios ambientales.
- Social: La generación de alternativas productivas a través del aprovechamiento sustentable de los recursos forestales, coadyuvan a mejorar las condiciones de vida de los habitantes de la región; además de fortalecer el conocimiento y valoración de la población hacia la importancia de los recursos naturales que se encuentran en su área de entorno.
- Ambiental: La conservación de áreas con alto valor ambiental y con riesgo de deforestación, adicionalmente permitirían proteger otros servicios ecosistémicos.

## **Debilidades**

La presente investigación se basa en la modelación espacial, por lo que los resultados están en función de la información cartográfica utilizada en los análisis respectivos, constituyendo esta situación una limitante para la aplicación de la metodología aquí propuesta. La disponibilidad de la información temática (criterios, subcriterios, variables) en formato espacial limita tanto el análisis de aptitud de provisión del servicio ambiental, como la modelación futura de sus amenazas; siendo además, la escala de esta información temática, otro aspecto importante a considerar, dado que aunque la información estuviera disponible, si la escala no es la adecuada, los análisis arrojarían resultados muy generales que a nivel local o regional pudieran carecer de utilidad.

Otra situación a considerar, es la calidad y actualización de la información disponible, dado que si ésta no representa la realidad actual, cualquier resultado derivado de la misma carecerá de valor. Adicionalmente, las herramientas y técnicas metodológicas utilizadas requieren del conocimiento apropiado para su manejo y de la intervención del factor humano en varios de los procesos, constituyéndose en una debilidad importante para la correcta aplicación de las mismas.

### **5.3. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

El desarrollo del presente trabajo permitió identificar áreas de oportunidad para la investigación en el ámbito de los recursos forestales de la región de estudio, las cuales se mencionan en los párrafos siguientes.

Fortalecer los resultados de la presente investigación, a través de la adición de criterios biofísicos y socioeconómicos para obtener la potencialidad y factibilidad de las áreas para recarga hídrica subterránea, así como realizar el mismo proceso con sus respectivos criterios para otros servicios hidrológicos. Así también, adicionar otras variables en el análisis de cambios de uso de la tierra, y generar

diversos escenarios de riesgo de deforestación; y de ser posible incluir el análisis de otras amenazas (deterioro de ecosistemas, vulnerabilidad al cambio climático, etc.).

Realizar la identificación de áreas prioritarias para otros servicios ambientales como biodiversidad, captura de carbono, belleza escénica, etc., e incluir en el análisis las amenazas de riesgo de permanencia correspondiente a cada servicio ambiental analizado; con la finalidad de potencializar la conservación de áreas con los mayores valores ambientales y en mayor riesgo de permanencia.

Realizar los estudios de análisis de cambios de uso de la tierra y generación de escenarios futuros de riesgo, a nivel municipal, incluyendo el análisis de políticas públicas y el impacto que estas han tenido en la conservación de los recursos forestales, que conlleven a explicar de mejor manera los cambios observados y generen información para la toma de decisiones a nivel municipal.

Ejecutar estudios específicos para generar, actualizar y detallar la información espacial de variables biofísicas y socioeconómicas del área de estudio, la cual es útil para cualquier tipo de investigación que se desee desarrollar en el ámbito de sistemas de información geográfica.

En los municipios donde se identifiquen áreas prioritarias para conservación, realizar investigaciones de valoración económica de los servicios ambientales y costos de oportunidad de cambios de uso de la tierra, lo cual permitirá la generación de estrategias adecuadas para la creación de mercados locales de pago de servicios ambientales.

Por último, el seguimiento y difusión de los resultados de la presente investigación a través de reuniones con tomadores de decisiones y talleres con la población involucrada y sociedad en general, permitirá la aplicación de estrategias para la conservación y manejo sustentable de los recursos forestales de la región, y el cumplimiento del objetivo principal de este estudio.



## CAPÍTULO VI

### ANEXOS

Anexo 2.1. Metadatos de las imágenes satelitales utilizadas en la clasificación de usos de la tierra en la UMAFOR Zacatlán.

Escenas 1986

Data Set Attribute	Attribute Value	Attribute Value	Attribute Value
Landsat Scene Identifier	LT50250461986027AAA10	LT50260461986082XXX03	LT50250471986075XXX09
Spacecraft Identifier	LANDSAT_5	LANDSAT_5	LANDSAT_5
Sensor Mode	N/A	N/A	N/A
Station Identifier	AAA	XXX	XXX
Day Night	DAY	DAY	DAY
WRS Path	025	026	025
WRS Row	046	046	047
WRS Type	2	2	2
Data Category	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL
Date Acquired	1986/01/27	1986/03/23	1986/03/16
Start Time	1986:027:16:20:19.55881	1986:082:16:25:18.30769	1986:075:16:19:39.78269
Stop Time	1986:027:16:20:46.19244	1986:082:16:25:44.94531	1986:075:16:20:06.42888
Data Type Level 1	TM L1T	TM L1T	TM L1T
Acquisition Quality	9	9	9
Sun Elevation	38.10410948	51.59631993	50.14479974
Sun Azimuth	135.79623671	115.61435918	117.10444065
Scene Center Latitude	20.23843 (20°14'18.35"N)	21.17222 (21°10'19.99"N)	20.23899 (20°14'20.36"N)
Scene Center Longitude	-97.26527 (97°15'54.97"W)	-99.94401 (99°56'38.44"S)	-98.80150 (98°48'05.40"W)
Corner Upper Left Latitude	21.15797 (21°09'28.69"N)	21.16990 (21°10'11.64"N)	19.73243 (19°43'56.75"N)
Corner Upper Left Longitude	-97.96004 (97°57'36.14"W)	-97.70446 (97°42'16.06"S)	-98.69842 (98°41'54.31"S)
Corner Upper Right Latitude	20.90226 (20°54'08.14"N)	-97.71993 (97°43'11.75"S)	19.71513 (19°42'54.47"N)
Corner Upper Right Longitude	-96.20135 (96°12'04.86"W)	19.29380 (19°17'37.68"N)	-96.49185 (96°29'30.66"S)
Corner Lower Left Latitude	19.56881 (19°34'07.72"N)	-99.93273 (99°55'57.83"W)	-96.51937 (96°31'09.73"S)
Corner Lower Left Longitude	-98.32067 (98°19'14.41"W)	19.29170 (19°17'30.12"N)	17.86161 (17°51'41.80"N)
Corner Lower Right Latitude	19.31561 (19°18'56.20"N)	21.16990 (21°10'11.64"N)	-98.70173 (98°42'06.23"W)
Corner Lower Right Longitude	-96.57923 (96°34'45.23"W)	-97.70446 (97°42'16.06"S)	17.84607 (17°50'45.85"N)

## Escenas 1995

Data Set Attribute	Attribute Value	Attribute Value	Attribute Value
Landsat Scene Identifier	LT50250461995340XXX01	LT50250471995340XXX01	LT50260461995315XXX02
Spacecraft Identifier	LANDSAT_5	LANDSAT_5	LANDSAT_5
Sensor Mode	N/A	N/A	N/A
Station Identifier	XXX	XXX	XXX
Day Night	DAY	DAY	DAY
WRS Path	025	025	026
WRS Row	046	047	046
WRS Type	2	2	2
Data Category	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL
Date Acquired	1995/12/06	1995/12/06	1995/11/11
Start Time	1995:340:15:53:36.97513	1995:340:15:54:00.99588	1995:315:15:58:50.32706
Stop Time	1995:340:15:54:03.96219	1995:340:15:54:27.98294	1995:315:15:59:17.31313
Data Type Level 1	TM L1T	TM L1T	TM L1T
Sensor Anomalies	N	N	N
Acquisition Quality	9	9	7
Sun Elevation	34.35312188	35.27928034	39.02018356
Sun Azimuth	138.22026911	137.35152285	135.1700312
Scene Center Latitude	20.21796 (20°13'04.66"N)	18.76829 (18°46'05.84"N)	20.23899 (20°14'20.36"N)
Scene Center Longitude	-97.16955 (97°10'10.38"W)	-97.50822 (97°30'29.59"W)	-98.80150 (98°48'05.40"W)
Corner Upper Left Latitude	21.13749 (21°08'14.96"N)	19.68711 (19°41'13.60"N)	21.15853 (21°09'30.71"N)
Corner Upper Left Longitude	-97.86424 (97°51'51.26"W)	-98.19725 (98°11'50.10"W)	-99.49627 (99°29'46.57"W)
Corner Upper Right Latitude	20.88181 (20°52'54.52"N)	19.43374 (19°26'01.46"N)	20.90282 (20°54'10.15"N)
Corner Upper Right Longitude	-96.10578 (96°06'20.81"W)	-96.45467 (96°27'16.81"W)	-97.73757 (97°44'15.25"W)
Corner Lower Left Latitude	19.54833 (19°32'53.99"N)	18.09752 (18°05'51.07"N)	19.56937 (19°34'09.73"N)
Corner Lower Left Longitude	-98.22481 (98°13'29.32"W)	-98.55398 (98°33'14.33"W)	-99.85691 (99°51'24.88"W)
Corner Lower Right Latitude	19.29516 (19°17'42.58"N)	17.84644 (17°50'47.18"N)	19.31617 (19°18'58.21"N)
Corner Lower Right Longitude	-96.48359 (96°29'00.92"W)	-96.82717 (96°49'37.81"W)	-98.11546 (98°06'55.66"W)

## Escenas 2011

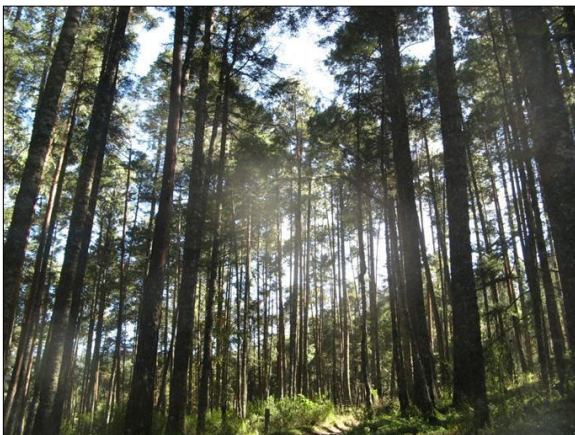
Data Set Attribute	Attribute Value	Attribute Value	Attribute Value
Landsat Scene Identifier	LT50250462011016CHM0	LT50250472011016CHM0	LT70260462011023EDC00
Spacecraft Identifier	LANDSAT_5	LANDSAT_5	LANDSAT_5
Sensor Mode	BUMPER	BUMPER	BUMPER
Station Identifier	CHM	CHM	CHM
Day Night	DAY	DAY	DAY
WRS Path	025	025	026
WRS Row	046	047	046
WRS Type	2	2	2
Data Category	NOMINAL	NOMINAL	NOMINAL
Date Acquired	2011/01/16	2011/01/16	2011/01/23
Start Time	2011:016:16:43:08.47788	2011:016:16:43:34.94113	2011:023:16:52:50.0004999
Stop Time	2011:016:16:43:35.09075	2011:016:16:44:01.55400	2011:023:16:53:16.7545000
Data Type Level 1	TM L1T	TM L1T	TM L1T
Sensor Anomalies	N	N	N
Acquisition Quality	9	9	9
Sun Elevation	40.11158831	47.2576881	46.74123383
Sun Azimuth	143.88837723	133.62608998	136.26579285
Scene Center Latitude	20.23472 (20°14'04.99"N)	18.78431 (18°47'03.52"N)	20.22607 (20°13'33.85"N)
Scene Center Longitude	-97.23127 (97°13'52.57"W)	-97.57766 (97°34'39.58"W)	-98.76881 (98°46'07.72"W)
Corner Upper Left Latitude	21.15426 (21°09'15.34"N)	19.70313 (19°42'11.27"N)	21.16401 (21°09'50.44"N)
Corner Upper Left Longitude	-97.92603 (97°55'33.71"W)	-98.26675 (98°16'00.30"W)	-99.48743 (99°29'14.75"W)
Corner Upper Right Latitude	20.89856 (20°53'54.82"N)	19.44974 (19°26'59.06"N)	20.90097 (20°54'03.49"N)
Corner Upper Right Longitude	-96.16737 (96°10'02.53"W)	-96.52400 (96°31'26.40"W)	-97.67523 (97°40'30.83"W)
Corner Lower Left Latitude	19.56510 (19°33'54.36"N)	18.11355 (18°06'48.78"N)	19.54906 (19°32'56.62"N)
Corner Lower Left Longitude	-98.28665 (98°17'11.94"W)	-98.62352 (98°37'24.67"W)	-99.85283 (99°51'10.19"W)
Corner Lower Right Latitude	19.31190 (19°18'42.84"N)	17.86245 (17°51'44.82"N)	19.28876 (19°17'19.54"N)
Corner Lower Right Longitude	-96.54525 (96°32'42.90"W)	-96.89656 (96°53'47.62"W)	-98.05911 (98°03'32.80"W)

Anexo 2.2. Compendio fotográfico de las diferentes coberturas que integran las categorías de uso de la tierra.

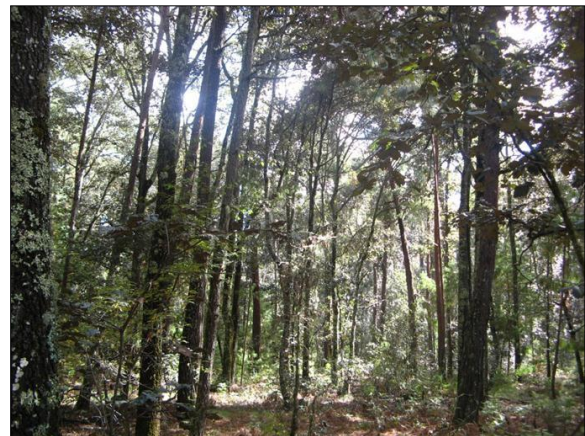
### USO FORESTAL



Bosque de Pino



Bosque de *Abies*



Bosque de Encino-Pino





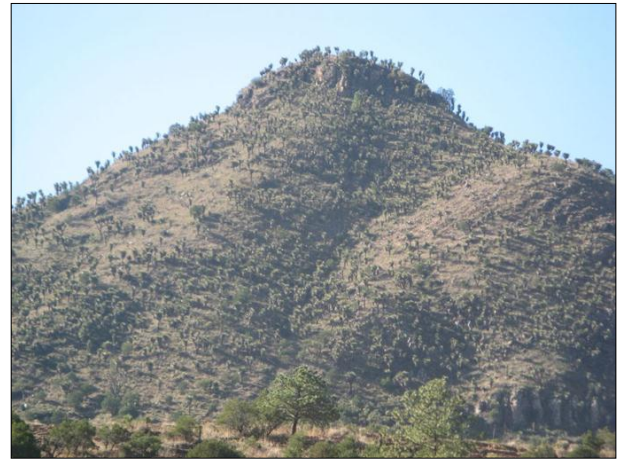
Bosque de *Juniperus*



Bosque Mesófilo de Montaña



Bosque de Pino y Matorrales



Matorral Desértico Rosetófilo



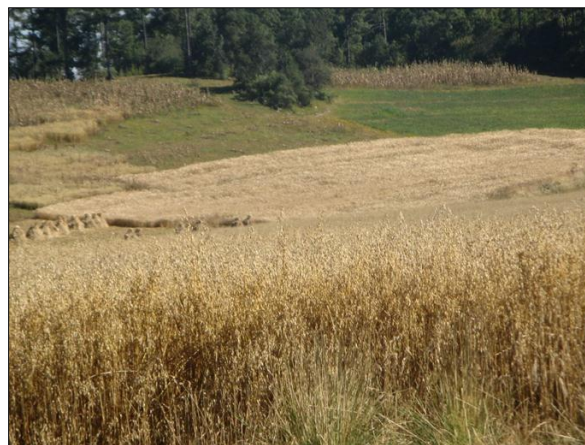
Vegetación Secundaria



Sistemas Agroforestales (cafetales)



## USO AGRÍCOLA



Terrenos cultivados y en descanso



Terrenos cultivados y en descanso

## USO CUERPOS DE AGUA



Laguna de Chignahuapan y bordo de agua en Aquixtla

## USO PECUARIO



Zonas de pastizales

## USO RESIDENCIAL



Tetela de Ocampo



Coatepec

Anexo 2.3. Estadísticas básicas y medidas de separabilidad de los campos de entrenamiento de cada categoría utilizada en la clasificación de imágenes.

### IMAGEN LANDSAT TM 2010

Bandas	Forestal		Agrícola		Pecuario		C. de Agua	
	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.
1	9.29	3.43	22.53	5.87	18.84	3.45	33.63	2.31
2	7.87	2.71	26.53	7.77	18.14	3.41	42.33	2.59
3	13.49	2.91	37.90	10.39	23.19	4.92	48.39	3.61
4	43.70	10.06	56.94	11.45	67.19	15.69	22.58	5.26
5	23.98	7.97	65.30	12.93	57.02	11.11	3.88	1.85
7	13.96	5.35	55.42	12.31	36.27	10.00	3.96	1.55

Separabilidad de las clases 2010			
Medida de separabilidad: Divergencia Transformada			
Separabilidad media: 1.990926			
Mínima separabilidad: 1.950659			
Máxima separabilidad: 2.00000			
CLASES	Forestal	Agrícola	Pecuario
Agrícola	1.999691		
Pecuario	1.950659	1.995206	
Cuerpos de agua	2.000000	2.000000	2.000000

### IMAGEN LANDSAT TM 1995

Bandas	Forestal		Agrícola		Pecuario		C. de Agua	
	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.
1	5.27	1.72	16.76	3.62	11.60	2.38	26.27	4.24
2	12.72	2.07	27.83	4.92	20.37	3.30	42.83	5.10
3	9.54	1.79	29.59	5.83	18.12	3.94	43.21	6.51
4	35.67	12.72	49.67	7.86	62.02	8.59	23.63	4.42
5	18.06	7.01	61.10	8.68	51.87	8.68	2.54	0.79
7	10.07	3.97	51.23	8.78	31.96	7.09	2.76	0.88



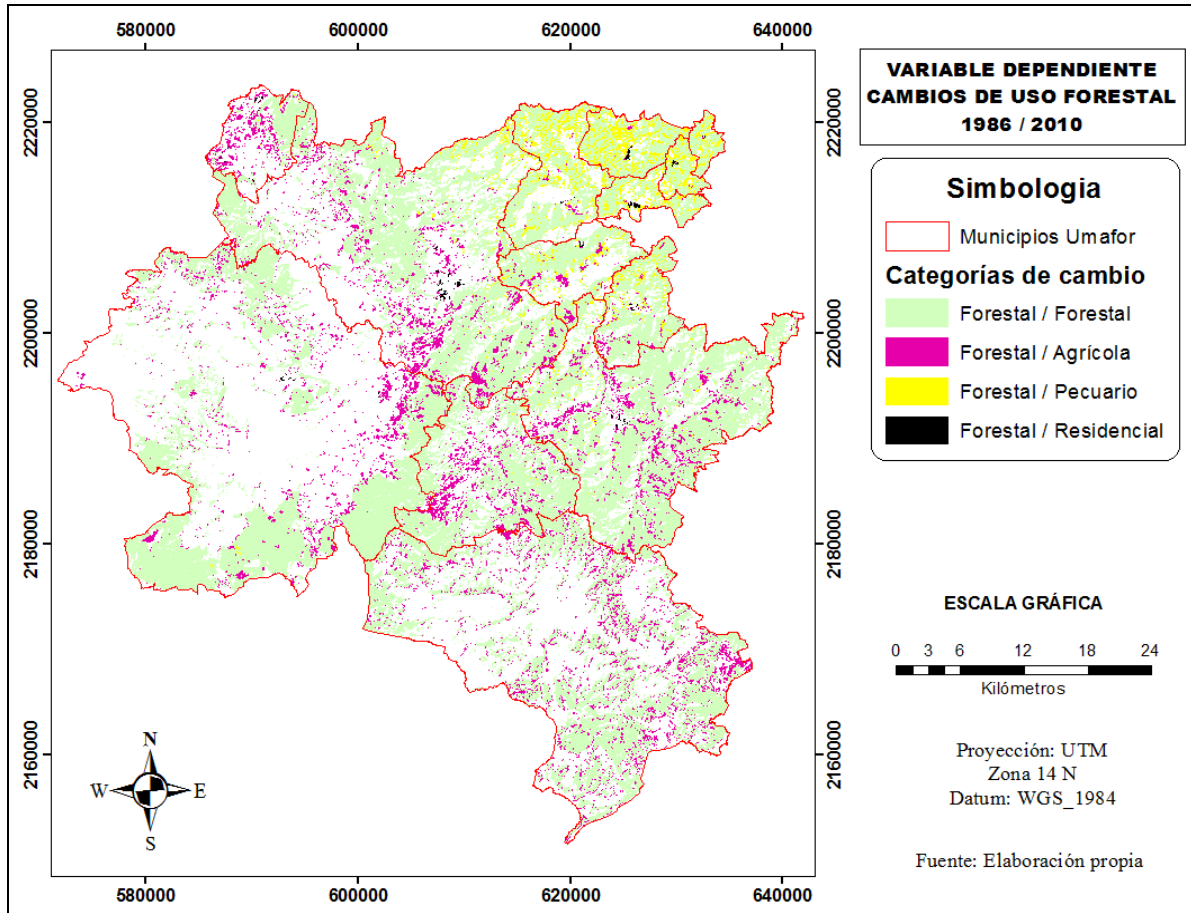
Separabilidad de las clases 1995			
Medida de separabilidad: Divergencia Transformada			
Separabilidad media: 1.982358			
Mínima separabilidad: 1.908701			
Máxima separabilidad: 2.00000			
CLASES	Forestal	Agrícola	Pecuario
Agrícola	2.000000		
Pecuario	1.985450	1.908701	
Cuerpos de agua	2.000000	2.000000	2.000000

### IMAGEN LANDSAT TM 1986

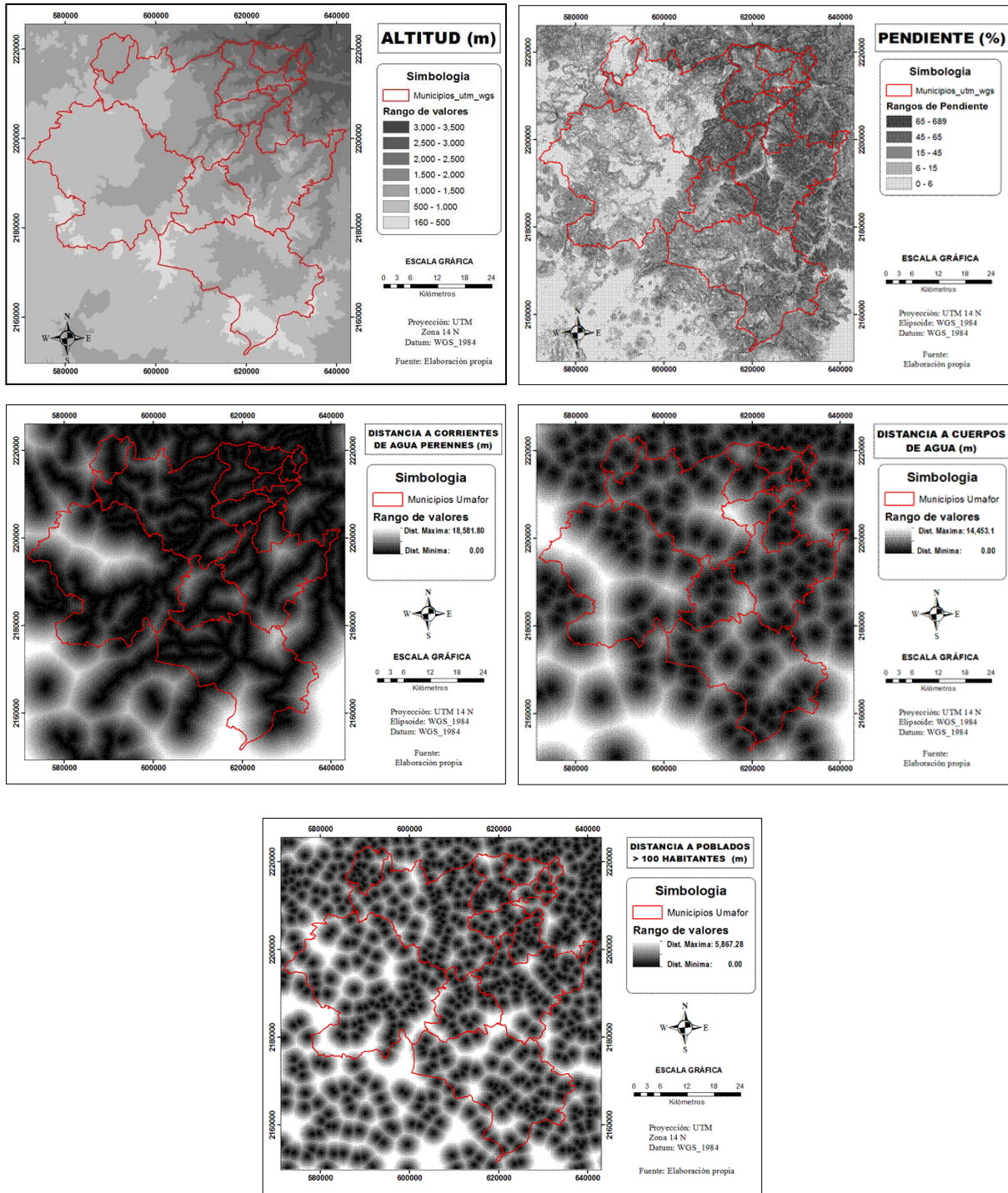
Bandas	Forestal		Agrícola		Pecuario		C. de Agua	
	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.	Media	Desv. Estd.
1	27.90	15.55	37.07	4.98	28.09	4.26	51.10	7.47
2	19.88	14.60	33.99	6.39	23.26	3.32	56.46	11.00
3	11.26	12.33	29.90	6.92	17.02	3.05	44.22	9.06
4	40.54	18.43	52.83	12.11	52.93	10.03	25.52	10.31
5	20.62	16.38	57.39	10.98	46.94	6.70	2.67	1.19
7	12.51	15.33	48.16	9.48	30.64	5.84	2.05	1.20

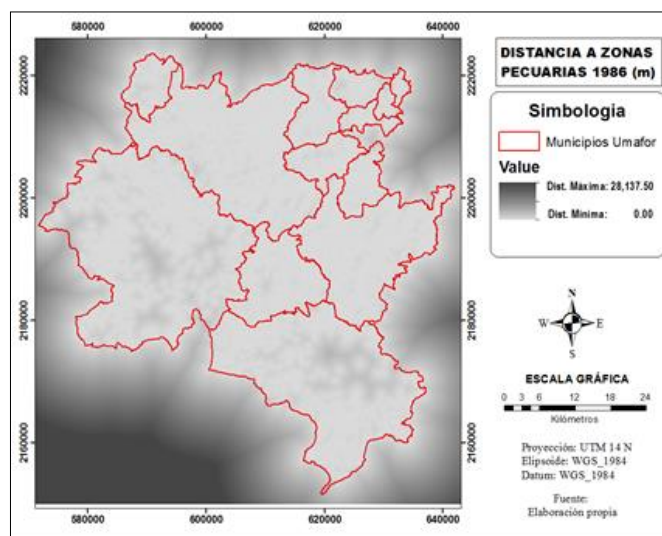
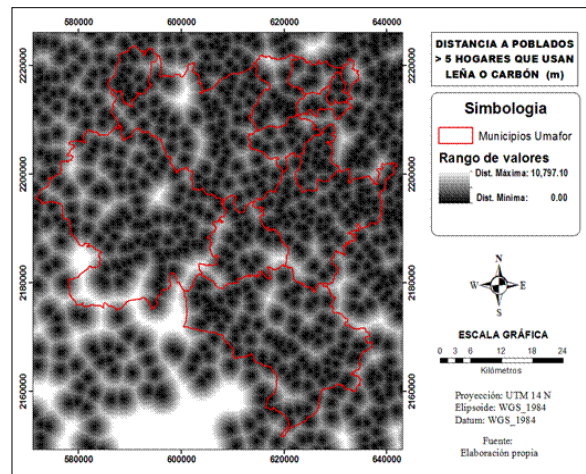
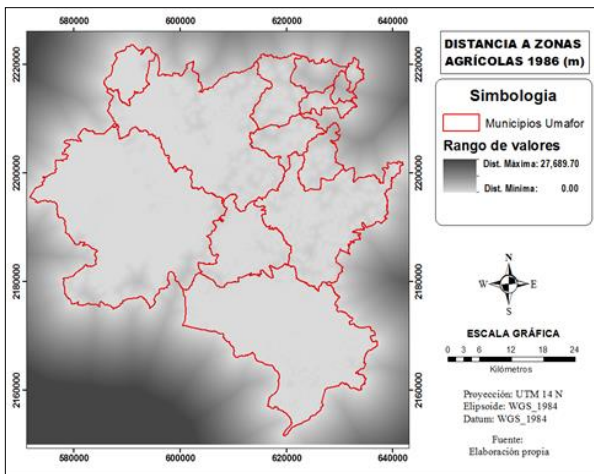
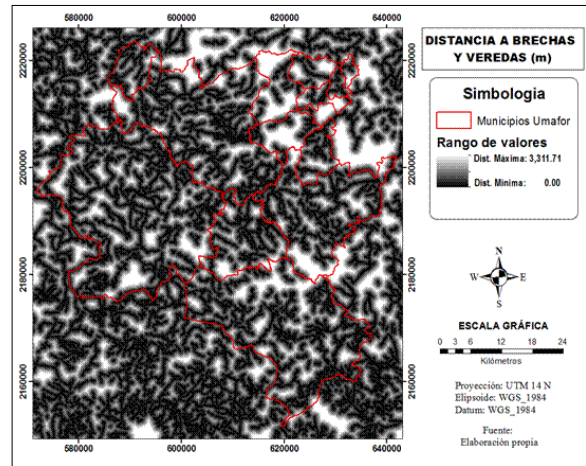
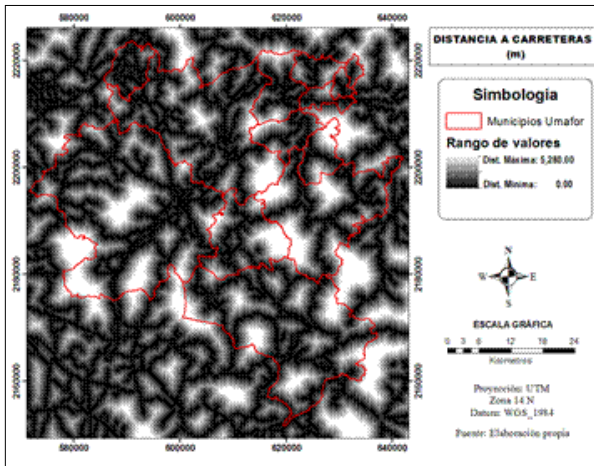
Separabilidad de las clases			
Medida de separabilidad: Divergencia Transformada			
Separabilidad media: 1.991840			
Mínima separabilidad: 1.978448			
Máxima separabilidad: 2.00000			
CLASES	Forestal	Agrícola	Pecuario
Agrícola	1.990369		
Pecuario	1.982226	1.978448	
Cuerpos de agua	2.000000	2.000000	2.000000

Anexo 2.4. Variable dependiente: Mapa de cambios de uso forestal a otros usos.

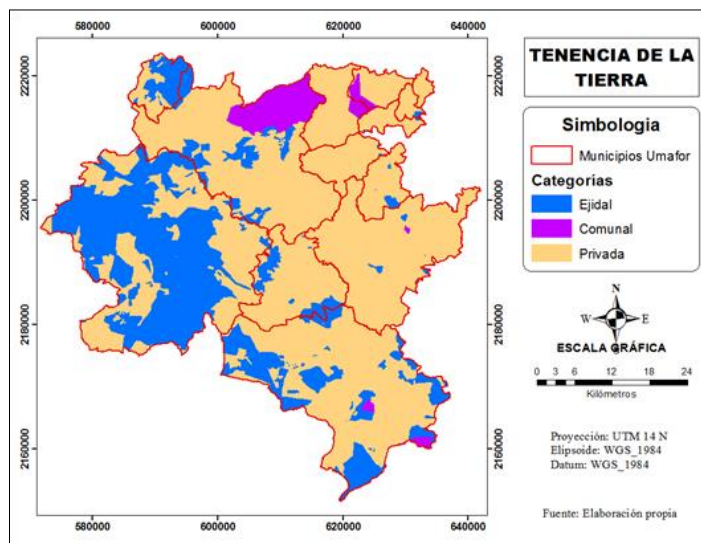
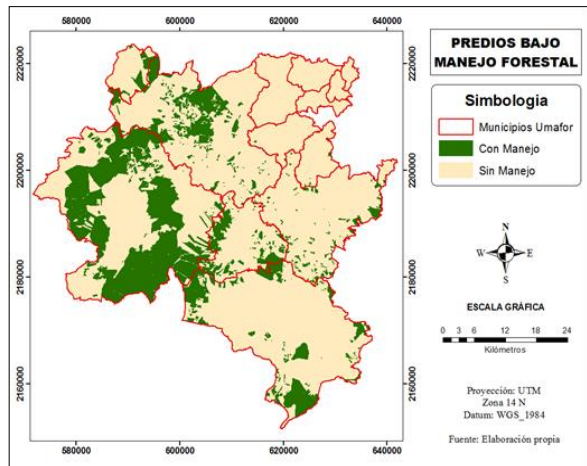
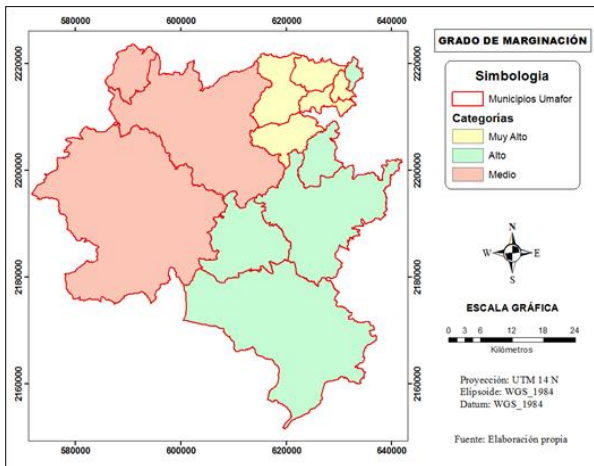
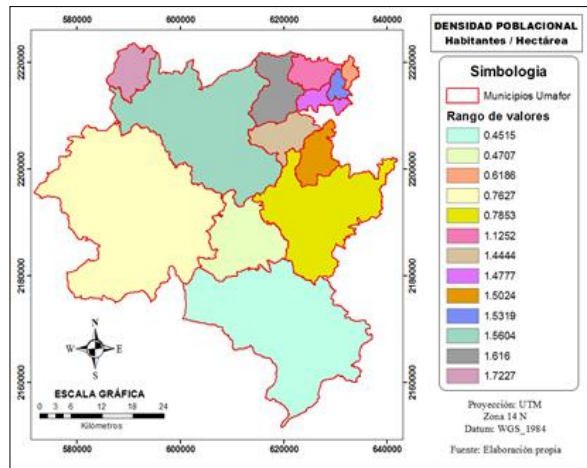
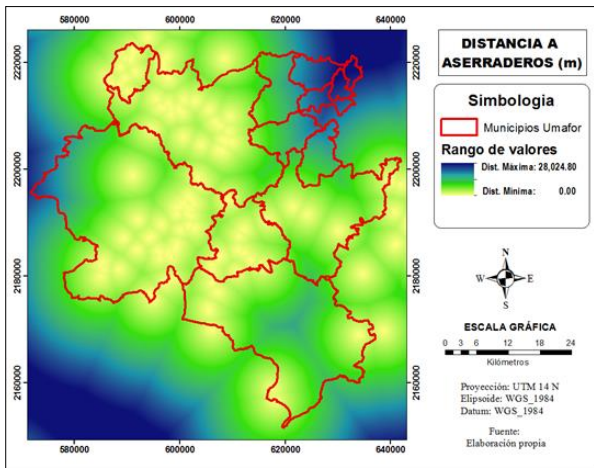


Anexo 2.5. Mapas de las variables independientes utilizadas en este estudio.









Anexo 3.1. Encuesta para la identificación de áreas aptas para la recarga de acuíferos

**ENCUESTA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS APTAS PARA LA  
RECARGA DE ACUÍFEROS  
PRESENTACIÓN**

Estimado integrante del Panel de Expertos:

La presente encuesta es parte de la investigación de tesis de Maestría en Ciencias que realizo y tiene como objetivo definir la importancia entre criterios y subcriterios biofísicos que influyen en la determinación de Áreas Aptas para la Recarga de Acuíferos en la Unidad de Manejo Forestal Zacatlán, Puebla, México.

Por lo anterior, y sabiendo de su amplia experiencia y conocimiento sobre el tema, se le solicita sea tan amable de contestar las preguntas contenidas en la encuesta, asegurándole que los datos e información que aquí se manejen serán estrictamente confidenciales y se utilizarán solo para los fines mencionados. Se agradece ampliamente su apoyo y disposición a participar en la presente investigación. Muchas gracias.

Atentamente

Ing. Honoria Chávez González  
Estudiante de maestría  
Posgrado Forestal

**Sección I: PERFIL DEL EXPERTO**

1. Nombre del encuestado: \_\_\_\_\_
2. Máximo nivel de estudios: \_\_\_\_\_
3. Área de Especialización: \_\_\_\_\_
4. Ocupación actual: \_\_\_\_\_
5. Años de experiencia en el área: \_\_\_\_\_
6. Correo electrónico: \_\_\_\_\_

## Sección II. IMPORTANCIA DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

Para la presente investigación (identificación de áreas aptas para recarga de acuíferos), y de acuerdo a la información disponible, se consideraron los criterios y subcriterios mostrados en la Figura 1 (Ver al final).

El objetivo de esta sección es ponderar la importancia de los criterios y subcriterios, al realizar comparaciones entre pares. La comparación por pares es una medida que expresa la preferencia relativa entre criterios, generando una escala y atribuyendo valores numéricos a juicios subjetivos, de acuerdo a la intensidad de importancia mostrada en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Escala de intensidad de importancia (Saaty, 1980)**

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Las dos condiciones contribuyen de igual manera al objetivo.
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio moderadamente a favor de una condición sobre la otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio fuertemente a favor de una condición sobre la otra.
7	Importancia muy fuerte o importancia demostrada	Una condición es fuertemente favorecida sobre la otra.
9	Extrema importancia	La evidencia favorece una condición sobre la otra en el orden de afirmación más alto posible.
2,4,6,8	Valores intermedios entre los valores de escala	Cuando es necesario un término medio.

### INSTRUCCIONES:

Tomar un elemento de la **Fila de criterios** para determinar su importancia con respecto a cada elemento de las **Columnas de criterios** escribiendo en la celda de intersección el valor de importancia relativa que representa el criterio indicado en la Fila con respecto al criterio indicado en la Columna; el valor será tomado de la escala Saaty (Cuadro 1). En caso de que el criterio indicado en la columna sea de mayor importancia que el indicado en la Fila, la forma de representarlo será anteponiendo "1/" al valor de importancia que usted determine.

**Nota:** Sólo llene los recuadros en blanco como en el ejemplo mostrado a continuación.

## EJEMPLO

En el Cuadro 2 se muestra un ejemplo de una matriz de comparación, donde 3 criterios son comparados uno con otro. En la comparación directa de los criterios C1 y C3, en este ejemplo, el criterio C1 ha sido considerado fuertemente más importante que C3, por lo que el valor "5" ha sido asignado a la posición correspondiente en la matriz. En caso contrario, si se hubiese considerado el criterio C1 fuertemente menos importante que el criterio C3, el valor correspondiente en la posición de la matriz sería de "1/5". Lo cual es el caso de la comparación directa entre los criterios C2 y C3, donde se consideró que el criterio C2 es moderadamente menos importante que el criterio C3 (1/3).

Cuadro 2. Ejemplo de matriz de comparación por pares

		COLUMNAS		
		CRITERIOS	C1	C2
FILAS	C1	1	4	5
	C2	X	1	1/3
	C3	X	X	1

## ENCUESTA

1. De los **Criterios** establecidos para identificar las áreas aptas para **recarga de acuíferos**, indique en la matriz el grado de importancia de cada uno de ellos con respecto al otro de acuerdo a su conocimiento y experiencia, utilizando la escala de Saaty (Cuadro 1).

		COLUMNAS				
		CRITERIOS	Cobertura vegetal	Topografía	Clima	Suelo
FILAS	Cobertura vegetal	1				
	Topografía	X	1			
	Clima	X	X	1		
	Suelo	X	X	X	1	
	Geología	X	X	X	X	1



2. Dentro del criterio **CLIMA** se tienen contemplados **dos subcriterios**, indique en la matriz el grado de importancia de cada uno de ellos con respecto al otro de acuerdo a su conocimiento y experiencia, utilizando la escala de Saaty (Cuadro 1).

		COLUMNAS	
		Precipitación	Evapotranspiración Real
FILAS	Precipitación	1	
	Evapotranspiración Real	X	1

3. Dentro de los criterios considerados, ¿Qué otros subcriterios incluiría para la definición de áreas aptas para la recarga de acuíferos?

CRITERIOS	SUBCRITERIOS
COBERTURA VEGETAL	
TOPOGRAFIA	
CLIMA	
SUELO	
GEOLOGÍA	

4. ¿Qué otros criterios y sus respectivos subcriterios consideraría Usted como importantes a considerar para la definición de áreas aptas para la recarga de acuíferos?

CRITERIOS	SUBCRITERIOS

## 5. Comentarios adicionales

---

---

---

---

## Sección III. ANEXOS

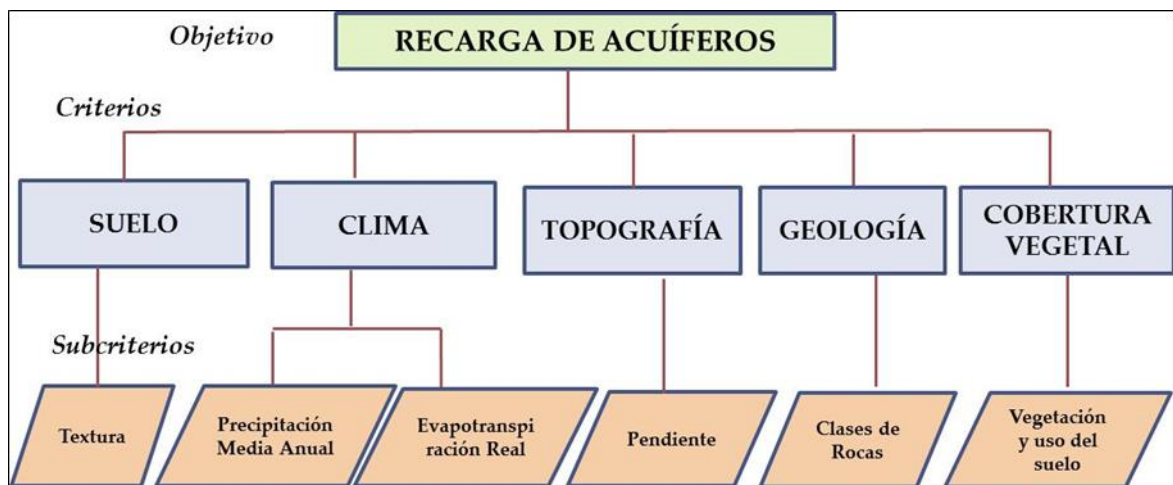


Figura 1. Organización Jerárquica de Criterios y Subcriterios para Recarga de Acuíferos

**GRACIAS POR SU PARTICIPACIÓN**

Anexo 4.1. Mapas por municipio de áreas prioritarias para conservación de servicios ambientales hidrológicos.

