



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

ÁREAS PRIORITARIAS PARA CAPTURA DE CARBONO EN LOS MUNICIPIOS DE CHIGNAHUAPAN–ZACATLÁN, PUEBLA

CRUZ HUERTA CARMINA

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 PARA CAPTURA DE CARBONO EN LOS MUNICIPIOS DE CHIGNAHUAPAN- ZACATLÁN, PUEBLA** realizada por la **Ing. Carmina Cruz Huerta** 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
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



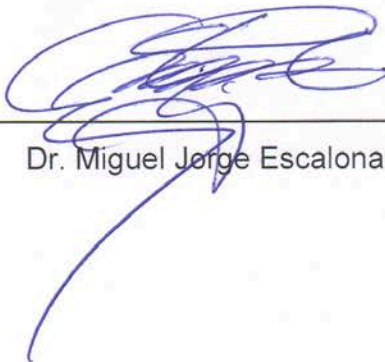
Dr. Tomás Martínez Trinidad

Asesor:



Dr. Manuel de Jesús González Guillén

Asesor:



Dr. Miguel Jorge Escalona Maurice

Montecillo, Texcoco, México, 2014

ÁREAS PRIORITARIAS PARA CAPTURA DE CARBONO EN LOS MUNICIPIOS DE CHIGNAHUAPAN-ZACATLÁN, PUEBLA

PRIORITY AREAS FOR CARBON SEQUESTRATION IN CHIGNAHUAPAN AND ZACATLÁN MUNICIPALITIES, PUEBLA STATE

Carmina Cruz Huerta
Colegio de Postgraduados, 2014

Las áreas prioritarias de conservación son una herramienta importante que permiten optimizar el aprovechamiento y conservación de los recursos naturales y forestales. La presente investigación tiene como objetivo definir las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono mediante la combinación del riesgo de deforestación y aptitud de captura de carbono con la finalidad de generar estrategias de manejo y conservación. La metodología incluye sistemas de información geográfica y técnicas cuantitativas para determinar las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono. La metodología incluyó: (1) Determinación del riesgo futuro de deforestación en dos escalas espaciales; y (2) Identificación de áreas prioritarias de conservación de captura de carbono en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán. Los resultados indican que a nivel regional (ambos municipios) hay 13,063.8 ha con riesgo de deforestación, mientras que a nivel municipal se identificaron 10,966.6 ha para Chignahuapan y 4,405.5 ha en Zacatlán, indicando que el análisis escalar es una herramienta útil para la generación de estrategias respecto al aprovechamiento de los recursos naturales y forestales. En relación a la superficie definida con prioridad alta de conservación de captura de carbono se determinaron 628 ha para Chignahuapan y 310 ha para Zacatlán. Por tanto, la metodología permitió realizar un análisis cuantitativo y la identificación de las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono, considerando una amenaza futura (riesgo de deforestación); dicha información permitió plantear estrategias de manejo y conservación de los recursos naturales a una escala municipal.

Palabras claves. Escalas espaciales, riesgo de deforestación, captura de carbono, regresión logística

ABSTRACT

Priority conservation areas are an important tool for optimizing the use and conservation of natural resources and forests. Therefore the objective of this research was to identify priority conservation areas for carbon sequestration by combining the risk of deforestation and carbon sequestration suitability in order to develop strategies for management and conservation. The methodology includes Geographical Information Systems and quantitative techniques to determine priority conservation areas for carbon sequestration. The methodology was divided in two phases: (1) Determination of future risk of deforestation in two spatial scales; and (2) Identification of priority conservation areas for carbon sequestration in Zacatlán and Chignahuapan municipalities. The results showed that there are 13,063.8 ha with risk of deforestation at a regional level (both municipalities). At a municipal level, 10,966.6 ha were identified with risk of deforestation in Chignahuapan and 4,405.5 ha in Zacatlán. This indicates that the scale analysis is a useful tool to develop strategies for forest and natural resources management. It was also determined that there are 628 ha in Chignahuapan and 310 ha in Zacatlán with high conservation priority for carbon sequestration. By using this methodology it was possible to make a quantitative analysis and to identify priority conservation areas for carbon sequestration considering a future threat (risk of deforestation). Such information allowed postulating strategies for management and conservation of the natural resources at a municipality level.

Keywords: Spatial scales, risk of deforestation, carbon sequestration, logistic regression

AGRADECIMIENTOS

A Dios por concederme sabiduría para entender, memoria para retener y métodos para aprender.

Al Colegio de Postgraduados, especialmente al Postgrado en Ciencias Forestales por la oportunidad otorgada para continuar con mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para el desarrollo de mis estudios.

A la Línea Prioritaria de Investigación 01 Manejo Sustentable de los Recursos Naturales, por el financiamiento proporcionado para el desarrollo de la investigación.

A los Drs. Tomás Martínez Trinidad y Manuel de Jesús González Guillen por sus conocimientos, orientación y el tiempo dedicado para la realización de esta investigación.

A los Drs. Miguel Jorge Escalona Maurice y Patricia Hernández de la Rosa por sus observaciones, sugerencias y consejos respecto a la investigación.

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., al Ing. Everit Mora Guzmán, Responsable de la Dirección Forestal de la Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial del estado de Puebla y a la Unión de Ejidos de Producción, Explotación y Comercialización Industrial, Agropecuaria y Forestal de la Sierra Norte de Puebla, por la valiosa información y apoyo otorgado.

A la Ing. Honoria Chávez González por las aportaciones y el equipo realizado para la exitosa culminación de la investigación.

Al Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas por la recurrente asesoría y consejos proporcionados para la realización de la investigación.

A todos mis amigos que me brindaron su apoyo incondicional durante este proceso.

DEDICATORIA

A mis padres: Cayetano[†] y Modesta por su amor, confianza y consejos brindados.

A mis hermanos: Javier, Nicasio, Angelina, Eli, Eloísa, Valentín, Arturo y Augusto (Beto) por su cariño por todos los momentos felices que hemos tenido.

A mis sobrinitos: Javier, Naiver, Olga, Yamel, Zoé[†], Eli, Emanuel, Diana, Ángel David, Ismael, Sinaí, Arturo y Xóchitl por cada momento de felicidad.

A las familias: Cruz Hernández y Cruz Carrillo por su apoyo moral.

A mis cuñadas por todo el ánimo brindado durante este proceso.

Arian por su amor, apoyo y amistad para salir adelante día a día.

CONTENIDO

	Página
CAPÍTULO I	1
CARACTERIZACIÓN DE LOS MUNICIPIOS DE CHIGNAHUAPAN- ZACATLÁN, PUEBLA Y HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 DESARROLLO POBLACIONAL Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MUNICIPIOS DE CHIGNAHUAPAN Y ZACATLÁN, PUEBLA	3
1.2.1 Chignahuapan, Puebla.....	3
1.2.2 Zacatlán, Puebla	16
1.3 HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL	29
1.3.1 Territorio.....	29
1.3.2 Ordenamiento territorial.....	30
1.3.3 Planificación	32
1.3.4 Áreas prioritarias	32
1.3.5 Riesgo de deforestación.....	34
1.3.6 Carbono aéreo	34
1.3.7 Aplicaciones de herramientas de planificación territorial.....	35
1.4 OBJETIVOS	37
1.5 HIPÓTESIS	37
1.6 LITERATURA CITADA.....	38
CAPÍTULO II	45
MODELANDO LA DEFORESTACIÓN FUTURA EN DOS ESCALAS ESPACIALES.....	45
2.1 INTRODUCCIÓN.....	45
2.2 OBJETIVOS	47
2.3 MÉTODOS Y MATERIALES	49
2.3.1 Clasificación y detección de los cambios de uso del suelo	49
2.3.2 Construcción del modelo probabilístico de deforestación	51
2.3.3 Estrategias de manejo para la superficie con riesgo de deforestación.....	54
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
2.4.1 Detección de los cambios de usos del suelo a nivel regional.....	55
2.4.2 Modelos probabilísticos de cambio de uso del suelo a nivel regional y municipal.....	60
2.4.3 Probabilidad de cambio de uso del suelo a nivel regional.....	68
2.4.4 Escenario base de riesgo de deforestación a nivel regional	69
2.4.5 Detección de los cambios de usos del suelo a nivel municipal	70
2.4.6 Probabilidad de cambio de uso forestal a nivel municipal	80
2.4.7 Escenario futuro riesgo de deforestación a nivel municipal.....	82
2.4.8 Comparación de escalas a nivel regional y municipal	83

2.4.9 Estrategias de las áreas con riesgo de deforestación.....	86
2.5 CONCLUSIONES.....	87
2.6 LITERATURA CITADA.....	88
CAPÍTULO III.....	93
DEFINICIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN PARA CAPTURA DE CARBONO.....	93
3.1 INTRODUCCIÓN.....	93
3.2 OBJETIVOS.....	96
3.3 MÉTODOS Y MATERIALES.....	96
3.3.1 Estimación del contenido de carbono aéreo.....	96
3.3.2 Determinación de la aptitud de carbono aéreo.....	99
3.3.3 Delimitación de áreas prioritarias de conservación de captura de carbono.....	100
3.3.4 Análisis comparativo de las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono a los niveles regional y municipal.....	101
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	101
3.4.1 Chignahuapan.....	101
3.4.2 Zacatlán.....	109
3.4.3 Análisis comparativo de áreas prioritarias de carbono entre los municipios Chignahuapan y Zacatlán.....	116
3.5 CONCLUSIONES.....	117
3.6 LITERATURA CITADA.....	118
CAPÍTULO IV.....	123
CONCLUSIONES GENERALES.....	123
4.1 Conclusiones, implicaciones y recomendaciones.....	123
4.2 Fortalezas y debilidades.....	126
4.3 Recomendaciones para futuros trabajos.....	128
4.4 Literatura citada.....	128
CAPÍTULO V.....	130
ANEXOS.....	130

CONTENIDO

Figura	Título	Página
1.1.	Delimitación del Municipio de Chignahuapan, Puebla.....	4
1.2.	Crecimiento poblacional del Municipio de Chignahuapan, Puebla el periodo de 1900-2010.....	5
1.3.	Crecimiento espacial del municipio de Chignahuapan, Puebla en el periodo 1970-2006.....	6
1.4.	Localización por tamaño de las comunidades del municipio de Chignahuapan, Puebla..	7
1.5.	Índice de alfabetismo en el Municipio de Chignahuapan, Puebla..	8
1.6.	Climas del Municipio de Chignahuapan, Puebla..	10
1.7.	Cuerpos de agua del Municipio de Chignahuapan, Puebla.....	11
1.8.	Suelos del Municipio de Chignahuapan, Puebla..	12
1.9.	Porcentaje de mujeres y hombres por sector económico del municipio de Chignahuapan, Puebla..	15
1.10.	Delimitación del municipio de Zacatlán, Puebla..	16
1.11.	Crecimiento de la población del municipio de Zacatlán, Puebla (periodo: 1900- 2010)..	18
1.12.	Crecimiento espacial del municipio de Zacatlán, Puebla de 1970 a 2006.....	19
1.13.	Distribución de las comunidades por tamaño en el municipio de Zacatlán, Puebla.....	20
1.14.	Uso actual del suelo del municipio de Zacatlán, Puebla..	23
1.15.	Tipos de suelos del municipio de Zacatlán, Puebla.....	24
1.16.	Distribución espacial de los climas en el municipio de Zacatlán, Puebla.....	26
1.17.	Porcentaje de la población por actividad económica de Zacatlán, Puebla.....	28
2.1	Localización de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.....	49
2.2	Distribución espacial del suelo durante los años 1986 (a), 1995 (b) y 2011 (c) a nivel regional (Chignahuapan- Zacatlán).....	57
2.3.	Detección de cambio de uso de suelo a nivel regional en el periodo de 25 años (1986-2011).....	58
2.4.	Diagrama de transición del uso del suelo en el periodo.....	59
2.5.	Probabilidad de cambio de uso forestal a uso agrícola obtenido mediante el modelo regional (Chignahuapan- Zacatlán).	69
2.6.	Probabilidad de cambio de uso forestal a uso pecuario obtenido a través del modelo regional (Chignahuapan- Zacatlán).	69
2.7.	Probabilidad de cambio de uso forestal a uso residencial.....	69
2.8.	Escenario futuro de riesgo de deforestación a nivel regional.	70
2.9.	Uso del suelo durante los años 1986 (a), 1995 (b) y 2011 (c) del municipio de Chignahuapan, Puebla.	72
2.10	Uso del suelo durante los años 1986 (a), 1995 (b) y 2011 (c) del municipio de Zacatlán, Puebla.....	73
2.11.	Detección de cambio de uso de suelo para el municipio de Chignahuapan en el periodo de 25 años.	75
2.12.	Diagrama del municipio de Chignahuapan de transición	76

2.13. Detección de cambios de uso de suelo en un periodo de 25 años para el municipio de Zacatlán.....	77
2.14. Diagrama del municipio de Zacatlán de transición.....	78
2.15. Modelo de cambio de uso forestal–agrícola para el municipio de Chignahuapan.	80
2.16. Modelo de cambio de uso forestal–agrícola para el municipio de Zacatlán.....	80
2.17. Modelo de cambio de uso forestal–pecuario para el municipio de Chignahuapan.	81
2.18. Modelo de cambio de uso forestal–pecuario para el municipio de Zacatlán.....	81
2.19. Modelo de cambio de uso forestal–residencial para el municipio de Chignahuapan.	82
2.20. Modelo de cambio de uso forestal–residencial para el municipio de Zacatlán.....	82
2.21. Escenario base riesgo de deforestación (Chignahuapan).....	82
2.22. Escenario base riesgo de deforestación (Zacatlán).	82
2.23. Comparación cualitativa de escalas sobre riesgo de deforestación a nivel regional y municipal.....	84
2.24. Tendencia del riesgo de deforestación a nivel regional.....	85
2.25. Tendencia de riesgo de deforestación del municipio de Chignahuapan.	85
2.26. Tendencia de riesgo de deforestación del municipio de Zacatlán.....	85
3.1. Distribución de carbono equivalente almacenado en los predios analizados del municipio de Chignahuapan, Puebla.	102
3.2. Reservorios de carbono dependiendo la aptitud de CO_2_{eq} ton ha^{-1} año ⁻¹ , en el municipio Chignahuapan, Puebla.	103
3.3. Escenario base de riesgo de deforestación para el municipio de Chignahuapan, Puebla.	105
3.4. Áreas prioritarias de conservación de captura de carbono en el municipio de Chignahuapan, Puebla.	105
3. 5. Visualización de las áreas prioritarias de captura de carbono a) prioridad alta, b) prioridad media y c) prioridad baja.....	107
3.6. Distribución de carbono equivalente almacenado en.....	110
3.7. Reservorios de carbono dependiendo la aptitud de CO_2_{eq} ton ha^{-1} año ⁻¹ , en el municipio de Zacatlán, Puebla.....	111
3.8. Riesgo de deforestación, escenario base del municipio de Zacatlán, Puebla.....	112
3.9. Áreas prioritarias de conservación de captura de carbono en el municipio de Zacatlán, Puebla.....	113
3.10. Visualización de las áreas prioritarias de captura de carbono (a) prioridad alta; (b) prioridad media; y (c) prioridad baja en el municipio de Zacatlán, Puebla.....	114

CONTENIDO

Cuadro	Página
1.1. Principales tipos de suelo, descripción y el porcentaje del municipio que ocupa cada tipo de suelo.....	13
2.1. Nombre, tipo, naturaleza y unidades de las variables independientes y dependiente incluidas en el modelo de regresión logística multinomial.....	53
2.2. Superficie (ha) por uso de suelos para los años 1986, 1995 y 2011 a nivel regional (Chignahuapan-Zacatlán).....	56
2.3. Superficie de estabilidad, ganancias y pérdidas por tipo de ocupación del suelo y porcentaje en relación a la superficie por uso en el 2011 a nivel regional en el periodo de 1986-2011.....	60
2.4. Estadísticas básicas de las variables independientes y dependiente.....	61
2.5. Importancia relativa de las variables independientes y nivel de significancia para el modelo logístico regional y municipal.....	63
2.6. Resultados de la regresión logística, estimadores de las variables independientes, por cambio de uso de suelo a nivel regional y municipal.....	65
2.7. Medidas de asociación de probabilidades predichas y respuestas observadas mediante el modelo regional y municipal.....	68
2.8. Superficie y porcentaje por uso de suelo del municipio de Chignahuapan durante el periodo 1986-2011.....	71
2.9. Superficie y porcentaje por uso de suelo del municipio de Zacatlán.....	74
2.10 Superficie de estabilidad, ganancias y pérdidas por tipo de ocupación del suelo y porcentaje en relación a la superficie por uso en el 2011 a nivel regional en el periodo de 1986-2011.....	76
2.11. Superficie de estabilidad, ganancias y pérdidas por tipo de ocupación del suelo en el municipio de Zacatlán, Puebla en el periodo de 1986-2011.....	79
3.1. Densidad de la madera de especies maderables de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.....	98
3.2 Obtención de áreas prioritarias.....	100
3.3 Estrategias de manejo de las áreas prioritarias de captura de carbono en el municipio de Chignahuapan, Puebla.....	108
3.4. Estrategias de manejo de las áreas prioritarias de captura de carbono en el municipio de Zacatlán, Puebla.....	115
3.5. Datos comparativos de aptitud de carbono, riesgo de deforestación y áreas prioritarias en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.....	116

CAPÍTULO I

CARACTERIZACIÓN DE LOS MUNICIPIOS DE CHIGNAHUAPAN-ZACATLÁN, PUEBLA Y HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

1.1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento desordenado genera, en muchas ocasiones, un problema ambiental y social grave a niveles mundial, nacional, regional y local. Esto trae como consecuencia la fragmentación de los ecosistemas y desertificación a causa del cambio de uso del suelo y cambio climático el cual ha provocado cambios negativos en el entorno como la emisión de gases de efecto invernadero. La desertificación se produce al eliminar la cubierta vegetal en los ecosistemas y provocar una reducción de la resistencia de la tierra a las variaciones climáticas naturales, perturba el ciclo hidrológico y de nutrientes en el suelo favoreciendo la sedimentación de las masas de agua (Puga, 2008; FIDA, 2010). El crecimiento acelerado y sin planificación afecta a los cuerpos de agua contaminándolos con metales pesados, nitrógeno y fósforo o desapareciéndolos por los aportes de basura y las descargas municipales a los ríos y barrancos (Guzmán *et al.*, 2007).

Los impactos ambientales negativos implican grandes costos sociales y económicos para recuperar o conservar la riqueza ambiental la cual es la base principal del desarrollo social de un país. Sin embargo, en muchas ocasiones se desconoce cómo estimar los costos de tales impactos o incluso el valor de los recursos o de los bienes y servicios que ellos generan, lo cual conduce a la sobre explotación o al uso inadecuado, trayendo como consecuencia ecosistemas fragmentados, destruidos o alterados (Osorio *et al.*, 2004). Lo anterior reduce la capacidad de proporcionar servicios ambientales tales como la captura de carbono y conservar la biodiversidad. Para lograr la eficiencia y eficacia en el uso de los recursos en programas orientados a la conservación, es importante identificar áreas prioritarias de conservación que permitan identificar, evaluar y priorizar la zonas con dificultades para lograr un desarrollo armonioso con el ambiente. Este tipo de prácticas o estudios constituyen herramientas para conservar la diversidad biológica y áreas importantes para la producción de servicios ambientales (Rodríguez, 2003; SMRN, 2007).

En la Sierra Norte de Puebla, particularmente en los municipios de Chignahuapan-Zacatlán, el aumento creciente de los centros de población sin una planificación adecuada ha tenido un impacto negativo cada vez mayor sobre los recursos naturales, provocando la desaparición de algunas especies de flora y fauna (SEMARNAT, 2008). Entre los factores que han contribuido a la destrucción de los ecosistemas destaca la tala de bosques, el cambio de uso del suelo para actividades agropecuarias y la cacería de subsistencia (Martínez, 1992). Además, los cuerpos de agua superficiales (ríos, arroyos y barrancas) de los municipios se han visto afectados por las descargas de aguas residuales provenientes de las zonas urbanas. Por ejemplo, entre los ríos receptores de descargas domésticas y sanitarias se encuentra Ajajalpan en la zona de Chignahuapan y Zacatlán (SMRN, 2007).

Los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla se encuentran ubicados sobre un relieve accidentado a diferentes altitudes por lo que cuentan con una notable riqueza de flora, fauna, agua y suelo (SMRN, 2007). Los habitantes de la región se ven favorecidos por la condición existente en los recursos naturales y forestales ya que obtienen de ellos la producción de bienes y servicios que sirven para satisfacer las necesidades básicas y poder realizar las actividades productivas para su subsistencia (Sarukhán *et al.*, 1996; Brack *et al.*, 2000).

Como una medida a favor de la conservación de los ecosistemas, los gobiernos federal, estatal y de los municipios de Zacatlán y Chignahuapan han realizado esfuerzos orientando la política pública a obtener mejoras económicas, sociales y ambientales para las comunidades mediante instrumentos de política tales como apoyos gubernamentales y no gubernamentales. Algunos de ellos incluyen: FIRCO, PROGRAN, ACTIVOS PRODUCTIVOS, SAGARPA, FIRA, FONAES, PROARBOL, PSA, ONG's, Micro, pequeña y mediana empresa turística, PROCAMPO, OPORTUNIDADES y programas de SEDESOL (Hernández, 2008; Olvera, 2011; Cruz, 2012).

A pesar de estos instrumentos implementados en los municipios, aparentemente no se reportan mejoras significativas a nivel ambiental y económico de los habitantes. En un estudio realizado por Rojas *et al.* (2007) en los municipios encontraron que el 8.25% de la población encuestada mencionó que es necesario que existan más

apoyos para poder manejar, restaurar, y conservar los bosques. No existe un cambio económico satisfactorio aunque se proporcionen diversos apoyos gubernamentales (Hernández, 2008). Por tanto, se requiere de reorientar las políticas públicas haciéndolas más eficaces y redoblar esfuerzos en la aplicación de los instrumentos para alcanzar la eficiencia en la conservación de los recursos naturales en beneficio de la población y de los ecosistemas naturales.

Por lo anterior, esta investigación pretende identificar los sitios prioritarios de captura de carbono para favorecer un mejor manejo sustentable de los recursos forestales y proporcionar herramientas de planificación para los propietarios de los terrenos forestales. Actualmente se pueden gestionar recursos con dependencias gubernamentales y no gubernamentales por bonos de carbono, favoreciendo así mejoras en la calidad de vida y una convivencia armoniosa entre los pobladores y el ecosistema.

1.2 DESARROLLO POBLACIONAL Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MUNICIPIOS DE CHIGNAHUAPAN Y ZACATLÁN, PUEBLA

1.2.1 Chignahuapan, Puebla

Localización

El municipio de Chignahuapan se encuentra dentro de la Sierra Norte de Puebla y se localiza entre los paralelos 19° 39' 42" y 19° 58' 48" LN y 97° 57' 18" y 98° 18' 06" LO, colinda al norte con Zacatlán, al oeste con los municipios de Aquixtla, Ixtacamaxtitlán y Zacatlán, al sur colinda con el municipio de Tlaxco, Tlaxcala y al poniente con los municipios de Apan, Almoloya y Cuatepec de Hinojosa, Hidalgo (Figura 1.1). Este territorio alcanza una altitud máxima de 3,400 m y una extensión territorial de 75,922.90 ha (INAFED, 1999; SMRN, 2007; INEGI, 2010).

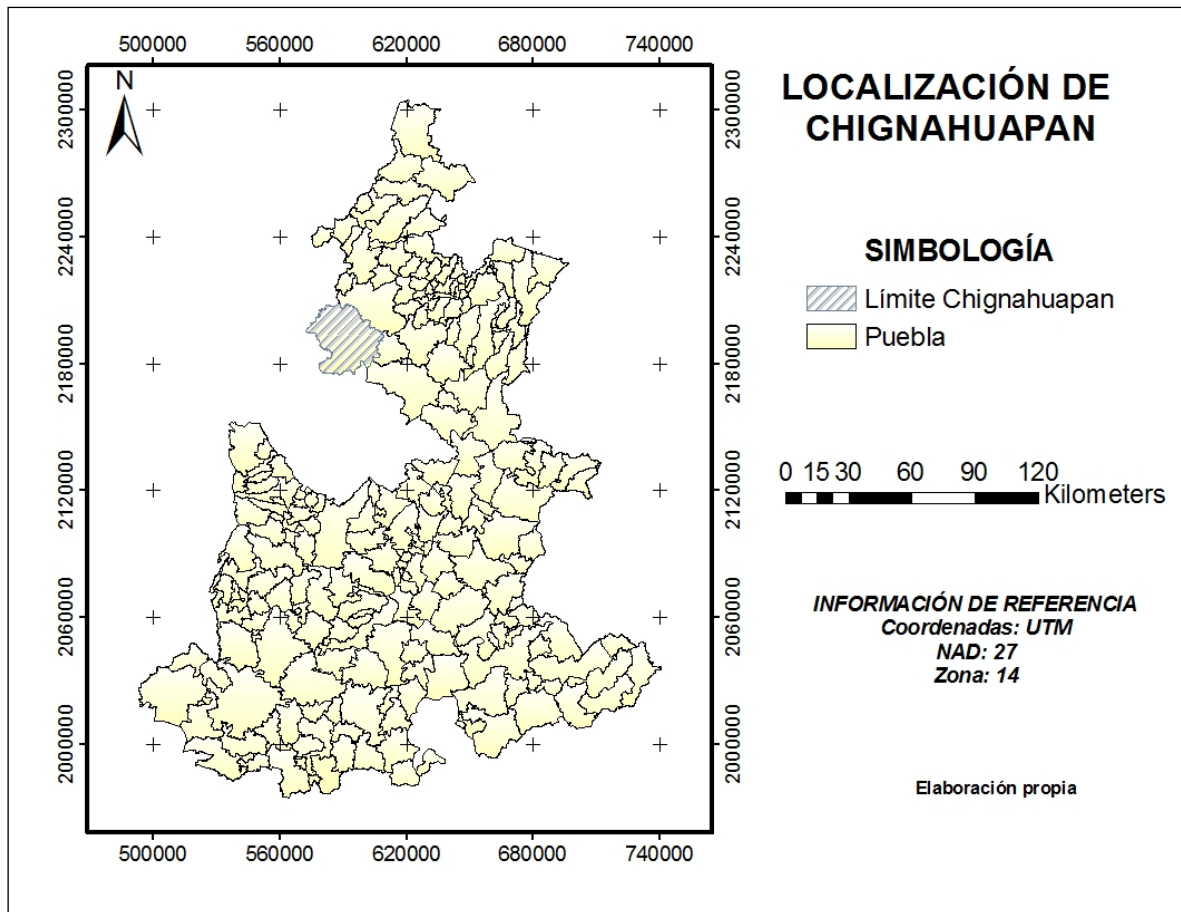


Figura 1.1. Delimitación del Municipio de Chignahuapan, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

Desarrollo histórico de Chignahuapan, Puebla

En la región se asentaron los Chichimecas acaudillados por Chichimecuathuipli hace cinco siglos atrás. En el año de 1481, Hernán Cortés fundó Tetehuitic “Cerro de las Pirámides” donde se rendía culto al Dios de la lluvia. Para 1527, la población se estableció en los montes de Santiago Chiquinahuitle, “Nueve ojos de agua”. Para ese mismo año, llegó una tribu de aztecas que se asentaron a la orilla de los nueve ojos de agua de la región. Los restos de cultura existentes tienden a indicar que su extensión y sus límites actuales fueron los mismos de la época prehispánica (INAFED, 2009; Cortés, 2009).

Dinámica poblacional del municipio de Chignahuapan, Puebla

El crecimiento poblacional para el municipio de Chignahuapan fue creciente a partir de 1900 y decreció como consecuencia de la lucha revolucionaria en el periodo de 1910 a 1917; con impactos notables a nivel nacional en las características demográficas. Para el censo de 1921, sólo se contabilizaron 4,522 habitantes en el municipio de Chignahuapan, mostrando un decremento de 7,950 habitantes con respecto a la población reportada en el censo de 1910. Este decremento se presentó por el conflicto de la revolución y otros factores como el incremento de la emigración, disminución de los nacimientos y la mortalidad por propagación de enfermedades infecciosas (Mendoza y Tapia, 2010; INEGI, 1900-1930; SNIM, 1990-2010). Sin embargo, en los años posteriores a la revolución mexicana se observa un crecimiento acelerado (Figura 1.2).

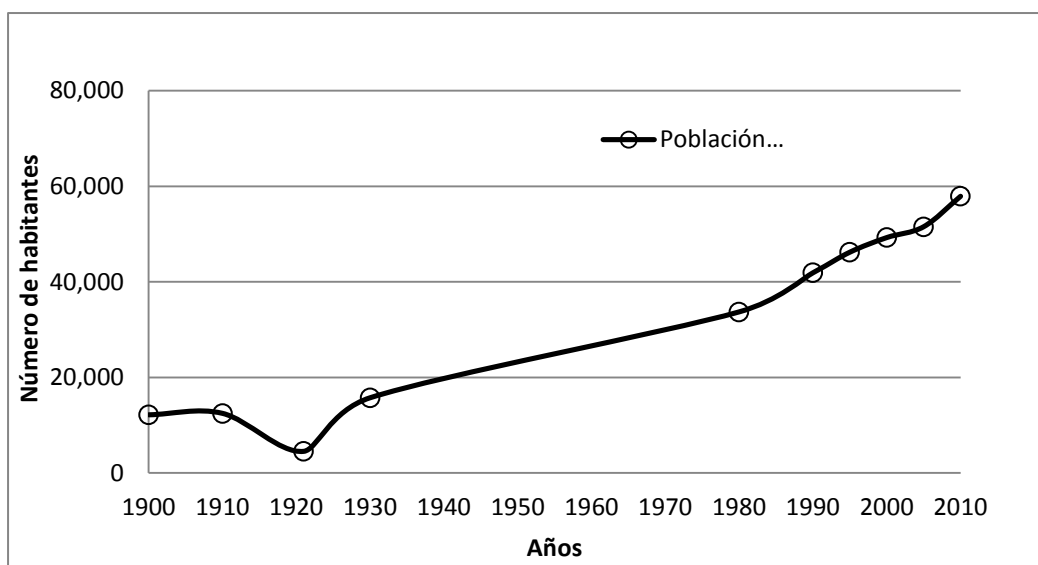


Figura 1.2. Crecimiento poblacional del Municipio de Chignahuapan, Puebla el periodo de 1900-2010. Fuente: INEGI (1900-1930); SNIM (1990-2010).

A partir del crecimiento poblacional que se presentó después de la revolución mexicana, el municipio de Chignahuapan se vio afectado por el cambio de uso del suelo al incrementar el área urbana principalmente por la inmigración rural y posteriormente por el incremento en la tasa de natalidad. Según Mendoza y Tapia (2010), para 1930 se tenía una tasa promedio de 6.1 hijos por mujer a lo largo de su vida fértil en México; 40 años más tarde (en 1968), el promedio de hijos para una mujer a lo largo de su vida fértil aumentó a 7.1 hijos. El crecimiento poblacional tuvo consecuencias a nivel nacional y regional ya que al incrementar la población

incrementó el uso de los recursos naturales para satisfacer las necesidades básicas de la población. El crecimiento de la zona urbana del municipio de Chignahuapan se ha presentado en forma de bloques, extendiéndose hacia la periferia del municipio, principalmente a las orillas o cerca de las fuentes de agua (Figura 1.3) (SMRN, 2007).

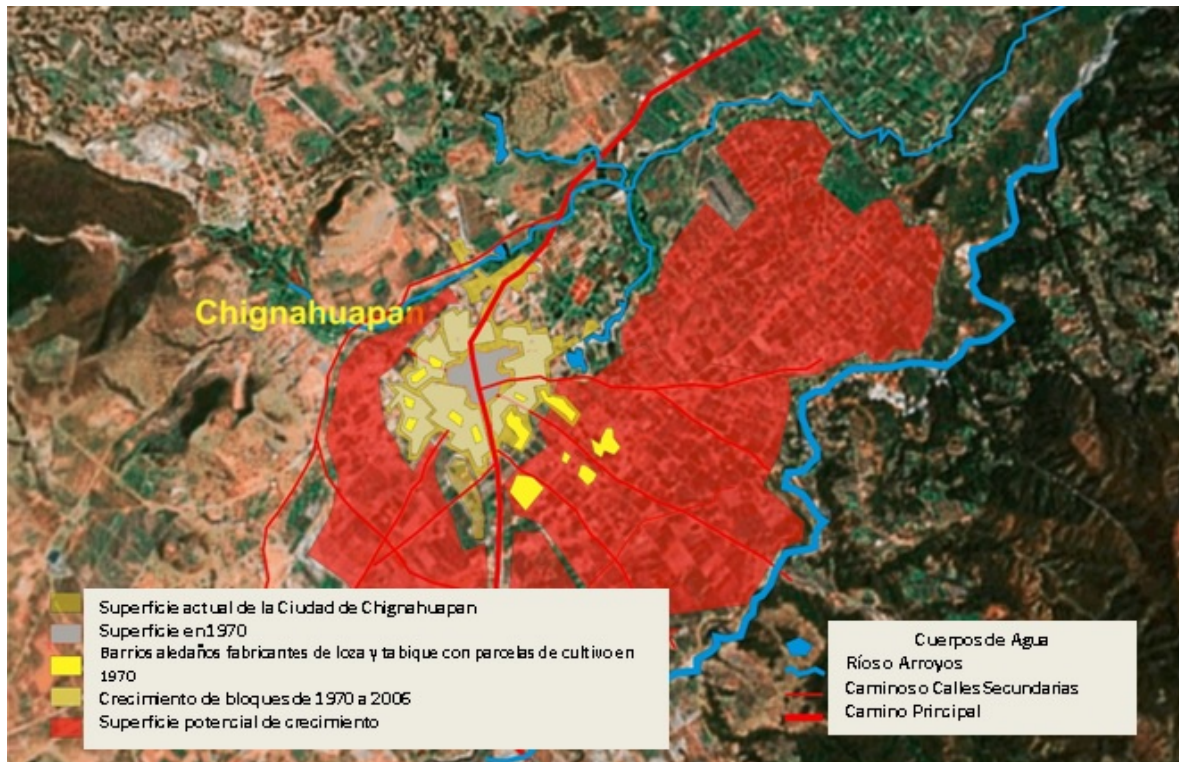


Figura 1.3. Crecimiento espacial del municipio de Chignahuapan, Puebla en el periodo 1970-2006 (modificada de SMRN, 2007).

En la actualidad el municipio de Chignahuapan cuenta con 159 comunidades distribuidas de manera irregular en todo su territorio, el número poblacional de estas comunidades varía teniendo comunidades habitadas con menos de 50 habitantes y comunidades con población mayor a 2,500 habitantes (Figura 1.4) (INEGI, 2010).

El crecimiento urbano de Chignahuapan se debe en parte al desarrollo industrial maderable derivado de la silvicultura y a la manufactura de las esferas (SMRN, 2007). El desarrollo del comercio interno se establece principalmente de comestibles y enseres domésticos, que abastece a las localidades del interior del municipio incluso a otros municipios.

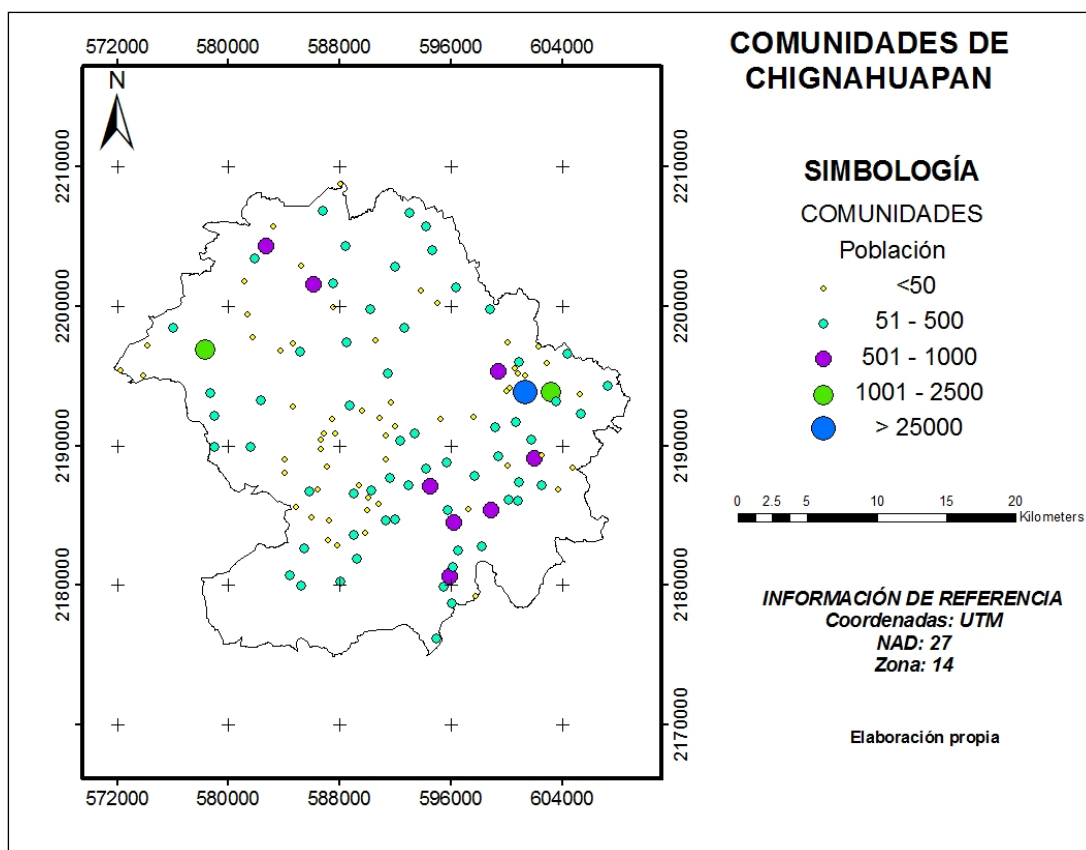


Figura 1.4. Localización por tamaño de las comunidades del municipio de Chignahuapan, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

Población

La población total para el municipio de Chignahuapan en el año 2010 fue de 57,909 habitantes de los cuales, 29,681 (51.3%) son mujeres y 28,228 (48.7%) son hombres; presenta una tasa de crecimiento poblacional anual de 2.4%. Al comparar estos datos con los que publicó el censo de población y vivienda 2005, se observa que la población aumentó en 17.8% en los últimos 5 años, la densidad poblacional actual para Chignahuapan es de 0.8 habitantes por ha (INEGI, 2005; INEGI, 2010).

Grado de marginación

El municipio de Chignahuapan presenta un grado de marginación considerable debido a que el 62.9% de las comunidades están clasificadas con marginación alta, el 7.5% con una marginación muy alta, el 10% de las comunidades se clasifican con marginación media y sólo un 19% de las comunidades tiene un grado de marginación bajo o muy bajo (CONAPO, 2010). Lo anterior quizás se deba

principalmente a que la mayor parte de las comunidades se encuentran alejadas de la cabecera municipal y no cuentan con los servicios básicos para satisfacer sus necesidades esenciales.

Educación

El índice de alfabetismos para el municipio de Chignahuapan es de 86% (Figura 1.5), esto se debe principalmente a que hay una mayor distribución de escuelas en las áreas rurales del municipio teniendo mayor facilidad de cursar la primaria y secundaria en sus comunidades. La cobertura a nivel municipal es de un 86.8% para el nivel preescolar, un 99% para primaria, un 83% de secundaria y un 60.5% para el nivel medio superior; finalmente, se tiene que sólo 12.9% de la población cursa el nivel superior (INEGI, 2010; Anuario estadístico del estado de Puebla, 2011).

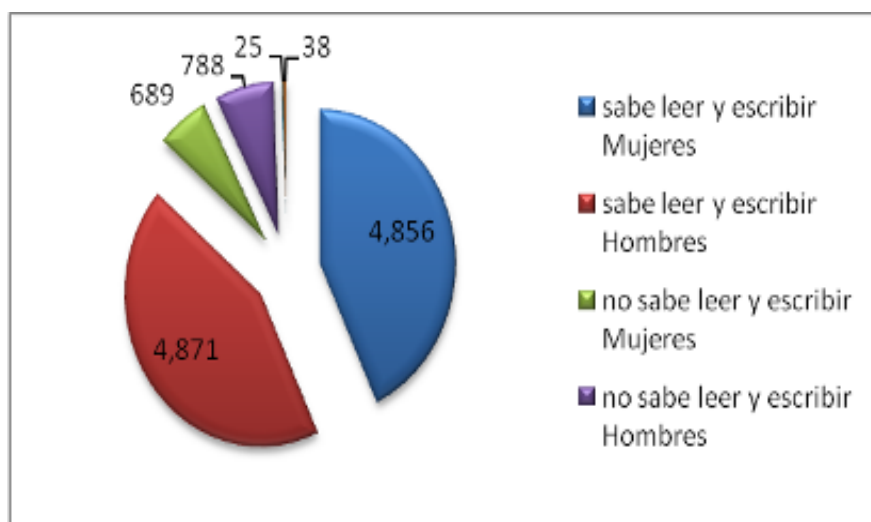


Figura 1.5. Índice de alfabetismo en el Municipio de Chignahuapan, Puebla. Fuente: INEGI. Censos de población y vivienda (2010).

Vivienda

El total de viviendas en el municipio de Chignahuapan es de 17,613 de las cuales 2,382 (que representa el 13.5% del total) se encuentran deshabitadas y 1,225 (7%) sólo se usan de manera temporal debido a que la población tiende a emigrar. El INEGI (2010) reporta que para el 2005 se encontraban viviendo 1,770 habitantes de Chignahuapan en otro estado (3.4% del total de la población) y 951 habitantes (1.9%) en otro país.

Respecto a la información reportada en el censo 2005, se observa un incremento de viviendas del 49% en un periodo de cinco años teniendo consecuencias importantes al fragmentarse los ecosistemas por el cambio de uso de suelo a zonas agrícolas y urbanas; por ejemplo, dentro del municipio se encuentran 177 ha de área urbana representando el 0.3% del territorio municipal (INEGI, 2005, 2010; Rojas *et al.* 2012).

Idiomas

En el municipio de Chignahuapan sólo 317 habitantes hablan una lengua indígena. Este dato representa el 5% del total de la población del municipio y se encuentran ubicados principalmente en las comunidades más alejadas del área urbana de Chignahuapan, el 95% restante de la población habla únicamente español (INEGI, 2010).

Características biofísicas y ambientales

Clima

Los climas presentes en el municipio de Chignahuapan se determinan por factores como los vientos alisios y la topografía accidentada. El clima predominante es el templado subhúmedo representando 90% del territorio y únicamente existe un 0.7% del territorio con clima semifrío subhúmedo siendo éste, el clima más frío dentro de su clasificación (Figura 1.6).

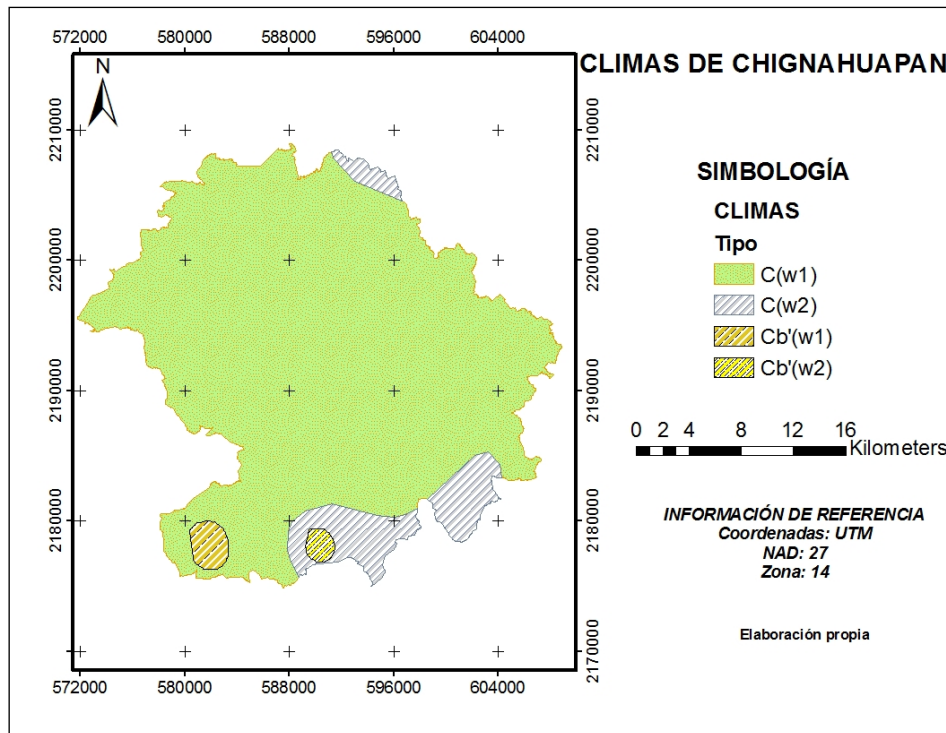


Figura 1.6. Climas del Municipio de Chignahuapan, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

La descripción de las características de los climas presentes en el Municipio de Chignahuapan de acuerdo al SMRN (2007) y García (1998) son:

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; el porcentaje de lluvia invernal es menor a 5%.

C(w2), templado subhúmedo: Temperatura media anual entre 12 y 18 °C; la temperatura del mes más frío fluctúa entre -3 °C y 18 °C y la del mes más caliente asciende hasta 22 °C; la precipitación total anual va de 700 a 1,500 mm y el porcentaje de lluvia invernal varía entre 5 y 10%.

Cb'(w1) Semifrío, húmedo con verano fresco largo: Temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C, temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C, temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual

Cb'(w2) Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo: Este clima es el más frío dentro del grupo de los climas semifríos subhúmedos, teniendo una precipitación invernal que varía entre 5 y 10% del total de la anual, la precipitación promedio anual es de 860.5 mm. El mes más cálido es abril con un temperatura promedio de 14.5 °C mientras que la temperatura media anual promedio es de 13.6 °C.

Hidrología

En la parte norte y noreste de Chignahuapan hay corrientes temporales que nutren al arroyo Atotonilco afluente del Río Necaxa. En la región se encuentran 68 cuerpos de agua de los cuales, 57 son intermitentes y 11 perennes (Figura 1.7). Los cuerpos de agua que sólo se presentan en las temporadas de lluvia ocasionan arrastre de suelo productivo y que la frontera deslavada se extienda hacia la zonas arboladas con pendientes fuertes (40%), esta situación ocasiona efectos negativos en el ecosistema del municipio de Chignahuapan (SMRN, 2007).

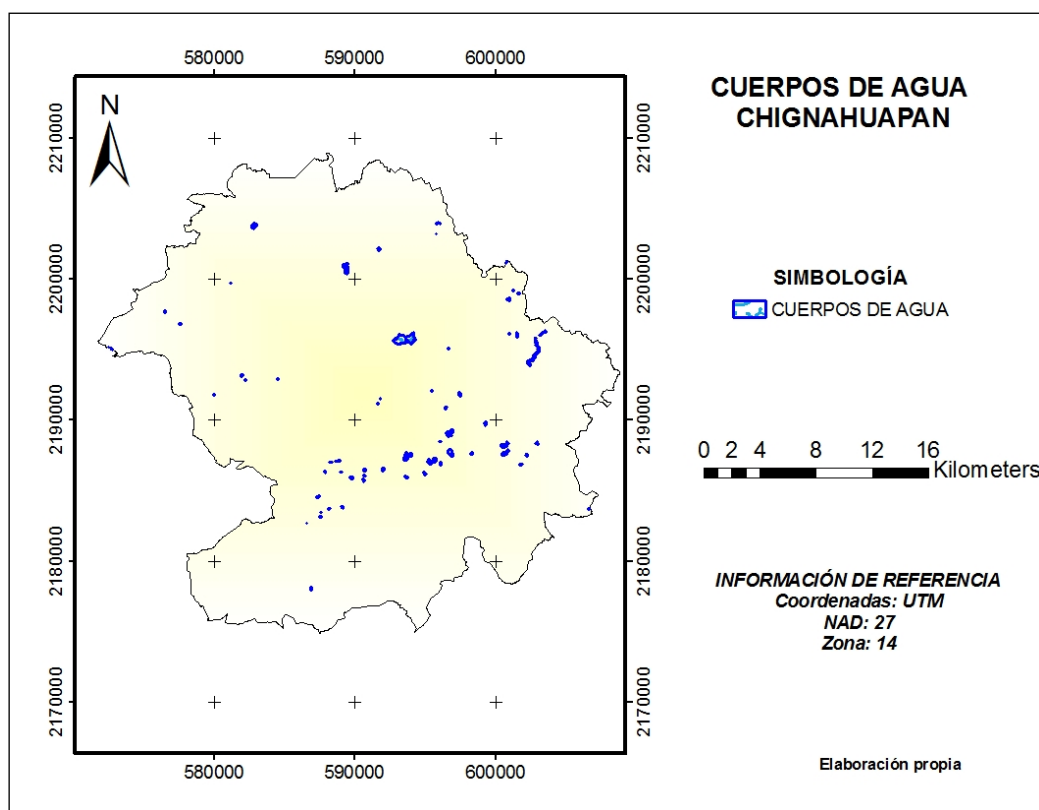


Figura 1.7. Cuerpos de agua del Municipio de Chignahuapan, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

Suelos

Debido a la diversidad de la topografía, la precipitación, altitud y materiales geológicos, se encuentra una amplia diversidad de tipos de suelo en el municipio de Chignahuapan (Figura 1.8).

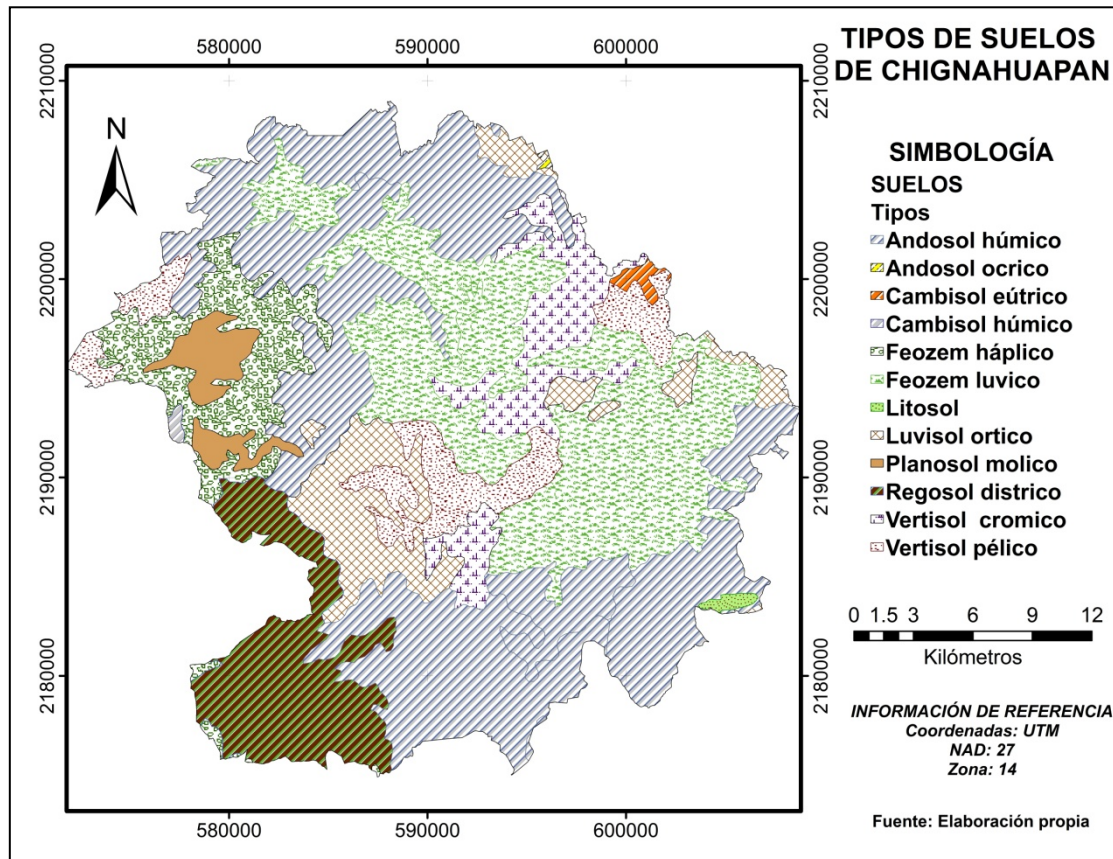


Figura 1.8. Suelos del Municipio de Chignahuapan, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

El municipio de Chignahuapan cuenta con una gran distribución de suelos. El más predominante dentro del territorio es el Andosol con 23%; el Cuadro 1.1 muestra la descripción individual de los tipos de suelos que en su conjunto dan el 97% del territorio del municipio por lo que el restante 3% pertenece a los diversos cuerpos de agua del municipio Chignahuapan.

Cuadro 1.1. Principales tipos de suelo, descripción y el porcentaje del municipio que ocupa cada tipo de suelo. Fuente: Plan de desarrollo municipal 2011- Chignahuapan, Puebla (Olvera, 2011).

CLAVE DE SUELO	DESCRIPCIÓN	% DEL MUNICIPIO
Th+I+Rd/2LP	Suelo principal Andosol húmico asociado a Litosol y Regosol déstrico, de textura media y fase física lítica profunda: capa rocosa entre 0.5 y 1.0 m de profundidad.	23
Rd+Bh/2P	Suelo principal Regosol déstrico asociado a Cambisol húmico, de textura media y fase física pedregosa: piedras mayores a 7.5 cm de diámetro en la superficie o cerca de ella	9
Hi+Vp/3	Suelo principal Feozem Lúvico asociado a Vertisol pélico, de textura fina.	11
Vc+I+Be/3D	Suelo principal Vertisol crómico asociado a Litosol y Cambisol eutrítico, de textura fina y fase física dúrica: capa de tepetate a menos de 50 cm de profundidad.	6
Lo+Hi+Vp/3L	Suelo principal Luvisol órtico asociado a Feozem lúvico y Vertisol pélico, de textura fina y fase física lítica: capa rocosa a menos de 50 cm de profundidad.	8
Hi+Lo+Vc/3DP	Suelo principal Feozem lúvico asociado a Luvisol órtico y Vertisol crómico, de textura fina y fase física dúrica profunda: capa de tepetate entre 0.5 y 1.0 m de profundidad.	9
Hh+Vp+Wm/2D	Suelo principal Feozem háplico asociado a Vertisol pélico y Planisol mólico, de textura media y fase física dúrica: capa de tepetate a menos de 0.5m de profundidad	7
Th+Hh+Hi/2LP	Suelo principal Andosol húmico asociado a Feozem háplico y Feozem lúvico, de textura media y fase física lítica profunda: capa rocosa entre 0.5 y 1.0 m de profundidad.	20

Vegetación

El municipio de Chignahuapan tiene gran riqueza en especies florísticas de clima templado frío y un gran macizo forestal que es el más importante del estado. Por las características del clima, se encuentran diferentes tipos de vegetación asociada al bosque de coníferas, teniendo principalmente diversas especies de pino, oyamel, encino, hojosas y vegetación secundaria producto de la destrucción total o parcial de la vegetación primaria o clímax (SMRN, 2007; INAFED, 2010).

Dentro de las especies de alto valor económico y ecológico se encuentran los géneros siguientes: pino (*Pinus* spp) oyamel (*Abies* spp), encino (*Quercus* spp), aile (*Alnus* spp), madroño (*Arbutus* spp) y capulín (*Prunus* spp) (SMRN, 2007).

Chignahuapan cuenta con diferentes especies de pino y oyamel las cuales se presentan en macizos de masas puras o mezcladas con alguna otra hojosa, teniendo asociaciones como (SMRN 2007; UMAFOR 2012):

(1) Bosque de pino: Es el tipo de vegetación más importante dentro del municipio, ya que ocupa el 80% de la superficie y se tienen distribuidas en esta superficie seis especies predominantes (*Pinus patula*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. ayacahuite*, *P. rudis*, y *P. leiophylla*).

(2) Bosque de oyamel: Se encuentra formando masas densas principalmente en laderas con orientación al noroeste, donde se encuentran los sitios con más humedad.

(3) Bosque de pino–oyamel: Son masas boscosas de transición entre el bosque de pino y el bosque de oyamel observándose mezclas de ambos géneros.

(4) Bosque de pino–encino: Esta vegetación se encuentra principalmente en lugares con pequeñas elevaciones, el porte del encino es bajo y mal formado por lo que no se obtienen beneficios económicos del aprovechamiento de esta especie.

(5) Bosque de pino, encino–latifoliadas: Esta asociación se encuentra en áreas accesibles o muy cercanas a las vías de comunicación en las cuales se ha presentado un saqueo de pino para el uso doméstico, la calidad de encinos y hojosas es bajo por el porte bajo y fustes mal formados.

(6) Bosque de encino: Este tipo de vegetación se encuentra en lugares secos con pendientes fuertes y con suelos delgados y pobres.

Fauna Silvestre

La fauna silvestre está relacionada con los tipos de ecosistemas que se encuentran distribuidos en el municipio teniendo especies como: Paloma morada (*Columba flavirostris*), musaraña (*Sorex saussurei*), ratón (*Reithrodontomys* spp.), ratón (*Peromyscus aztecus*), rata (*Sigodom leocutis*), tuza (*Pappogeomys merriami*),

ardilla arbórea (*Sciurus aureogaster*), zorrillo espalda blanca (*Conepatus leuconotus*), cincuate (*Pituopis deppi*), lagartija (*Sceloporus* spp.). Algunas especies que se encuentran presentes cerca de las corrientes de agua son zanate (*Quiscalus mexicanus*), armadillo (*Dasypus novemcinctus*), mapache (*Procyon lotor*), tejón (*Nasua narica*) (SMRN, 2007).

Actividades económicas

El municipio de Chignahuapan basa su desarrollo económico a partir de la producción de materia prima en el sector primario (agricultura, ganadería, silvicultura y fruticultura). Bajo este esquema se identifican como principales actividades económicas la producción de materias primas derivados de la silvicultura (aserraderos, carpinterías, mueblerías), y la producción y comercialización de ornamentos navideños (esferas, bases y series). Otras actividades que contribuye al desarrollo económico del municipio es la proveeduría de servicios de turismo (oferta de servicios de hotelería, gastronomía, artesanías) y asesoría técnica. La Figura 1.9 muestra que las actividades primarias han dejado de ser la labor económica del municipio y se han incrementado las labores terciarias (comercio y servicios) teniendo el 80% de participación de las mujeres en este sector (Olvera, 2011).

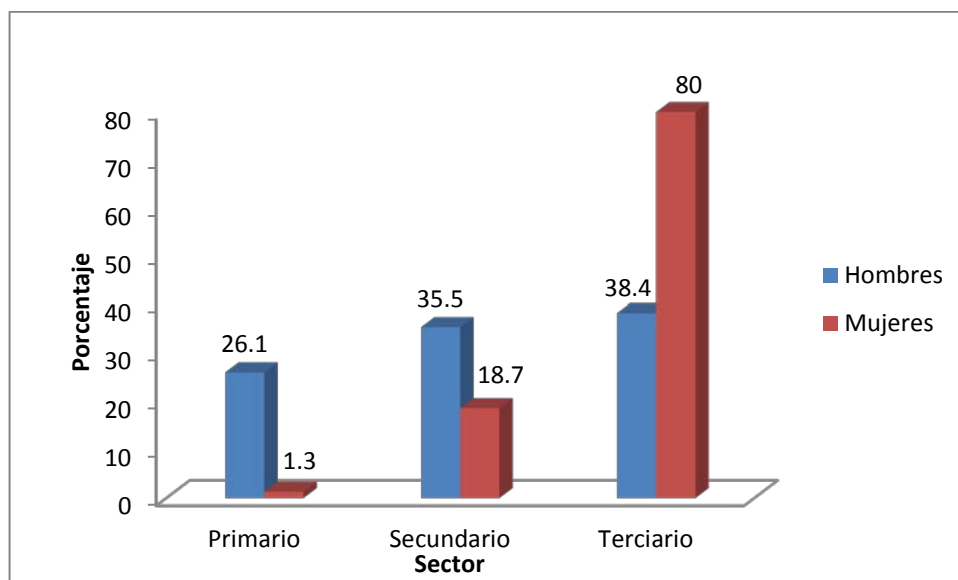


Figura 1.9. Porcentaje de mujeres y hombres por sector económico del municipio de Chignahuapan, Puebla. Fuente: INEGI. Censos de población y vivienda (2010).

1.2.2 Zacatlán, Puebla

Localización

El municipio de Zacatlán se encuentra dentro de la Sierra Norte del estado de Puebla, colindando al norte con los municipios de Chiconcuautla y Huauchinango, al sur con Chignahuapan, al oeste con Ahuacatlán, Tepetzintla y Tetela de Ocampo y al Poniente colinda con el municipio de Ahuazotepec y el estado de Hidalgo (Figura 1.10). Se localiza entre los paralelos $19^{\circ} 50' 06''$ y $20^{\circ} 08' 12''$ LN y $97^{\circ} 51' 06''$ y $98^{\circ} 12' 36''$ LO. El territorio de Zacatlán se encuentra a una altitud promedio de 2,150 m y con una superficie de 48, 933 ha (SMRN, 2007; INAFED, 2009).

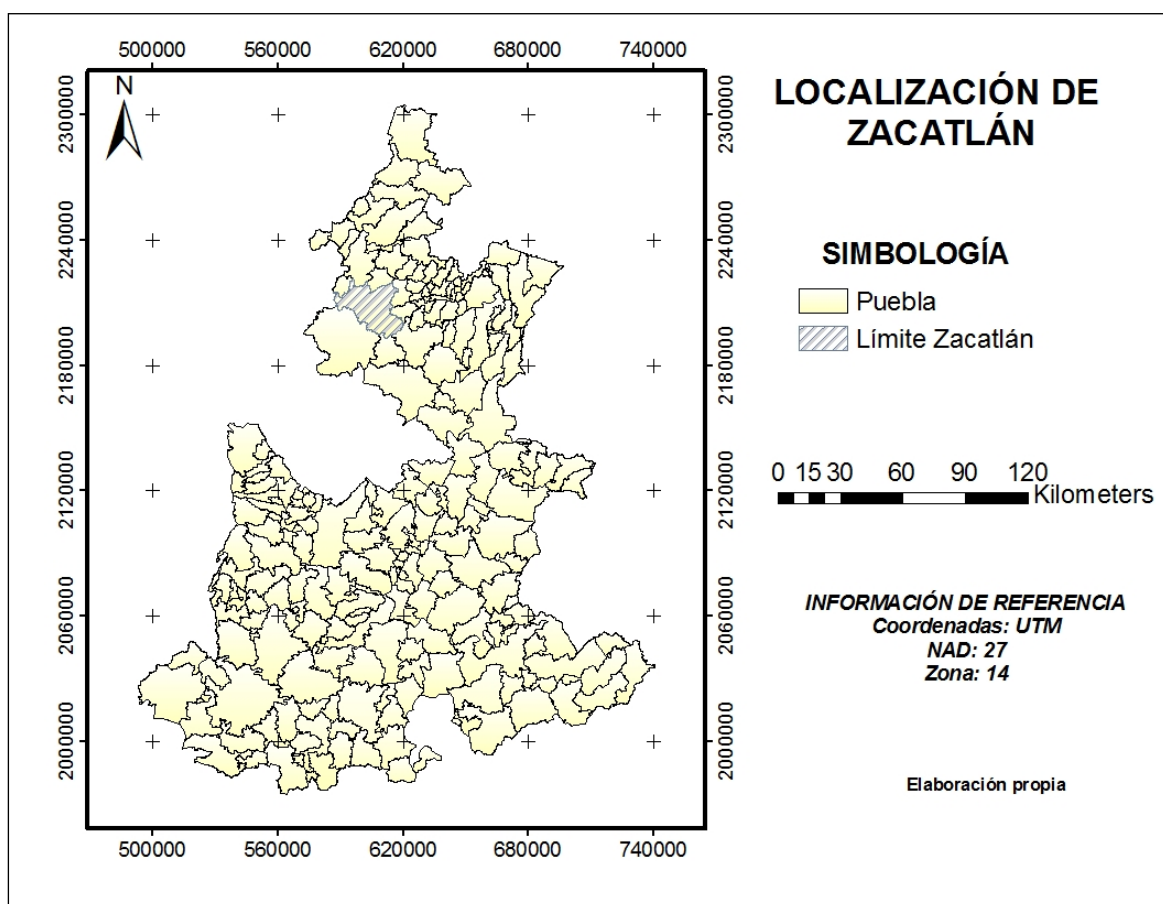


Figura 1.10. Delimitación del municipio de Zacatlán, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

Desarrollo histórico de Zacatlán, Puebla

Los primeros fundadores de la población del Atenamitic, ahora Zacatlán, fueron descendientes de Toltecas y Chichimecas. Durante el periodo de los años 697 y

713, los pobladores se situaron en lugares de difícil acceso para evitar ser atacados por tribus enemigas. En la actualidad, el municipio de Zacatlán se encuentra establecido en un lugar estratégico que conecta a la población hacia el norte con la costa veracruzana y al noroeste hacia el centro del país (SMRN, 2007; INAFED, 2009).

Dinámica poblacional del municipio de Zacatlán

La población de Zacatlán tuvo un incremento a partir de 1900 y lo mantuvo en los 10 años siguientes; posteriormente experimentó una caída de 1910 a 1921 debido probablemente a que en ese periodo se desarrolló la revolución mexicana que trajo como consecuencia la muerte de miles de personas por la lucha, enfermedades y epidemias, además de la inmigración principalmente hacia los Estados Unidos de Norteamérica. Gutmann *et al.* (2010) mencionan que el 10% de los mexicanos durante el periodo de la lucha de la revolución emigró hacia EUA debido a que la revolución trajo violencia, caos y pobreza repercutiendo en una reducción de la población a nivel nacional. La población del municipio de Zacatlán se vio afectada ya que en este periodo se redujo en un 80.9%. Posterior a 1921, se muestra un crecimiento poblacional significativo hasta el año 2000 (Figura 1.11). En los años siguientes, se observa que la población crece a menor ritmo debido a la concientización de la población sobre planificación familiar (Mendoza y Tapia, 2010; INEGI, 1900-1930; SNIM, 1990-2010).

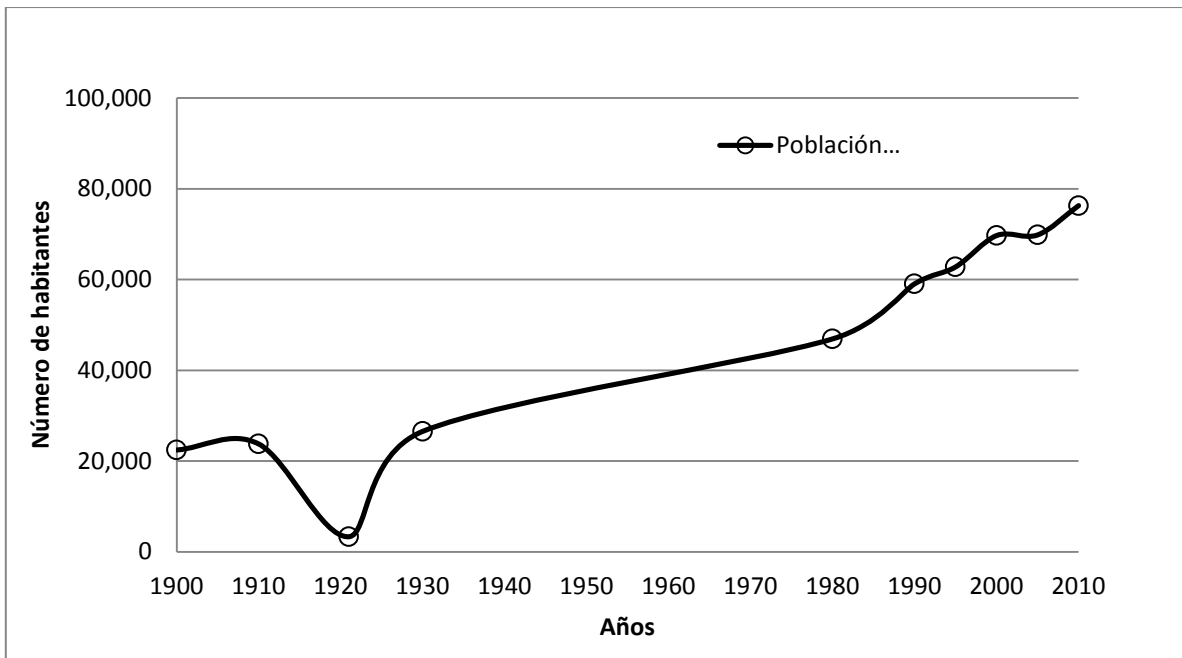


Figura 1.11. Crecimiento de la población del municipio de Zacatlán, Puebla (periodo: 1900- 2010). Fuente: INEGI (1900-1930); SNIM (1990-2010).

Con el aumento de la población, a partir de 1921, el municipio de Zacatlán tuvo un crecimiento demográfico desordenado en todo su territorio (SMRN, 2007). El crecimiento en el periodo de 1970 al 2006 se caracterizó por que las áreas urbanas se asentaron en zonas con pendientes pronunciadas y a orillas de ríos y arroyos y sin contar con un programa de ordenamiento territorial (Figura 1.12); lo anterior, tuvo como consecuencia ecosistemas fragmentados que posteriormente favorecieron los desastres naturales como deslaves o inundaciones, así como la pérdida de biodiversidad (Puga, 2008).

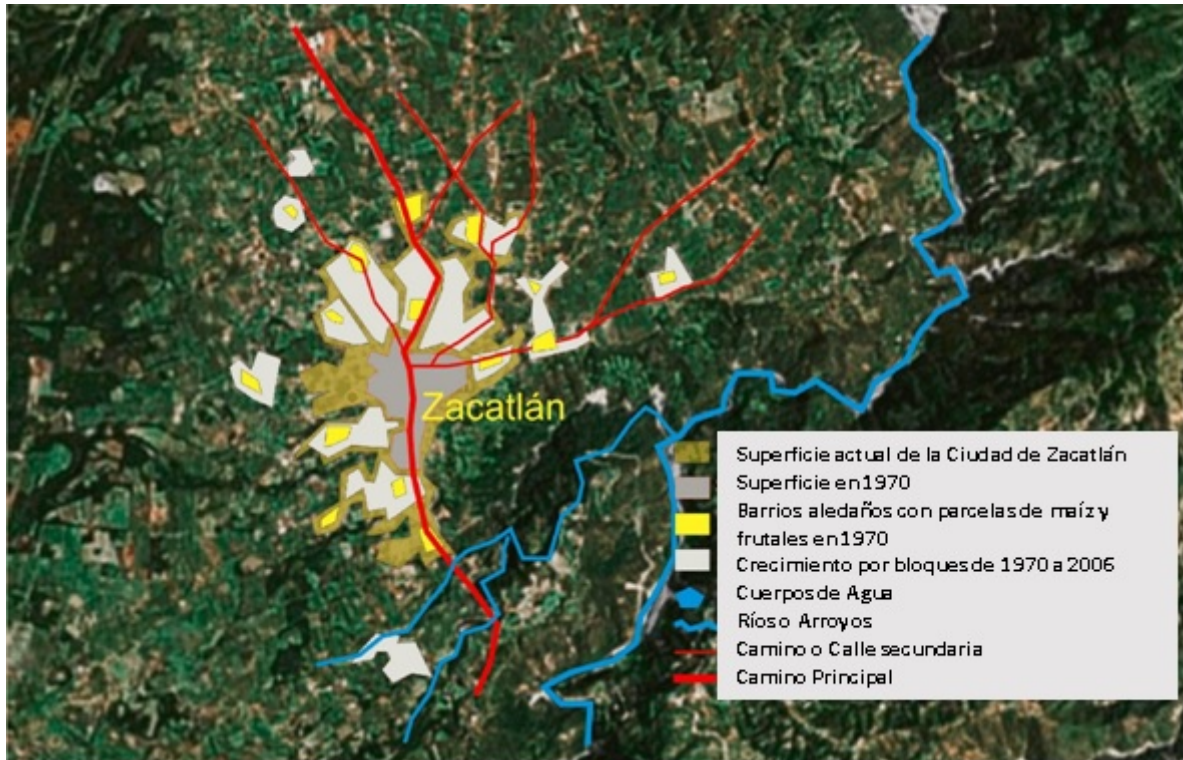


Figura 1.12. Crecimiento espacial del municipio de Zacatlán, Puebla de 1970 a 2006. Fuente: Tomada de SMRN (2007).

Actualmente, el municipio de Zacatlán cuenta con 98 comunidades distribuidas de manera irregular en todo su territorio (Figura 1.13). El 14% y 17% de las comunidades están constituidas por poblaciones mayores a 1,000 y por poblaciones menores a 20 habitantes, respectivamente (INEGI, 2010). Para poder satisfacer las necesidades básicas de dichas poblaciones han echado mano del uso de los recursos naturales con los que cuenta el municipio teniendo como consecuencia el cambio de uso del suelo. Rojas *et al.* (2012) indican que existe una probabilidad del 49% de que una hectárea de superficie forestal cambie a un uso agrícola en las comunidades del municipio de Zacatlán, Puebla.

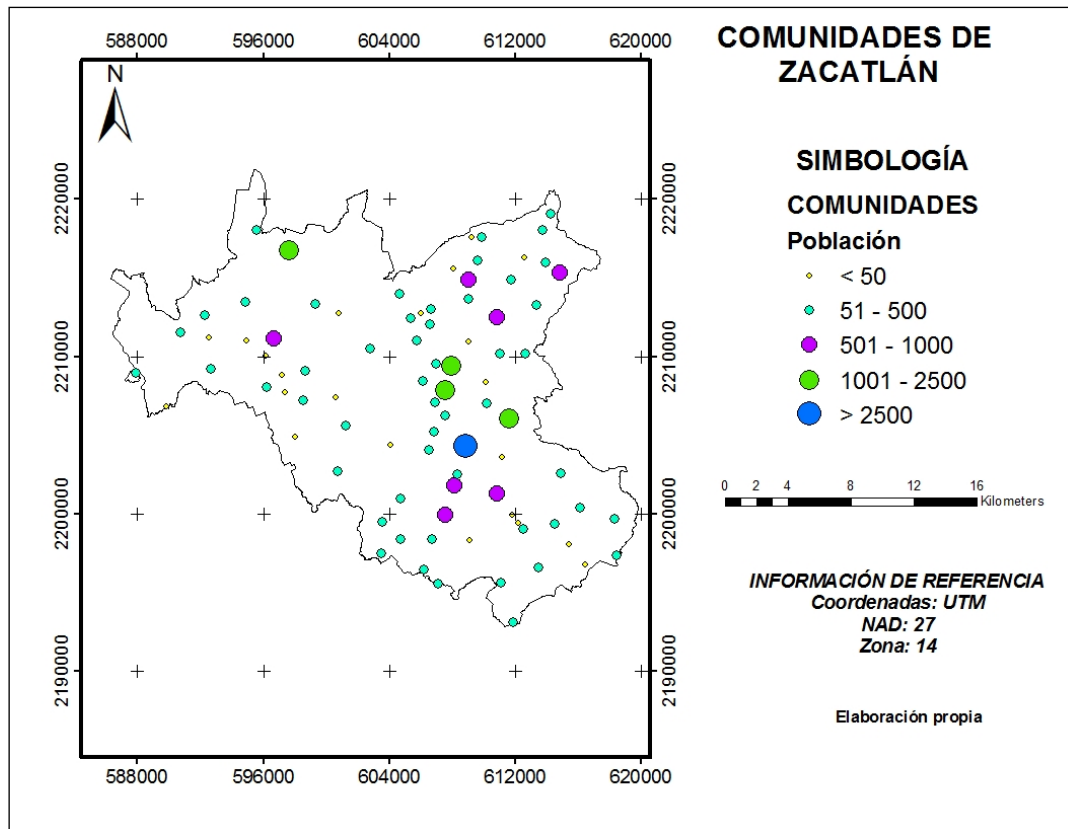


Figura 1.13. Distribución de las comunidades por tamaño en el municipio de Zacatlán, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

El crecimiento del municipio de Zacatlán se debe principalmente al establecimiento de comercios y la entrada de mercancías; cuenta con importantes centros turísticos tales como la cascada de San Pedro, la fábrica de relojes y el reloj floral (Cruz, 2012). Los edificios con alto valor cultural son: El palacio municipal y el ex convento Franciscano. El desarrollo industrial del municipio se debe principalmente a la elaboración de sidras derivas de la manzana y a la elaboración de pan de queso y requesón. Estas actividades generan fuentes de empleos que significa un gran atractivo para los pobladores quienes buscan mejores opciones económicas, productivas, culturales y educativas para sus familias (SMRN, 2007).

Población

El municipio de Zacatlán tiene una población total actual de 67,547 habitantes de los cuales el 42.59% son hombres y el 57.40% son mujeres. 34,639 habitantes se encuentran asentados en el área urbana de Zacatlán y 32,908 habitantes se ubican en las áreas rurales, la densidad poblacional para el municipio es de 1.5 habitantes

por hectárea. A pesar de la baja densidad, existe en el municipio impactos tales como contaminación de fuentes de aguas por las descargas de aguas residuales, tiraderos de basura y pérdida de biodiversidad (Escobar, 2006). El crecimiento poblacional para 2010 fue de 2.4% incrementando la tasa poblacional 1.3 veces a la tasa poblacional que se tenía en 1950.

El 72% de la población de Zacatlán sabe leer y escribir esto se debe principalmente a que el 51% de la población se encuentra establecida en el área urbana del municipio, donde se tiene mayores facilidades para cursar los niveles básicos de educación y a que hay mayores ofertas de empleo. El 18% de la población que no sabe leer y escribir se localiza principalmente en las comunidades más alejadas al área urbana y que no hablan español (INEGI. 2010).

Vivienda

El municipio de Zacatlán tiene distribuido de manera irregular sus comunidades con un total de 45,984 viviendas, de las cuales 36,801 (80% del total) se encuentran habitadas. Del resto, 8.9% se encuentran en uso temporal y 1.1% se encuentran deshabitadas (INEGI, 2010).

Etnias

En el municipio de Zacatlán existen 17,550 habitantes que hablan lengua indígena representando el 25% de la población total; dentro de este grupo, 16,650 sólo habla Náhuatl y/o Totonaco y 900 hablan una lengua indígena y español. Estas comunidades se encuentran alejadas del área urbana del municipio asentadas principalmente en zonas de alto riesgo.

Los factores principales que han determinado la dinámica del crecimiento poblacional en los centros urbanos de la región Chignahuapan-Zacatlán de acuerdo al SMR (2007), incluyen:

- ✓ Exclusión del sector rural del desarrollo social y económico.
- ✓ Carencia de tierra productiva en relación con el crecimiento poblacional.
- ✓ Crecimiento poblacional no proporcional a la superficie productiva y a la oferta de empleos en las localidades.

- ✓ Migración a las ciudades en busca de mejores opciones de formación para los hijos como resultado de un mejor ingreso económico en algunos ejidos derivados de las actividades forestales y agropecuarias.
- ✓ Desarrollo del comercio establecido en los núcleos urbanos por la demanda de bienes y servicios de la población rural.
- ✓ Desarrollo de un comercio ambulante proveniente del exterior de la región como respuesta a la demanda de bienes no satisfecha por los comercios locales establecidos.
- ✓ Administración municipal que ofrece bienes y servicios para retener la afluencia de la población rural que antes se dirigía a otros estados.
- ✓ Hay un desarrollo de la producción agropecuaria y manufacturera en los núcleos específicos de la región.
- ✓ Desarrollo de la infraestructura vial.

Características biofísicas y ambientales

Hidrografía

Los ríos que cruzan al municipio de Zacatlán son el Tecoyoca, Zempoala, San Pedro, Tonalapa y San Miguel encontrándose dentro de la vertiente exterior septentrional del golfo. Comienzan en el Cerro de la Vigía hasta el Peñón del Rosario desembocando en el Golfo de México; estos ríos son de gran importancia ya que irrigan gran parte del municipio y son atractivos turísticos para los habitantes del municipio y de municipios vecinos (SMRN, 2007).

Uso actual del suelo

El uso de tierra predominante es la agricultura de temporal ocupando el 54% del territorio del municipio. El resto, preponderantemente es de uso forestal, el cual está compuesto por bosque de pino representando el 20% del territorio municipal y el 26% restante, se encuentra cubierto de bosque Mesófilo de montaña, zona urbana, pastizal cultivado y bosque de galería (Figura 1.14).

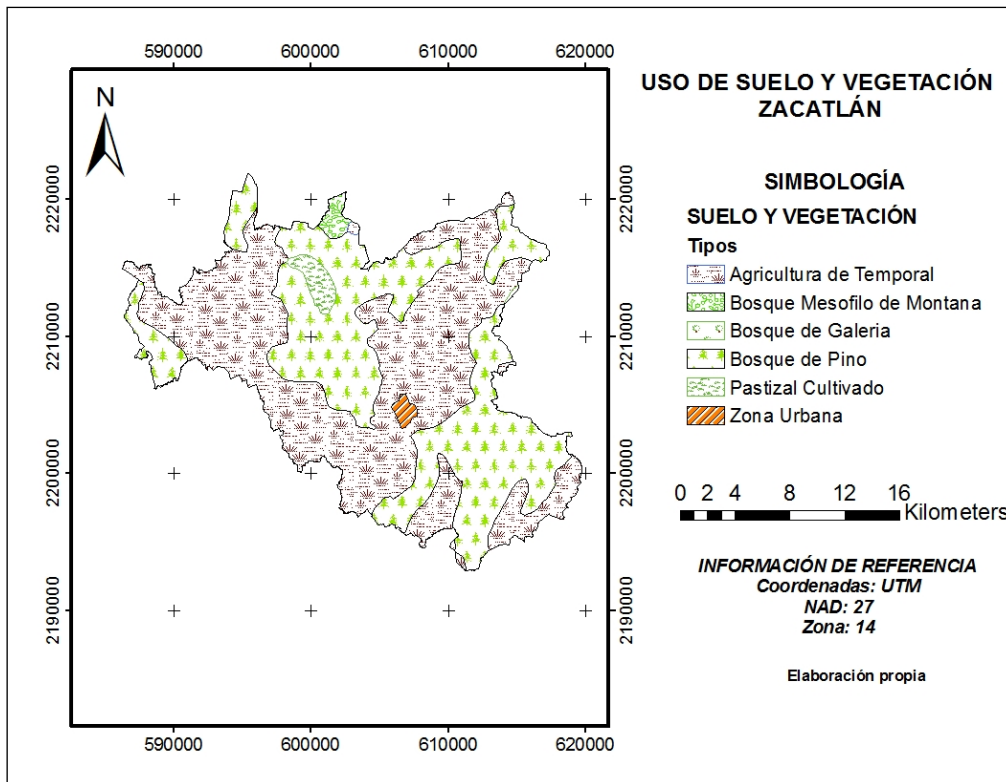


Figura 1.14. Uso actual del suelo del municipio de Zacatlán, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

Tipos de suelos

De acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO (1998), los suelos característicos del municipio de Zacatlán son: Acrisol, Andosol, Cambisol, Feozem, Luvisol, Rendzinas y Vertisol. La gran diversidad edáfica presente en el municipio es debida a su ubicación geográfica, topografía y clima. El suelo predominante en el municipio es el Andosol representando el 45.2% del territorio (Figura 1.15). La descripción de manera individual de los suelos en la región según FitzPatrick (1984) es:

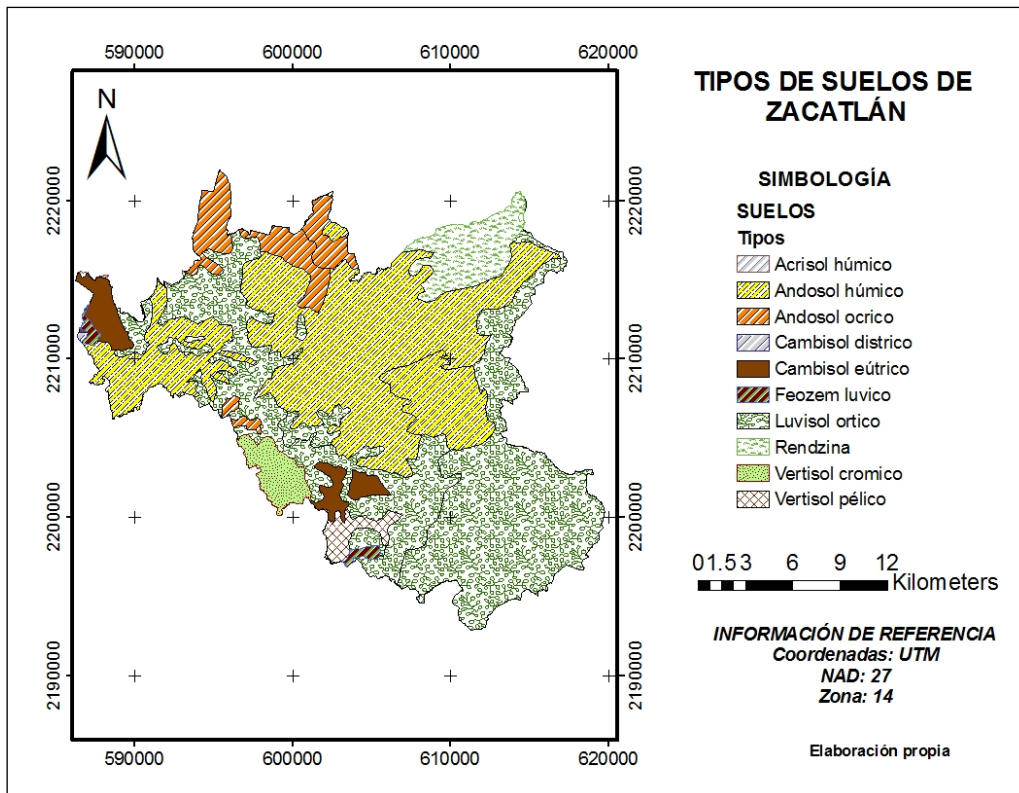


Figura 1.15. Tipos de suelos del municipio de Zacatlán, Puebla. Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

Acrisol: Es un suelo que fácilmente se erosiona debido a que está constituido por horizontes arcillosos. Se forman en su mayoría sobre roca o material parental por lo que se les considera como suelos pobres en nutrientes; estos suelos representan el 0.17% del territorio de Zacatlán.

Andosoles: Estos suelos se forman a partir de cenizas volcánicas por lo que su textura es muy suelta teniendo alta susceptibilidad a la erosión eólica e hídrica, y se encuentran asociados principalmente con bosques templados. Este suelo es el más predominante dentro del municipio representando el 45.2% y por sus características no se recomienda realizar cambio de uso del suelo de forestal a ganadero o agrícola.

Cambisol: Son suelos jóvenes poco desarrollados que tienen una alta distribución y se localizan en 99% de los climas excepto en climas secos. Estos suelos no presentan diferencias entre el suelo y la roca que les dio origen por lo que son moderadamente susceptibles a la erosión y representan un 3.5% del municipio de Zacatlán.

Feozem: Son suelos ricos en materia orgánica y nutrientes, y tienen amplia distribución en zonas semiáridas, templadas o tropicales. Estos suelos mantienen cualquier tipo de vegetación y se presentan tanto en áreas planas como en áreas montañosas. Dentro del municipio, sólo existe una pequeña región (0.8%) del territorio con este tipo de suelo.

Luvisol: Estos suelos se desarrollan principalmente en climas fríos o cálidos y están formados por material no consolidado como depósitos eólicos o aluviales. Los suelos predominan en zonas con pendientes suaves con gran potencial para la agricultura. El municipio de Zacatlán presenta un 41.4% de su territorio con este tipo de suelos.

Redzina: Son suelos muy ricos en materia orgánica situados principalmente sobre roca caliza y con profundidad aproximada de 50 cm. En el municipio, se encuentra sobre este tipo de suelo en únicamente 4.3% del territorio.

Vertisol: Son suelos arcillosos, frecuentemente de color negro, gris o rojizos, en condiciones húmedas. Los suelos son pegajosos y bajo condiciones de sequía son agrietados y duros por lo que fácilmente se erosionan y en muchas ocasiones presentan sales. La asociación de vegetación es muy variada y representan el 3.69% del territorio de Zacatlán.

Clima

Zacatlán cuenta con diversos tipos de clima entre los que se encuentran el semicálido húmedo con lluvias todo el año, templado húmedo con lluvias todo el año y el templado subhúmedo (Figura 1.16). Los principales factores que determinan el clima en esta zona son la dirección de los vientos que generalmente circulan del suroeste al noroeste, y la topografía accidentada. A continuación se describen de manera particular los tipos de climas de acuerdo a García (1998) y SMRN (2007).

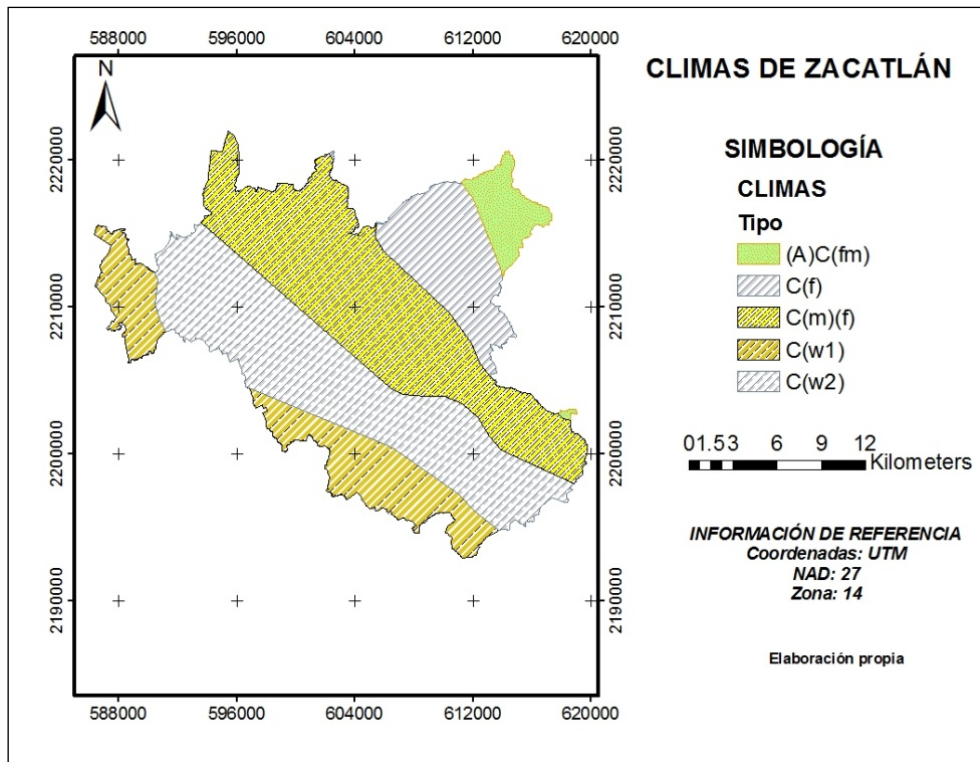


Figura 1.16. Distribución espacial de los climas en el municipio de Zacatlán, Puebla.
 Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995)

(A)C(fm): Semicálido húmedo con lluvias todo el año: Este clima es el predominante en el área ya que representa el 51% del municipio de Zacatlán. La temperatura media anual fluctúa entre 18° y 24 °C de acuerdo a la altitud y a la exposición de los vientos húmedos del golfo. Con una precipitación total anual entre 1200 y 4500 mm.

C(f): Templado húmedo con lluvias todo el año: Este clima cubre el 25% del municipio. La temperatura media anual varía entre 12 y 18 °C. La precipitación del mes más seco es mayor de 40 mm. La lluvia invernal es menor a 18 mm con respecto a la precipitación anual.

C(w1): Templado subhúmedo: Este clima es poco representativo de la zona con sólo el 0.56% del territorio. La temperatura media anual varía 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; el porcentaje de lluvia invernal es menor a 5.

C(w2): Templado subhúmedo: Este clima cubre el 22.37% del municipio de Zacatlán. La temperatura media anual varía entre 12 y 18 °C; la temperatura del mes más frío fluctúa entre -3 °C y 18 °C y la del mes más caliente asciende hasta 22 °C. La precipitación total anual va de 700 a 1,500 mm y el porcentaje de lluvia invernal varía entre 5 y 10.

Vegetación

El municipio cuenta con una gran cantidad de bosque de coníferas principalmente de pino con asociaciones de pino–encino y bosque mesófilo de montaña dispersos en todo el territorio (INAFED, 2010).

(1) El bosque mesófilo de montaña se presenta en climas húmedos, con una gran variedad de especies, y en lugares con relieve accidentado, laderas escarpadas y cañadas protegidas por el viento y la insolación. Generalmente estos bosques se desarrollan en lugares con gradientes de humedad alta desarrollándose en estos ecosistemas árboles mayores a 25 metros entre los que se encuentra el liquidámbar, encino y una gran gama de epífitas, orquídeas y bromeliáceas.

(2) El bosque de pino ocupa las áreas localizadas en altitudes mayores a 2,500 m. Destacando especies como *Pinus ayacahuite*, *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis* y *P. teocote*.

(3) El bosque de pino – encino presenta especies de los géneros *Pinus* y *Quercus* este bosque se presenta en zonas con alturas variables y presenta influencia por factores tales como: exposición, humedad, temperatura, viento (SMRN, 2007).

Fauna

Dentro del municipio de Zacatlán existen hábitats de una gran diversidad de fauna, dentro de estas especies se encuentran a los mamíferos como la zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*), el tejón (*Nasua narica*), y el mapache (*Procyon lotor*); estas especies se encuentran presentes en el bosque mesófilo de montaña, bosque de pino- encino y bosque de pino. En las áreas más cercanas a las barrancas se encuentra el ocelote (*Felis pardalis*), gato montés (*Lynx rufus*) inclusive se menciona la presencia del temazate (*Mazama americana*), ardilla arbórea (*Sciurus aureogaster*), zorrillo espalda blanca (*Conepatus leuconotus*), cincuate (*Pituophis*

deppei) lagartija (*Sceloporus* spp.) (De la Masa, 2001). Entre las aves presentes en este bosque se encuentra el loro de cabeza amarilla (*Amazona* spp.), gorrión (*Carpodacus mexicanus*), colibrí (*Amazilia Beryllina*), colibrí (*Lampornis amethystinus*), colibrí enano (*Atthis heloisa*), jilguero encapuchado (*Carduelis notata*), y chara (*Aphelocoma ultramarina*) (SMRN, 2007).

Actividades económicas

Dentro de las actividades económicas del municipio se encuentra la agricultura principalmente la siembra y cultivo de maíz en grano, trigo, frijol y forrajes tales como la avena y alfalfa. Por otro lado, el cultivo de frutales (manzana, “blueberry”, durazno, ciruela y café) es una actividad económica y cultural importante para el municipio, sin dejar a un lado la explotación de ganado (ovino, porcino y bovino) (SMRN, 2007; INEGI, 2010).

En la actualidad, el turismo en Zacatlán es uno de los factores más importantes para el crecimiento económico del municipio aprovechando el potencial que tiene de paisaje, clima, cultura regional, turismo cultural y de naturaleza, ofertando servicios de hotelería, gastronomía y artesanías, en general la economía del municipio se basa en actividades agropecuarias y de comercio (Figura 1.17) (Cruz, 2011).

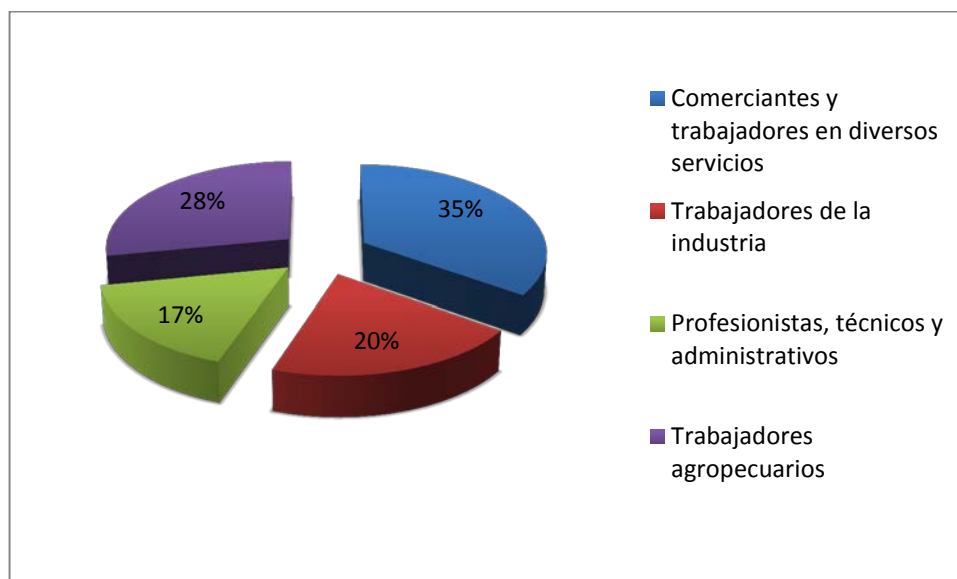


Figura 1.17. Porcentaje de la población por actividad económica de Zacatlán, Puebla. Fuente: INEGI. Censos de población y vivienda (2010).

1.3 HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

La falta de planificación del territorio ha generado una alta degradación de los recursos naturales y vulnerabilidad de la población. Como consecuencia a esta problemática surge la necesidad de incorporar técnicas de planeación en el manejo de los recursos naturales y la ocupación del territorio. El incremento o disminución de la problemática ambiental está asociada al crecimiento y la relación de los recursos naturales (INE, 2006; CONDESAN, 2007).

A partir de la falta de planificación y el deterioro de los recursos naturales se generaron marcos conceptuales para elaborar, instrumentar, evaluar y dar seguimiento a los instrumentos de planificación territorial. Los instrumentos de planificación territorial se definen como el proceso continuo de toma de decisiones en distintas actividades con la finalidad de lograr una verdadera sustentabilidad del territorio, considerando los problemas territoriales desde un punto de vista global e integral involucrando los aspectos económicos, sociales, culturales y ambiental. (Rosete, 2006; SRA, 2007).

A continuación se define una serie de conceptos relacionados con la planificación territorial.

1.3.1 Territorio

La conceptualización del tema territorial se puede determinar bajo un enfoque holístico social que integra las relaciones sociales, políticas y económicas (Llanos, 2010). El concepto territorio se deriva principalmente en los años de 1990 a partir de las políticas de desarrollo de la Unión Europea y se identifica como una dimensión geográfica que desde el punto de vista físico, económico y social puede o no coincidir con los límites administrativos; por lo que es más una representación mental (FAO, 2008).

Los geógrafos consideran al territorio como parte del espacio definido por límites (líneas) con un sistema de leyes y una unidad de gobierno; por tanto, define la división territorial dentro de la historia de la humanidad (Schneider y Peyré, 2006). Suertegaray (2001) concuerda con esta definición debido a que incluye el concepto de relaciones de poder que se establecen sobre el espacio y entre los actores que lo ocupan. Basándose en estas ideas, Raffestin (1993) sostiene que las relaciones de

poder se originan de incontables puntos y por tanto, en un territorio, los poderes se afectan de manera y grados diferentes para cualquier acción de planificación.

Posteriormente, Santos (1996) considera al territorio como parte del espacio comprendido por su multidimensionalidad. Dichas dimensiones están construidas por prácticas sociales en relación con la naturaleza. Las múltiples dimensiones del territorio construidas por acciones e intenciones son producto de relaciones sociales, culturales, económicas, ambientales y políticas (Gottmann, 1997). Para poder realizar la planificación de un territorio es importante tomar en cuenta la multidimensionalidad; lo anterior ayuda a entender la totalidad del territorio y proporciona herramientas para poder determinar el uso adecuado de los recursos naturales y la preservación del ambiente (FAO, 2008). En general, los geógrafos, sociólogos, etnógrafos, planificadores y/o antropólogos definen al territorio según sus límites o referencias tales como la nación, estado, paisaje o una extensión agrícola incluyendo todas las relaciones que se realizan dentro de los límites (Del Cueto, 2007)

1.3.2 Ordenamiento territorial

El ordenamiento se entiende como la acción o efecto de colocar las cosas en un lugar que se considere adecuado, manteniendo una interacción equilibrada y armónica entre los componentes del territorio (Gross, 1998). El ordenamiento del territorio (OT) se considera como una estrategia de planificación. La carta Europea de ordenación del territorio (1983) lo define como una disciplina científica cuyo objetivo es el desarrollo equilibrado de las regiones y la organización física del espacio; sin embargo, también señala que el OT es una expresión espacial de las políticas económicas, social, cultural y ecológica de cualquier sociedad. Con la finalidad de lograr un desarrollo equilibrado de las regiones y organización física del espacio, en América Latina y el Caribe se crea la Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente en 1990. Dicha comisión menciona que el OT busca una distribución geográfica de la población y sus actividades de acuerdo con la integridad y potencialidad de los recursos naturales que conforman el entorno bio-físico y con la finalidad de tener mejores condiciones de la vida (Cabeza, 2002).

Al no establecerse una definición consensuada del OT, la SEDESOL (2009) considera al OT como un instrumento de planeación y que tiene por objetivo regular

las intervenciones de la sociedad sobre el territorio. En México, se adoptó una definición y un método propio de OT compatible con las prioridades del Gobierno Federal y plasmada en las Leyes Federales y en el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012. La Ley General de Asentamientos Humanos plantea que el OT es un proceso de distribución equilibrada y sustentable de la población y de las actividades económicas en el territorio nacional; lo anterior, teniendo como propósito el mejoramiento del nivel y calidad de vida de la población urbana y rural. Por tanto, se requiere de una distribución equilibrada y sustentable de los centros de población y actividades económicas en el territorio nacional. El Plan Nacional de Desarrollo 2007- 2014 tiene como objetivo frenar la expansión desordenada de las ciudades y tener un suelo apto para el desarrollo urbano facilitando el acceso y servicios a las comunidades urbanas y rurales (SEDESOL, 2009).

Con el objetivo de profundizar sobre el conocimiento del OT se presentan algunos enfoques que se originan a partir de los intereses de quienes participan en el proceso de ordenación del territorio (Gómez, 1994; Santana, 2004). Éstos incluyen el:

Económico: En este enfoque de ordenamiento, no hay interés en los impactos sociales o ambientales, su objetivo consiste en aumentar la productividad y competitividad de las actividades económicas del territorio. A este enfoque se le denomina “economicista o desarrollista”.

Ecológico: El objetivo de este enfoque es el desarrollo de un determinado territorio considerando el uso sostenible de los recursos naturales con que se cuenta. El ordenamiento territorial se considera como un instrumento para lograr el desarrollo sostenible a partir de la conservación, protección y recuperación tanto de los recursos naturales como del patrimonio histórico cultural; por lo que se denomina a este enfoque como ambientalista.

Social: A este enfoque se le conoce como humanista ya que pretende mejorar las condiciones de vida de la población a través del ordenamiento territorial, este enfoque visualiza las condiciones de manejo, uso y conservación del ambiente, para que posteriormente mejoren las condiciones de bienestar de la gente.

Integral: Representa lo ideal, ya que considera al ordenamiento territorial una estrategia de desarrollo integrado del territorio. Los objetivos económicos, ecológicos y sociales se compatibilizan, pretendiendo tener un desarrollo económico competitivo, que sea social y culturalmente justo, ecológicamente sustentable y regionalmente armónico y equilibrado.

1.3.3 Planificación

Los orígenes clásicos de la administración y consecuentemente de la planificación surgen como resultado del crecimiento acelerado y desorganizado de las empresas a partir de la revolución industrial en el año de 1530 (FAO, 2006). Posteriormente, la planificación del uso de la tierra se desarrolló para tener una base y poder lograr un balance entre el desarrollo y la protección ambiental; de tal manera que la planificación se define como un procedimiento formalizado que tiene por objetivo producir un resultado articulado bajo la forma de un sistema integrado de decisiones (Bryson, 1988).

La FAO (1993) define a la planificación del uso de la tierra como una evaluación sistemática del potencial de la tierra y el agua para determinar alternativas y definir la mejor opción del uso de la tierra considerando las condiciones sociales y económicas. El propósito de la planificación es seleccionar y poner en práctica aquellos usos que mejor satisfagan las necesidades de la población y al mismo tiempo salvaguardar los recursos para el futuro. Posteriormente, la FAO (2002) indica que la planificación de la tierra es un proceso de decisiones lógicas en el cual se evalúan los recursos en el contexto de objetos y las opciones potenciales son identificadas para ser implementadas por el usuario de la tierra. La planificación, principalmente se basa en la premisa de que los recursos de la tierra varían y que las propiedades y las características de cada área establecen las bases de las posibles opciones de uso.

1.3.4 Áreas prioritarias

Las áreas prioritarias de conservación se definen a partir de la base que existe una alta biodiversidad, características principales y únicas del país, incorporando aspectos de alto valor ecológico, amenazas antropogénicas y oportunidades para la conservación. Estas áreas tienen como objetivo identificar patrones espaciales

adecuados para futuros usos de la tierra de acuerdo a los requisitos específicos o preferencias de las actividades a realizar (Collins *et al.*, 2001; Morgan *et al.*, 2005).

La selección de áreas prioritarias para la conservación es un tema que se ha promovido en México en las últimas dos décadas, primero por grupos de investigación del extranjero y más recientemente por investigadores nacionales (Ceballos *et al.*, 1998; Bojórquez *et al.*, 2004; Cantú *et al.*, 2004; Riemann y Ezcurra, 2005; Ceballos, 2007). En México, se reunieron diversas instituciones gubernamentales y no gubernamentales nacionales e internacionales con la finalidad de realizar investigación en la conservación de la biodiversidad en el país (Arriaga *et al.*, 2009). Estas investigaciones mostraron avances que indican que México sobresale en el número de localidades de importancia para la conservación en el ámbito mundial, esperando la conservación de una alta diversidad biológica (Ricketts *et al.*, 2005).

Las áreas prioritarias de conservación representan la fuente potencial de conflictos que se generarían al hacer uso de la tierra, estas áreas necesitan ser atendidas a corto, mediano y largo plazos para frenar su deterioro (Rodríguez, 2003). La regionalización de las áreas prioritarias incluye la identificación de sitios con alto valor de biodiversidad en los ambientes terrestres, así mismo considera criterios de oportunidad para su conservación tales como: (1) proporción de áreas bajo un manejo inadecuado, (2) importancia de los servicios ambientales, y (3) presencia de grupos organizados (Arriaga *et al.*, 2009).

Rodríguez (2003) menciona que la identificación de áreas prioritarias de conservación se puede aproximar con métodos intuitivos o métodos analíticos cuantitativos. Los métodos intuitivos se han utilizado en análisis de identificación de áreas críticas para la conservación y se basan en gran medida en la experiencia de expertos. Estas aproximaciones son interesantes pero presentan incertidumbre y un margen de error elevado en la delimitación de las áreas prioritarias. Las técnicas cuantitativas reducen la incertidumbre y la inconsistencia en los resultados, se basan principalmente en análisis estadísticos y espaciales (Rodríguez, 2003).

1.3.5 Riesgo de deforestación

En las últimas décadas, los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones; la mayoría debido a los cambios que realiza el hombre a la naturaleza a través de los procesos de deforestación y degradación forestal. Los impactos están asociados a la destrucción de la biodiversidad de bosques templados, cambiando las condiciones climáticas y a su vez poniendo en riesgo las fuentes importantes de captura de carbono (Lambin *et al.*, 1999; Bocco *et al.*, 2001). Los grandes cambios asociados al avance de la frontera agrícola hacia la superficie forestal ha traído como consecuencia la aparición de suelos frágiles con alta susceptibilidad a la erosión y muy baja productividad (Orozco *et al.*, 2004).

Los sistemas de información geográfica se han utilizado para la evaluación del cambio de uso de la tierra y determinar las zonas con riesgo a la deforestación (Sandoval, 2005; Pineda, 2008). Pineda *et al.* (2008) realizaron en el Estado de México un análisis de cambio de uso del suelo mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariada, aproximando los procesos de deforestación. De esta manera, para explicar el cambio ocurrido en la cobertura forestal se empleó regresión múltiple y regresión logística utilizando datos a nivel de pixel y de municipio. Rosete *et al.* (2008) analizaron el cambio de uso del suelo y vegetación en la península de Baja California, México, a través de un análisis espacial con la finalidad de observar los cambios en la vegetación que existen en los diferentes periodos de tiempo.

1.3.6 Carbono aéreo

La capacidad que tienen los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa aérea y en el suelo varía según la composición de los ecosistemas, la edad y la densidad de las poblaciones del ecosistema (Schulze *et al.*, 2000). Por las condiciones de mitigación del cambio climático, la capacidad de evaluar el potencial de carbono aéreo en los ecosistemas forestales, naturales, o inducidos por el hombre constituye un reto. Esta medición de biomasa aérea se puede realizar utilizando métodos directos destructivos o estimaciones indirectas del material vegetal (Brown *et al.*, 1989; Maser *et al.*, 2000). Los métodos destructivos consisten en determinar el carbono a través de ecuaciones alométricas realizadas con mediciones directas del material vegetal, los métodos indirectos permiten

estimar el carbono utilizando inventarios forestales, estas mediciones generalmente son más económicas (Husch, 2001; Ordoñez y Masera, 2001; Ordoñez, 2008; Fonseca *et al.*, 2009)

Dentro de los métodos directos o destructivos para evaluar la biomasa aérea se han utilizado ecuaciones alométricas en áreas manejadas y no manejadas de bosques templados (Etchevers *et al.*, 2002; Rodríguez *et al.*, 2006; Aguirre *et al.*, 2009 y Méndez *et al.*, 2011). Las ecuaciones alométricas permiten predecir la producción de biomasa en función de variables morfológicas, fisiológicas o bioquímicas permitiendo estimar relaciones dadas entre la biomasa total con la que cuenta el árbol y dimensiones como: Altura, diámetro normal, área de albura (Acosta *et al.*, 2002). Por otro lado, la utilización de métodos indirectos consiste en generar ecuaciones y modelos a partir de datos generados en inventarios forestales, siendo posible estimar la biomasa a partir del volumen del árbol en función de la densidad de la madera y un factor de expansión permitiendo predecir la biomasa en forma no destructiva; lo anterior, estima el carbono de la biomasa aérea de forma más simple (Brown y Lugo, 1984; Husch, 2001; Ordoñez y Masera, 2001; Ordoñez, 2008; Fonseca *et al.*, 2009).

1.3.7 Aplicaciones de herramientas de planificación territorial

En México se ha reconocido la importancia del capital natural como un activo económico y se ha buscado la forma de proteger los recursos mediante incentivos económicos y otras herramientas de planificación territorial (International Community Foundation, 2011). Una de las herramientas de planificación es el ordenamiento territorial ecológico se asocia al uso de los SIG's (Sistemas de Información Geográfica) a través de la superposición y manipulación de información con la finalidad de combinar datos y observar sus interrelaciones. Esta herramienta tiene la capacidad de analizar los datos geográficos que definen el problema a resolver con el uso de la planificación territorial y ambiental (Bosque, 1999).

El ordenamiento ecológico territorial se usa como una herramienta de planificación ya que busca evitar las disfuncionalidades dentro de un territorio y tiene la finalidad de lograr un desarrollo sustentable dentro del mismo territorio (Rocattagliata, 1996). Ejemplos de estudios de caso de ordenamiento ecológico territorial en México incluyen: El Ordenamiento ecológico marino y regional del Golfo de México y Mar

Caribe, el ordenamiento ecológico de la Cuenca del Valle de México, el ordenamiento ecológico de la región Tuxpan así como el ordenamiento ecológico del municipio de Loreto Baja California (SEMARNAT, 2012).

Estos proyectos de ordenamiento ecológico en la República Mexicana han recibido un monto por 23.8 millones de pesos para poder realizar las acciones, programas y proyectos con la finalidad de regularizar el territorio a nivel federal, municipal o regional (Plan de Desarrollo Municipal, 2007- 2012). Los ordenamientos ecológicos territoriales pretenden dar coherencia a las políticas de administración pública federal (APF) usando una planificación integral y transversal del territorio e identificando áreas con mayor aptitud y áreas de atención prioritaria; con la finalidad de minimizar los conflictos ambientales derivados del uso de los recursos naturales.

La identificación de áreas prioritarias es una herramienta de planificación que ayuda a determinar, evaluar y priorizar las zonas con alguna dificultad o característica de priorización. La determinación de áreas prioritarias debe de ir acompañada de acciones que optimicen los recursos tanto sectoriales como geográficos de dichas zonas (García y Lagares, 2011). Avena y Alberto (2008) realizaron en Brasil un estudio donde se delimitaron las áreas prioritarias de conservación del bosque utilizando el método de la media ponderada ordenada, este método utilizó un análisis multicriterio y SIG. Dentro de los criterios considerados para la investigación se consideró la proximidad de aguas superficiales, a parches de bosques, distancias a zonas urbanas, distancias a camino, vulnerabilidad a erosión, entre otros.

Por otro lado, Pressey y Taffs, (2001) realizaron un programa de conservación, donde se identificaron áreas prioritarias de vulnerabilidad a la pérdida de vegetación en Gales. Para este estudio, se utilizó el método de media ponderada ordenada a través de SIG, considerando criterios como suelo, relieve y vegetación. A través del Programa Estatal para la Compensación por Servicios Ecosistémicos, Vargas *et al.* (2009) determinaron las áreas prioritarias de captura de carbono, servicios hidrológicos y biodiversidad en el estado de Chiapas con la finalidad de identificar las áreas potenciales de servicios ecosistémicos; en este caso, la identificación de las áreas prioritarias se realizó mediante álgebra de mapas y talleres participativos realizados en el estado de Chiapas.

1.4 OBJETIVOS

Los objetivos de la presente investigación incluyen:

- a) Diseñar, construir y aplicar modelos de cambio de uso del suelo aniveles regional (Chignahuapan–Zacatlán) y municipal que permita estimar zonas de riesgo de deforestación.
- b) Estimar la aptitud de carbono en bosques manejados de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla con la finalidad de conocer los reservorios de carbono, considerando los posibles conflictos de uso y riesgo de deforestación.
- c) Generar estrategias de manejo para la conservación de áreas prioritarias para captura de carbono en el área bajo estudio.

1.5 HIPÓTESIS

Es posible definir áreas prioritarias de captura de carbono a través de inventarios de los programas de manejo y un modelo que prediga riesgo de deforestación en el área de estudio.

1.6 LITERATURA CITADA

- Acosta M., M., J. Vargas, H., A. Velázquez, M. y J. D. Etchevers, B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 6: 725-736.
- Aguirre S., C. A., J.R. Valdez L., G. Ángeles P., H.M. de los Santos P., R. Haapanen. y A.I. Aguirre S. 2009. Mapeo de carbón aéreo en bosques manejados de pino Patula en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43: 209-220.
- Anuario Estadístico del Estado de Puebla. 2011. Elaborado mediante información proporcionada por el INEGI 2010. Puebla, Puebla. 3 p.
- Arriaga C., L., V. Aguilar y J.M. Espinoza. 2009. Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad, en *Capital natural de México. Estado de conservación y tendencias de cambio*. CONABIO, México 2: 457.
- Arriaga C., L., V. Aguilar., M. Espinoza J., C. Galindo., H. Hermann., E. Santana C., S. Graf M., I. Pisanty y L. Rosenzweig. 2009. Regiones prioritarias y planeación para la conservación de la biodiversidad, en *capital natural de México. Estado de conservación y tendencias de cambio*. CONABIO, México. 2: 433-457.
- Averna V., R. O. and C.A. Vettorazzi. 2008. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. *Forest ecology management* 256: 1408-1417.
- Bocco, G., M. Mendoza y O.R. Maser. 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, Instituto de Geografía, UNAM, México. Boletín 44: 18-38.
- Bojórquez T., L. A., H. De la Cueva., S. Díaz., D. Melgarejo., G. Alcantar., J. Solares M., G. Grobet and G. Cruz B. 2004. Environmental conflicts and nature reserves: Redesigning Sierra San Pedro Mártir National Park, Mexico. *Biological Conservation* 117: 111-126.
- Bosque S., J y R. García. 1999. Asignación óptima de usos del suelo mediante generación de parcelas por medio de SIG y técnicas de evaluación multicriterio. VII Conferencia Iberoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica. Mérida, Venezuela, 12 p.
- Brack E., A. y C. Mendiola. 2000. *Ecología del Perú*. Editorial Bruño. Lima, Perú. 495 p.
- Brown, S. and A. Lugo. 1984. Estimating biomass and biomass change of tropical forest: FAO forestry paper Roma. 134 p.
- Brown, S., J .R. Gillespie A. and E. Lugo A. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 2: 881-92.
- Bryson J., M. and D. Roering W. 1988. Initiation of strategic planning by governments. *Public Administration Review* 48: 995-1004.

- Cabeza Á., M. 2002. Ordenación del territorio en América Latina. *Scripta Nova*, geografía y ciencias sociales 6:1.
- Cantú, C., J .M. Scott and R. G. Wright. 2004. The Gap Analysis Program on the assessment of nature reserves of México. *Gap Analysis Bulletin* 10: 8-11.
- Ceballos, G. 2007. Conservation priorities for mammals in megadiverse Mexico: The efficiency of reserve networks. *Ecological Applications* 17: 569-578.
- Collins M., G., F. R. Steiner and M.J. Rushman. 2001. Land-use suitability analysis in the United States: Historical development and promising technological achievements. *Environmental management* 28: 611-621.
- CONDESAN, 2007. Diálogos de políticas, ordenamiento territorial. Una herramienta para el desarrollo. 4 p.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). 2010. Índice de marginación por localidad. México. D.F. sp.
- Cortés E., R. 2009. Inventario del archivo parroquial de Santiago Apóstol, Chignahuapan, Puebla. México: Apoyos al desarrollo de archivos y bibliotecas de México, Lugar de publicación? 32 p.
- Cruz G., M.A. 2012. Primer informe de Gobierno Zacatlán, Puebla. 2011- 2014. Zacatlán, Puebla. 130 p.
- Cuarto Informe de Ejecución del plan Nacional de Desarrollo. 2007-2012. Ordenamiento Ecológico. En línea: <http://pnd.calderon.presidencia.gob.mx/sustentabilidadambiental/ordenamiento-ecologico.html>. Mayo del 2010.
- De Europa, C. 1983. Carta europea del territorio. Aprobada en 6ª CEMAT celebrada en Torremolinos, España. 7 p.
- Del Cueto M., C. 2007. Territorio y sectores populares. Una discusión entre la geografía y la sociología. *Prácticas de oficio. Investigación y reflexión en Ciencias Sociales*, 11: 11-18.
- Enciclopedia de los municipios de México (INAFED). 2009. Los Municipios de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla. En línea: http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_Puebla.
- Enciclopedia de los municipios de México (INAFED). 2010. Los Municipios de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla. En línea: http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_Puebla.
- Etchevers B., J. D., J. Vargas H., M. Acosta M. y A. Velázquez M. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de las relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- FAO- UNESCO. 1998. 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. 128 p.

- Felipe B., J. J y J. Xercavins. 2004. Posibles escenarios futuros mundiales de emisiones y absorciones de CO₂ y cumplimiento de los acuerdos de Kyoto. Universidad politécnica de Catalunya, España. 246 p.
- FitzPatrick E., A. 1984. Suelos, su formación, clasificación y distribución. CIA. Editorial continental. México. D.F. 430 p.
- Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA). 2010. Desertificación. Roma, Italia. 4 p.
- Fonseca G., W., F. Alice G. and J.M. Rey B. 2009. Modelos para estimar biomasa en especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona del Caribe de Costa Rica. Bosque. Universidad Nacional Autónoma de Costa Rica 30: 36- 47.
- García V., M. A. y N. Lagares D. 2011. ¿Zonas prioritarias o acciones prioritarias? Desde qué perspectiva una zona prioritaria lo es para cualquier tipo de acción de ayuda al desarrollo. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales. Universidad de Santiago de Compostela. X congreso AECPA, Murcia. 33 p.
- García. E. 1998. Climas (Clasificación de Koppen, Modificado por García). Comisión Nacional para el Conocimiento y el Uso de Biodiversidad (CONABIO). México. s.p.
- Gómez O., D. 1994. Ordenación del territorio. Una aproximación desde el medio físico. Edit. Agrícola española, S. A. España. 238 p.
- Gottmann, J. 1973. The significance of territory, The University Press of Virginia, Charlottesville, United States of America, 169 p.
- Gross F., P. 1998. Ordenamiento territorial. El manejo de los espacios rurales. Pontificia Universidad Católica de Chile 24:6.
- Gutmann P., M., R. McCaa., R. Gutiérrez M. y B. Gratton. 2000. Los efectos demográficos de la Revolución Mexicana en Estados Unidos. El Colegio de México, A. C. Distrito Federal 50: 145-165.
- Guzmán Q., A., O.L. Palacios V., R. Carrillo G., J. Chávez M. y L. Nilkoskii G. 2007. Contaminación del agua superficial en la Cuenca del Río Texcoco, México. Colegio de Postgraduados. Agrociencia 41: 385-393.
- Hernández H., L. 2008. La ganadería ovina en pequeña escala y su impacto en el desarrollo rural, Chignahuapan, Puebla. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México. 172 p.
- Husch, B. 2001. Estimación de contenido de carbono de los bosques. INFORA. Chile. 9 p.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2006. La investigación ambiental para la toma de decisiones. Instituto Nacional de Ecología 2001-2006. INE-SEMARNAT, México, 320 pp.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2010. Censo de la población y vivienda. Base de datos digital. En línea: <http://www.inegi.org.mx/>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1900- 1930. Censo de la población y vivienda. Base de datos digital. En línea: <http://www.inegi.org.mx/>
- International Community Foundation. 2011. Áreas Prioritarias para la conservación en México. Series de trabajos de investigación sobre la jubilación de estadounidenses en México, 78 p.
- Lambin E., F., N. Baulies., G. Bockstael., T. Fisher., R. Krug., F. Lemmans E., R. Moran R., Y. Rindfuss., D. Sato., L. Skole B. and C. Vogel. 1999. Land use and land cover change implementation strategy, IGBP report, 48, IHDP, report 10, Estocolmo, s.p.
- Llanos H., L. 2010. El concepto del territorio y la investigación en las ciencias sociales, Universidad Autónoma Chapingo. Agricultura, sociedad y desarrollo 207- 220 pp.
- Martínez C., E. 1992. Recursos naturales, biodiversidad y uso sustentable. Botánica y fisiología, AIDIZA (CONICET), 11-18 pp.
- Masera, O., B. De Jong., y I. Ricalde. 2000. Consolidación de la oficina mexicana para la mitigación de gases de efecto invernadero. Instituto de Ecología Universidad Nacional Autónoma de México-ECOSUR, 197p.
- Méndez G., J., L. S. Luckie N., M. A. Capo A. y J.A. Najera L. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* y *P. pseudostrobus*, en Guanajuato, México. Instituto tecnológico del Salto, Durango, México. Agrociencia 45: 479-491.
- Mendoza G., M. E y G. Tapia C. 2010. Situación demográfica de México 1910-2010, 24 p.
- Morgan, L., S. Maxwell., F. Tsao., A.C. Wilkinson T. and P. Etnoyer. 2005. Marine priority conservation areas: Baja California to the Bering Sea. Commission for Environmental Cooperation of North America and the Marine Conservation Biology Institute. Montreal, 125 p.
- Olvera C., M. L. 2011. Plan de desarrollo municipal de Chignahuapan, Puebla. 2011-2014, Chignahuapan, Puebla. 175 p.
- Ordoñez B., J. A. y O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. Instituto de ecología A. C. Xalapa, México. Madera y bosque 7: 3-12.
- Ordoñez D., J. A. B. 2008. Como entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. Universidad Autónoma de México. Ciencias 90: 37-42.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2002. Metodología de la planificación. FAO, 70 p.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2006. Enfoques generales y métodos para la planificación territorial. Ordenamiento Territorial Rural Sustentable, 33 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 1993. Guidelines for land-use planning. FAO Development. Series 1. Rome, s.p.
- Orozco H., E., V. Pena M., R. Franco y N. Pineda. 2004. Atlas agrario ejidal del Estado de México. UAEM, Toluca, México. 123 p.
- Osorio, M., J. David y R. Correa. 2004. Valoración económica de los costos ambientales: Marco conceptual y métodos de estimación. Universidad de Medellín Colombia 7: 36.
- 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 69: 33-52.
- Pressey R., L and K. Taffs H. 2001. Scheduling conservation action in production landscapes: priority areas in western New South Wales defined by irreplaceability and vulnerability to vegetation loss. Biological conservation 100: 355- 376.
- Programa de Cooperación FAO. 2008. Programas y proyectos. Enfoques de desarrollo territorial en proyectos de inversión. Estudios de caso. FAO, 304 p.
- Puga, D. 2008. Crecimiento urbano desordenado: causas y consecuencias. Centre de Recerca en Economía Internacional (CREI), 29 p.
- Raffestin, C. 1993. Por la geografía del poder. Ática São Paulo. 269 p.
- Ricketts T., H., E. Dinerstein, T. Boucher, T.M. Brooks, S.H.M. Butchart, M. Hoffmann., J. Lamoreux., J. Marrison., M. Parr., J. D. Pilgrim., A. S. L. Rodriguez., W. Sechrest, G.E. Wallace., K. Berlin., J. Bielby., N. D. Burgess., D.R.Church., E. Wikramanayake., R. Naidoo., R. Moore., R. Ridgely., G. E. Schatz., G. Shire and H. Strand. 2005. Pinpointing and preventing imminent extinctions. Proceedings of the National Academy of Sciences 102: 18497-18501.
- Riemann, H. and E. Ezcurra. 2005. Plant endemism and natural protected areas in the Peninsula of Baja California, Mexico. Biological Conservation 122: 141-150.
- Rocattagliata, J. 1999. El territorio en escenarios de futuro. Reflexiones estratégicas sobre la organización territorial ante el siglo XXI. Programa de desarrollo territorial. Buenos Aires, 115 p.
- Rodríguez E., R. 2003. Manual de métodos para identificar áreas prioritarias de conservación de biodiversidad para el ordenamiento ecológico territorial. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 51 p.

- Rodríguez L., R., J. Jiménez P., O.A. Aguirre C. y E.J. Treviño G. 2006. Estimación del carbono almacenado en un bosque se niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL* 9: 179-187.
- Rojas L., O., M. J. González G., A. Gómez G. y J. Romo L. 2012. Renta de la tierra y pago de servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla. *Ciencias Forestales* 3: 41- 56.
- Rosete, F. 2006. Semblanza histórica del Ordenamiento Ecológico Territorial en México. Una perspectiva institucional. *Planeación territorial*. INE-SEMARNAT, México, 55 p.
- Rosete V., F. A., J. L. Pérez, D y G. Bocco. 2008. Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Boletín del instituto de geografía, UNAM* 67: 39-58.
- Sandoval, V. y P. Real. 2005 Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra. *Bosque* 26: 55-63.
- Santana J., M. V. 2004. La importancia del ordenamiento territorial. Tomo 27: 97-105.
- Santos, M. 1996. Metamorfosis del espacio habitado. Traducción. Vargas- Mesa G.M. (1995). 1ª Ed. Editorial oikos-tau. Barcelona, España, 82 p.
- Sarukhán, J., J. Soberon., L. Guerra J., D. Castri F. and T. Younés. 1996. Biological Conservation in a high beta-diversity country. *Biodiversity Science and Development. Towards a New Partnership*, 246- 269 pp.
- Scheid A., H. 1996. Política de ordenación de territorio en Europa Universidad de Sevilla 8: s.p.
- Schneider, S. y I.G. Peyré T. 2006. Territorio y enfoque territorial: Referencias cognitivas a los aportes publicados al análisis de los procesos sociales rurales. Editorial Ciccus. Buenos Aires, 71-102 pp.
- Schulze E., D., Ch. Whirth and M. Heimann. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science (Washington)* 289: 2058-2029.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2009. La política de SEDESOL en materia de Ordenación Territorial. V Congreso Internacional de Ordenamiento Ecológico y Territorial. Morelia, Michoacán. 41 p.
- Secretaria de la Reforma Agraria (SRA). 2007. Asentamientos irregulares en propiedad social. México D.F, 33 p.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2012. Ordenamientos Ecológicos decretados, s.p.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2008. Pérdida y alteración de los ecosistemas. En línea: http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/documents/sniarn/pdf/yel_medioambiente/version_2008/2_perdida_alteracion_v08.pdf.(Febrero 2010)

- Secretaria del Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SMRN). 2007. Diagnóstico socioeconómico y de manejo forestal unidad de manejo forestal, Zacatlán. Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan - Zacatlán. A.C, 281 p.
- Suertegaray, D.M.A. (2001). "Espaço geográfico uno e múltiplo" en Ambiente e lugar urbano a Grande Porto Alegre. Geografía y Ciencias Sociales 5: 79-104.
- Vargas G., A. Aguilar, M. S. Castillo, S. M. A. Esquivel, B. E. Hernández, V. M. A. López, G. A. M. Ouechulpa, M. S. 2009. Programa estatal para la compensación por servicios ecosistémicos una propuesta para Chiapas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 58 p.

CAPÍTULO II

MODELANDO LA DEFORESTACIÓN FUTURA EN DOS ESCALAS ESPACIALES

2.1 INTRODUCCIÓN

La planificación inadecuada de las actividades humanas altera la aptitud natural o predominante de los terrenos (Vitousek *et al.*, 1997; PROFEPA, 2013) a través de los cambios de uso natural a usos residencial, agrícola, pecuario, industrial o comercial (Geist y Lambin, 2002; Rosete *et al.*, 2008 Evangelista *et al.*, 2010) a diferentes escalas espacio-temporales (González, 2000). Los impactos negativos de estos cambios incluyen la pérdida de biodiversidad (Nellemann, 2001; Arriaga, 2009) y modificación de los componentes biofísicos (Arriaga *et al.*, 2004) desencadenando procesos de degradación ambiental, cambio climático y en varios casos, incrementan el riesgo de deforestación (Meyer y Turner, 1992; Velázquez y Bocco, 2003).

En México, a pesar de que las tasas netas de deforestación tienden a bajar de 276 mil ha año⁻¹ (0.35%) para el periodo 2000–2005 a 187 mil ha año⁻¹ (0.24% del área total) (CONAFOR-INEGI, 2009), todavía se mantienen tasas elevadas. Estas cifras se encuentran por arriba del promedio mundial (0.12% y 0.14%) aunque por abajo de Sudamérica (0.49% y 0.41%) (FAO, 2012). La deforestación en México depende de varios factores, pero uno muy importante es el económico donde se favorecen las actividades que permiten mayores ganancias a corto plazo. Por ejemplo, la SEMARNAT (2012) reporta que los precios altos de la madera promueven el cambio de uso del suelo, convirtiendo el 5.1% de los suelos de uso natural hacia usos agrícolas y pecuarios durante el periodo del 2002 al 2007.

Los bosques del estado de Puebla se ubican entre las áreas más productivas del país (SMRN *et al.*, 2009). Desafortunadamente, estos ecosistemas se han visto afectados por la degradación y deforestación en los últimos 40 años. De acuerdo con el Inventario Nacional Forestal (2000), se tiene una tasa de deforestación estimada de 10,012 ha por año y sólo se reforestan 1,892.6 ha, lo que sugiere que

la superficie total reforestada no es la suficiente para revertir el proceso de deforestación en la entidad (CONAFOR, 2012). Las principales causas de deforestación en el estado de Puebla se presentaron durante el periodo de establecimiento de la veda forestal estatal (1937 a 1995), ocasionando la destrucción de los recursos forestales por presencia de incendios forestales, cambio de uso de suelo, tala clandestina, plagas, enfermedades y pastoreo desordenado. Estudios recientes (Evangelista *et al.*, 2010 y Pineda *et al.*, 2009) demuestran que el cambio de uso del suelo y riesgo de deforestación están estrechamente relacionados con los precios de la madera, la extracción de leña, distancia a cuerpos de agua, viviendas, pendiente, expansión de la frontera agrícola y pastizales. Aún con esta información, no se tienen generalizadas las causas que provocan la deforestación y su riesgo, ni la escala espacial en que ellas actúan por lo que es necesario utilizar modelos que tengan la capacidad de identificar los patrones socioeconómicos y biofísicos que rigen tales procesos (Weins *et al.*, 1993).

El riesgo de deforestación depende de la escala de observación (O'Neill, 1989), por tal motivo se vuelve fundamental su análisis al realizar estudios de cambio de uso de la tierra. Lo anterior, permite visualizar el riesgo de deforestación a una escala apropiada, permitiendo proporcionar a los tomadores de decisión información de referencia conveniente para predecir y mitigar los impactos futuros. Por ejemplo, el análisis cualitativo y cuantitativo permite comprender y evaluar los impactos ambientales de la deforestación a diferentes escalas espaciales y temporales. Aunque la limitación de recursos frecuentemente va a limitar la oportunidad de realizar estos análisis a escalas múltiples (Krannich *et al.* 1994; Alcaraz *et al.*, 2008; Romero y Fuentes, 2009), la recolección de datos e información deben de ser adecuados al fenómeno o proceso a estudiar (Sullivan, 1997; González, 2000).

Los cambios de uso del suelo pueden ser estudiados bajo diferentes escalas espaciales (ejemplo, comunidad, pueblo o ciudad, municipio, región, estado y país) en donde cada escala espacial representa un enfoque apropiado y único para algunos factores de interés (Bocco *et al.*, 2001; Alcaraz *et al.*, 2008). En general, estudios a una escala grande, se asocian con grandes unidades de análisis (región, estado, país) y viceversa; sin embargo, existen excepciones que dependen del nivel de precisión del análisis. Diversos estudios han analizado el proceso de deforestación a nivel regional utilizando escalas grandes y considerando variables

socioeconómicas y ambientales para modelar dicho proceso (Mas *et al.*, 1996; Cháves y Rosero, 2001; Mas *et al.*, 2003; Pineda *et al.*, 2009; Bocco *et al.*, 2001). El INECC (2011) determinó el índice de riesgo de deforestación a nivel nacional considerando únicamente el índice de presión económica. Este estudio es una aproximación importante, indicando que el estado de Puebla tiene un promedio de deforestación de 3.3% (1, 099,935 ha año⁻¹) aunque la desventaja fue la escala (celdas utilizadas son de 300*300 m equivalente a 9 ha). En otros estudios se ha analizado el riesgo de deforestación (Trucíos *et al.*, 2013) o cambio de uso de suelo (González, 2000) a diferentes escalas espaciales.

Debido a que un fenómeno o proceso observado a una escala, puede o no repetirse en otra, es importante conocer la relación entre el riesgo de deforestación y sus impactos ambientales a diferentes escalas. El reconocimiento de los efectos de escala en el proceso de deforestación es una etapa importante en la generación de escenarios futuros de uso de la tierra considerando sistemas biofísicos y socioeconómicos (Trucíos *et al.*, 2013). Esta información es esencial para el desarrollo de políticas públicas efectivas de planificación de uso de la tierra. La elaboración y aplicación del modelo de cambio de uso de suelo y riesgo de deforestación en los municipios de Chignahuapan-Zacatlán, Puebla, es importante ya que mejoraría el conocimiento y permitiría estimar las probabilidades de deforestación en función de diversas variables socioeconómicas y biofísicas, además de determinar las causas que contribuyen al proceso de deforestación en diferentes escalas.

2.2 OBJETIVOS

- a) Ajustar y aplicar un modelo probabilístico de cambio de uso de suelo para la región Chignahuapan- Zacatlán, Puebla para estimar riesgo de deforestación.
- b) Usar el modelo regional para analizar los efectos de escala con modelos ajustados a nivel municipio sobre patrones que determinan la deforestación en el área de estudio.

- c) Generar un escenario futuro de cambios de uso de suelo y riesgo de deforestación a escalas regional y municipal que permitan una mejor toma de decisiones sobre la conservación de los recursos naturales.

Área de estudio

El área de estudio comprende la región de Chignahuapan y Zacatlán ubicada en la Sierra Norte del estado de Puebla (Figura 2.1); dicha región tuvo un crecimiento acelerado a partir de 1930 con asentamientos desordenados a orillas de ríos, arroyos y en zonas con pendientes pronunciadas. Como consecuencia a este crecimiento, se observan ecosistemas fragmentados que favorecen desastres naturales como deslaves, inundaciones y pérdida de biodiversidad (INEGI, 1900-1930; SMNR, 2007; Puga, 2008 y SNIM, 1990-2010). El deterioro de los recursos forestales ocasionó que una corriente conservacionista presionara al gobierno para establecer veda forestal en la Sierra Norte del estado. Sin embargo, esta veda ocasionó mayor destrucción del recurso forestal debido a una alta presencia de incendios forestales, cambio de uso del suelo, tala clandestina, plagas y enfermedades forestales, pastoreo desordenado e inadecuada administración de los recursos (SMNR *et al.*, 2009). Consecuentemente, un estudio realizado a nivel regional para los años (1986 a 2000) determina que el municipio de Chignahuapan pierde 9,655 ha por degradación y deforestación mientras que en el municipio de Zacatlán se presentó una superficie degradada de 15,072 ha (SMNR, 2007). Cabe señalar, que la tasa de deforestación decreció en los terrenos de propiedad ejidal ya que al levantarse la veda forestal en 1995, se impulsó el Método de Desarrollo Silvícola e incrementó la productividad en terrenos forestales en ambos municipios.

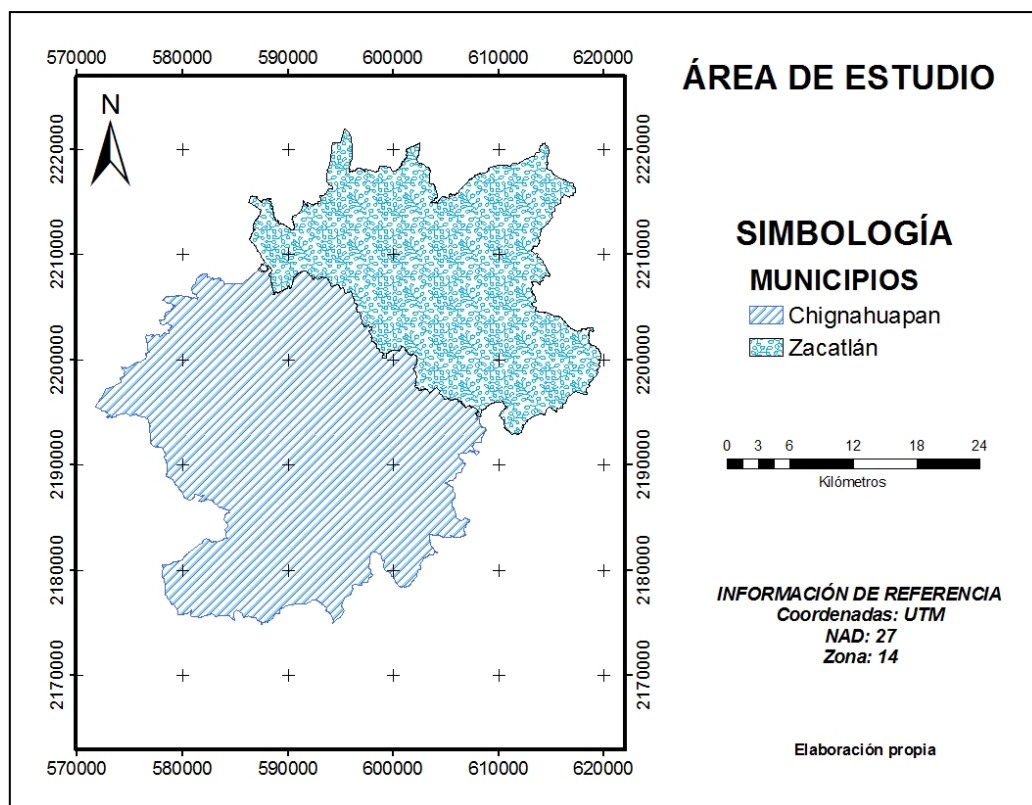


Figura 2.1. Localización de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.
 Fuente: Modificado de la cartografía de INEGI (1995).

2.3 MÉTODOS Y MATERIALES

La presente investigación incluyó tres fases generales: (1) Clasificación y detección de cambio de uso del suelo para el periodo de 1986 al 2011 a nivel regional y posteriormente a nivel municipal; (2) Generación del escenario base o “histórico” del riesgo de deforestación con la construcción del modelo probabilístico de deforestación con la generación de las variables independientes, dependiente y escenarios de deforestación en dos escalas espaciales; y (3) Estrategias para las áreas con riesgo de deforestación.

2.3.1 Clasificación y detección de los cambios de uso del suelo

(a) Clasificación y recorte de las imágenes

La clasificación de las imágenes para la generación de escenarios futuros de deforestación a diferentes escalas espaciales se deriva de un proyecto que analiza la deforestación de 13 municipios ubicados en la Sierra Norte del estado de Puebla

(Chávez, 2014). Se manejaron tres escenas de imágenes Landsat (1986, 1995 y 2011) corregidas y clasificadas mediante el programa PCI GEOMATIC Version 9.1. Se utilizó una clasificación supervisada a través de puntos de entrenamiento y recorridos de campo con la finalidad de eliminar los errores de atributos y geométricos. Por tanto, se realizó el recorte a nivel regional y posteriormente a nivel municipal de las imágenes corregidas y clasificadas por Chávez (2014). El recorte por municipio se realizó utilizando el programa IDRISI TAIGA (Clark Labs, 2009) mediante el modelo Imagen Calculator.

(b) Detección de cambios de uso del suelo

La detección de cambios de uso de suelo se realizó mediante el análisis bitemporal de 1986 al 2011 con el modelador de cambios (CrossTab) del programa Idrisi (Eastman, 2003). A través de la sobreposición de dos mapas se analizaron las transiciones de un uso a otro. El análisis se realizó a nivel regional (Chignahuapan, Zacatlán) y posteriormente a nivel municipal. Como resultado final, se generó una tabla y el mapa donde se identificaron las coberturas que han sufrido transiciones de forma sistemática o de forma aleatoria (Pontius *et al.*, 2004; López y Plata, 2009). Finalmente, con esta información se generó la tabla de superficie estable, ganancias y pérdidas para el periodo de 25 años (1986-2011) (Eastman, 2009; Pineda *et al.*, 2009).

La superficie estable se calculó al restar la superficie por clase del tiempo 2 (T2) menos el tiempo 1 (T1) e identificando toda aquella superficie que no sufrió ninguna transición, mientras que las ganancias representan la proporción de paisaje que aumentó de T1 al T2 y se obtuvo al utilizar la Ecuación (1). Finalmente, las pérdidas se obtienen mediante la utilización de la Ecuación (2) la cual se define como la cantidad de paisaje que disminuyó de T1 a T2 (Pontius *et al.*, 2004; Pineda *et al.*, 2009; López y Plata, 2009).

$$\text{Ganancias} = P_{11 \rightarrow n1} - P_{11 \rightarrow nn} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$P_{11 \rightarrow n1}$ = Sumatoria de las transiciones por clase en el tiempo 2 (T2).

$P_{11 \rightarrow nn}$ = Superficie estable por clase

$$\text{Pérdidas} = P_{11 \rightarrow 1n} - P_{11 \rightarrow nn} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$P_{11 \rightarrow 1n}$ = Sumatoria de las transiciones por clase en el tiempo 2 (T2)

$P_{11 \rightarrow nn}$ = Superficie estable por clase

2.3.2 Construcción del modelo probabilístico de deforestación

Para conocer la probabilidad de cambio de uso del suelo se empleó un modelo de regresión logística multinomial (Allison, 1999) (Ec. 3), el cual es una variante del modelo logístico binario clásico (Agresti, 1990; Andersen y Fienberg, 1990; Allison, 1999; González, 2000; Eastman, 2003; Said y Zarate, 2003; Montgomery, 2004). Este modelo utiliza variables dependientes de tipo nominal con más de dos categorías, donde las variables dependientes pueden ser continuas o categóricas. Tradicionalmente, las variables dependientes polinómicas han sido modeladas mediante análisis discriminante con la finalidad de eliminar las variables que tengan relación lineal entre sí (Hosmer y Lemeshow, 1989). Además, los modelos de regresión logística multinomial han sido de gran importancia en el sector forestal debido a que proporcionan resultados de fácil interpretación.

$$\hat{Y}_i = \frac{1}{1 + e^{-(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_4 x_4 + \dots + \hat{\beta}_{21} x_{21})}} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

\hat{Y}_i = probabilidad de que una hectárea cambie de uso forestal a otro uso

$\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_i$ = Estimadores de las variable dependiente (cambio de uso de suelo),
variables independientes (X_i).

e = base del logaritmo natural

X_i = Variables independientes (X_1, X_2, \dots, X_{21})

Para construir el modelo, se utilizó como variable dependiente el cambio de uso del suelo y se le otorgaron los valores de 1 a 4 dependiendo el cambio de uso del suelo. Por ejemplo, al cambio de forestal a agrícola se le otorgó el valor (2), de forestal a pastizal (3) y de forestal a urbano (4), mientras que al área sin cambio (forestal a forestal) se le asignó el valor (1) y se usó como variable de referencia. El análisis logístico se realizó con el programa estadístico SAS 9.0. Como factores explicativos para este modelo se utilizaron 21 variables entre las que se encuentran variables continuas y discretas (Cuadro 2.1).

El mapa de probabilidad de cambio de uso del suelo se construyó a partir del modelo de regresión logística utilizando la superficie sin cambio (forestal-forestal) que comprende 57,693 ha a nivel regional. Posteriormente, el modelo se corrió para cada municipio siguiendo el mismo procedimiento.

(a) Creación de valores para la variable dependiente

Para la creación de la variable dependiente se consideró el mapa de cambio de uso de suelo generado a nivel regional y municipal; además de la superficie forestal estable y los cambios ocurridos de agrícola-forestal, pecuario-forestal y residencial-forestal otorgándoles valores de 1, 2, 3, y 4 respectivamente. Posteriormente, se extrajo la información a nivel de hectárea mediante una malla de 100 x 100 m realizada con el programa ARC GIS versión 9.3 (ESRI, 2008) y el módulo “create fishnet”; consecutivamente se obtuvo el centroide de cada polígono de la malla para elaborar una base de puntos y poder extraer los valores con el comando extracción de valores de raster a punto.

(b) Medición de las variables independientes

Se formuló un modelo de regresión logística utilizando datos a niveles regional y municipal, considerando la hectárea como unidad básica de estudio; lo anterior, para explicar las posibles causas que provocan la pérdida de los bosques.

El estudio consideró la correlación de 21 variables independientes incluyendo aspectos sociales, económicos y ambientales (Cuadro 2.1); lo anterior con base a estudios previos de cómo diversos factores afectan los procesos de deforestación, tales como: Extracción de leña, distancia a cuerpos de agua, viviendas, pendiente, expansión de la frontera agrícola, pastizales, entre otros (Southgate y Basterrechea, 1992; Pinedo *et al.*, 2007; Pineda *et al.*, 2009; Altamirano y Lara, 2010).

Cuadro 2.1. Nombre, tipo, naturaleza y unidades de las variables independientes y dependiente incluidas en el modelo de regresión logística multinomial.

Nombre	Variable	Tipo de variable	Fuente	Unidades
Cambio de uso de suelo	(Yi)	Discreta	Cambio de uso del suelo 1986-2011 Imágenes Landsat	1-4
Distancia a aserraderos	(X1)	Continua	(SDRSOT, 2013)	Metros
Predios bajo manejo forestal	(X2)	Discreta	(SDRSOT, 2013)	0-1
Distancia a carreteras pavimentadas	(X3)	Continua	Cartas topográficas (INEGI, 1999)	Metros
Distancia a carreteras de terracería	(X4)	Continua	Cartas topográficas (INEGI, 1999)	Metros
Distancia a corrientes permanentes	(X5)	Continua	Carta hidrográfica (INEGI, 1999)	Metros
Densidad poblacional	(X6)	Continua	(CONAPO, 2010)	Metros
Distancia a manantiales	(X7)	Continua	Cartas topográficas (INEGI, 1999)	Hab ⁻¹ ha ⁻¹
Altitud	(X8)	Continua	Elaboración propia (MDE) (INEGI, 1999)	Metros
Pendientes	(X9)	Continua	Elaboración propia con base en (MDE)	Porcentaje
Distancias a brechas	(X10)	Continua	Cartas topográficas (INEGI, 1999)	Metros
Distancia a veredas	(X11)	Continua	Cartas topográficas (INEGI, 1999)	Metros
Distancia a hogares que usan leña o carbón	(X12)	Continua	Censo poblacional (INEGI, 2000)	Metros
Distancia a marginación alta	(X13)	Continua	(CONAPO,2010)	Metros
Distancia a marginación muy alta	(X14)	Continua	(CONAPO,2010)	Metros
Distancia a marginación media	(X15)	Continua	(CONAPO,2010)	Metros
Distancia a marginación baja	(X16)	Continua	(CONAPO,2010)	Metros
Distancia a población mayor a 100 habitantes	(X17)	Continua	Censo poblacional (INEGI, 2010)	Metros
Distancia a límites agrícolas	(X18)	Continua	Imágenes clasificadas landsat, 1986	Metros
Distancia a pastizales	(X19)	Continua	Imágenes clasificadas landsat, 1986	Metros
Tenencia ejidal	(X20)	Discreta	(INEGI, 2013)	0-1
Tenencia privada	(X21)	Discreta	(INEGI, 2013)	0-1

Los valores de las variables independientes se calcularon para cada celda de la cuadrícula (100 x 100 m) utilizando el software ARC GIS versión 9.3, (ESRI, 2008) con el comando extracción de valores de raster a punto. Posteriormente, se depuró la base de datos obtenida a través de una inspección visual con el programa Microsoft Office Excel ®. La selección de criterios que mejor explican el cambio en la variable dependiente (cambio de uso del suelo) se realizó mediante análisis

logístico y con el procedimiento Stepwise para el proceso de deforestación a través del programa SAS 9.0 (Silva, 1995; Beltrán, 2011).

(c) Escenario de deforestación futura (2010-2030)

Escenario base: Para estimar el escenario de riesgo de deforestación se consideró el incremento de los habitantes del 2010-2030 para cada municipio de acuerdo a las estadísticas reportadas por CONAPO (2010) y tomando en cuenta que cada nuevo habitante requerirá espacios de uso residencial, agrícola, y pecuario.

Para obtener la densidad poblacional promedio a nivel regional y municipal se extrajo la información del total de habitantes reportados por el censo de población y vivienda de INEGI para los años 1980, 1995 y 2010; además se consideró la superficie de uso del suelo agrícola, pecuario, forestal, y residencial para los años 1986, 1995 y 2011 obtenidas de la clasificación de imágenes satelitales. Para generar el escenario de deforestación futura se consideró el incremento de nuevos habitantes del periodo 2010-2030 a nivel regional y por municipio (CONAPO, 2010). Para ambos niveles, se determinó la densidad poblacional promedio de 1985-2010 (INEGI 1985-2010) por tipo de uso de suelo. Por ejemplo, a nivel región, Chignahuapan y Zacatlán en los usos agrícola, pecuario y residencial, la densidad poblacional (hab. ha^{-1}) fue de (6.65, 49.14, 100.82), (1.10, 90.26, 70.82) y (4.54, 11.62, 327.47), respectivamente. Tomando como base esa densidad “histórica”, se procedió a poblar los nuevos habitantes dando prioridad a aquellas celdas con mayor probabilidad de cambio de uso de suelo en los mapas de probabilidad, generando el mapa de escenario base o “histórico” de riesgo de deforestación.

(d) Comparación de escalas

La comparación de escalas se realizó a partir de los resultados cuantitativos y cualitativos de los mapas de riesgo de deforestación de la región y de los municipios, para lo cual se realizó un mapa de comparación del modelo regional y municipal. Posteriormente, se realizaron graficas de dichos modelos representando la superficie dependiendo de la probabilidad de riesgo.

2.3.3 Estrategias de manejo para la superficie con riesgo de deforestación

Se generaron estrategias ambientales, sociales y económicas, dependiendo del riesgo de deforestación, con la finalidad de que los manejadores de los recursos

naturales y forestales las consideren para una planeación y conservación futura a nivel regional y municipal.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1 Detección de los cambios de usos del suelo a nivel regional

(a) Clasificación de los usos del suelo a nivel regional

El Cuadro 2.2 muestra que en 1986, el uso principal de suelo en la región Chignahuapan-Zacatlán era el agrícola representando el 46.0% de la superficie total, le siguen con menor importancia, el uso forestal y el pecuario con 41.7% y 11.9% de la superficie total. Sin embargo, durante el periodo 1986-1995, el uso agrícola mostró una reducción del 15.9%. Esto se debió quizás al incremento en los usos residencial, pecuario, forestal y otros (cuerpos de agua) con 118.8%, 21.4%, 10.5% y 28%, respectivamente. Lo anterior, significó una recuperación sustancial de la actividad forestal en la región (Maass *et al.*, 2006) y un incremento en la actividad pecuaria. Este incremento, probablemente fue influenciado por los apoyos proporcionados al sector pecuario por la SAGARPA (FAO, 2000; Hernández, 2008).

Para el periodo siguiente de 1995 a 2011, el uso agrícola pasó de ocupar 48,313 a 62,022 ha, incrementando un 28.4%. En este periodo, el uso residencial mantuvo una tasa de incremento de 118.2%, similar al periodo anterior; mientras que el incremento de los otros usos y del forestal fue casi nulo (Cuadro 2.2). En contraste con lo anterior, el uso pecuario se redujo sustancialmente (81.5%) al pasar de 18,060 a 3,348 ha en este periodo.

Al conjuntar ambos periodos (1986-1995 y 1995-2011) y analizarlos en uno sólo (1986-2011), se observa que los terrenos con uso pecuario decrecieron de 14,876.1 a 3,348 ha (Cuadro 2.2), lo que representó un decremento de 77.5%. El uso que mayormente creció en superficie fue el residencial con 377.3%, siguiéndole en orden descendente, los usos forestal y agrícola con 10.9% y 7.9% cada uno. Evangelista *et al.* (2010) y Pineda *et al.* (2009) señalan que los usos agrícola y residencial en la Sierra Norte de Puebla presentan una tendencia a incrementar; sin

embargo, las superficies ocupadas por el uso forestal y pecuario tienden a disminuir en el periodo analizado (Figura 2.2c).

Espacialmente, el incremento en el uso de suelo residencial se dio en la periferia de zonas pobladas de la región (Figura 2.2a, 2.2b y 2.2c). El uso de suelo agrícola se localiza en las partes cercanas a las zonas urbanas observándose un incremento de 1986 al 2011 (Figura 2.2a y 2.2c). Asimismo, el suelo forestal muestra (Figura 2.2c) una ligera reducción de espacios fragmentados en la zona noroeste del área. A nivel regional, el uso residencial tuvo un aumento de 377% en 25 años, pese a este incremento significativo se observan a nivel espacial (Figura 2.2c) pequeñas superficies cubiertas por dicho uso.

Cuadro 2.2. Superficie (ha) por uso de suelos para los años 1986, 1995 y 2011 a nivel regional (Chignahuapan-Zacatlán).

Usos	1986	1995	2011	1986-1995	1995-2011	1986-2011
	Superficie (ha)			Tasas de cambio (%)		
Forestal	52,032.8 (41.7%)	57,576.5 (46.1%)	57,693.6 (46.2%)	10.7	0.2	10.9
Agrícola	57,473.8 (46%)	48,313.2 (38.7%)	62,022.3 (49.7%)	-15.9	28.4	7.9
Pecuario	14,876.1 (11.9%)	18,060.2 (14.5%)	3,348 (2.7%)	21.4	-81.5	-77.5
Residencial	341.9 (0.3%)	748 (0.6%)	1,631.9 (1.3%)	118.8	118.2	377.3
Otros	93.6 (0.075%)	119.8 (0.096%)	121.1 (0.097%)	28.0	1.1	29.4
Total	124,817	124,817	124,817			

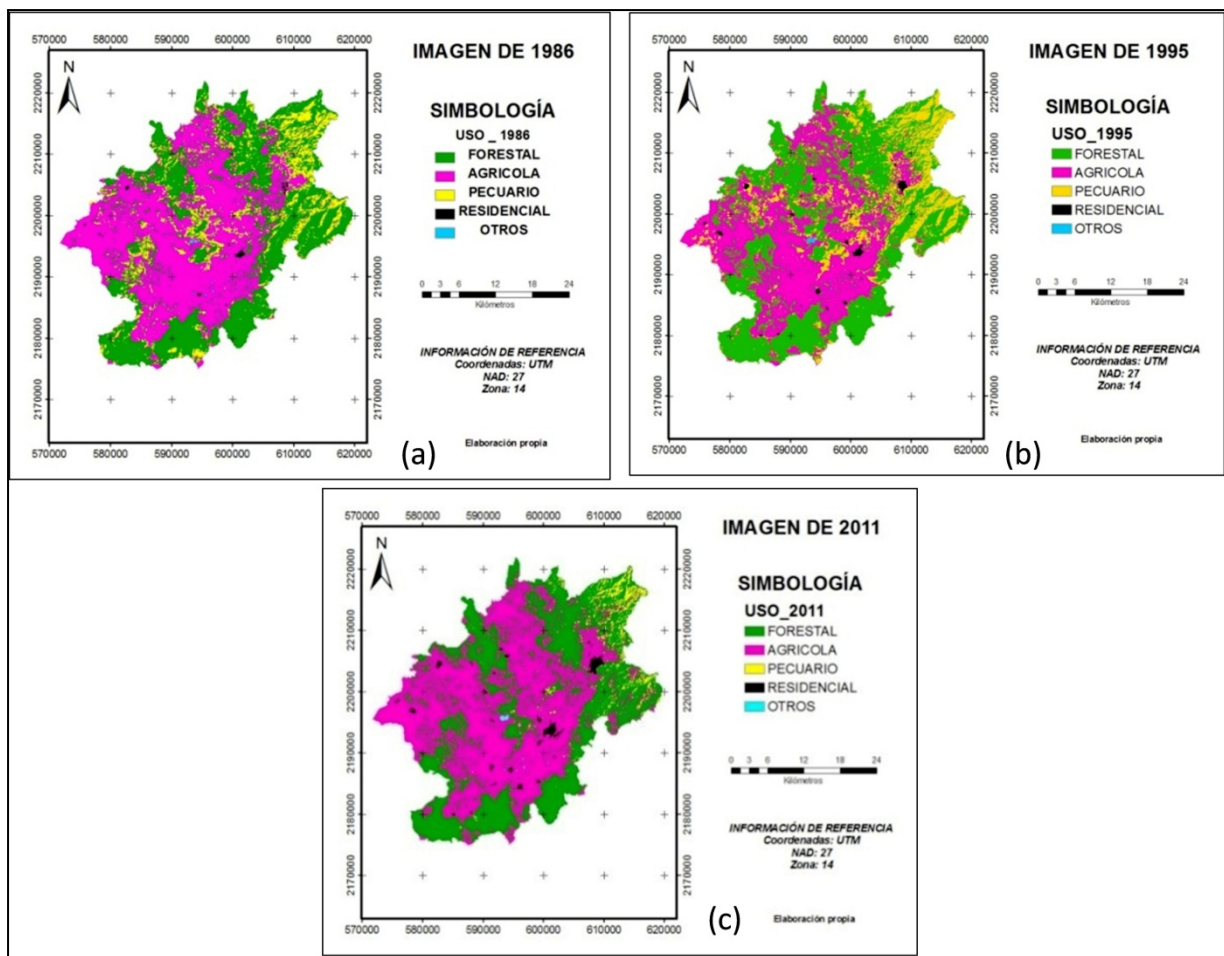
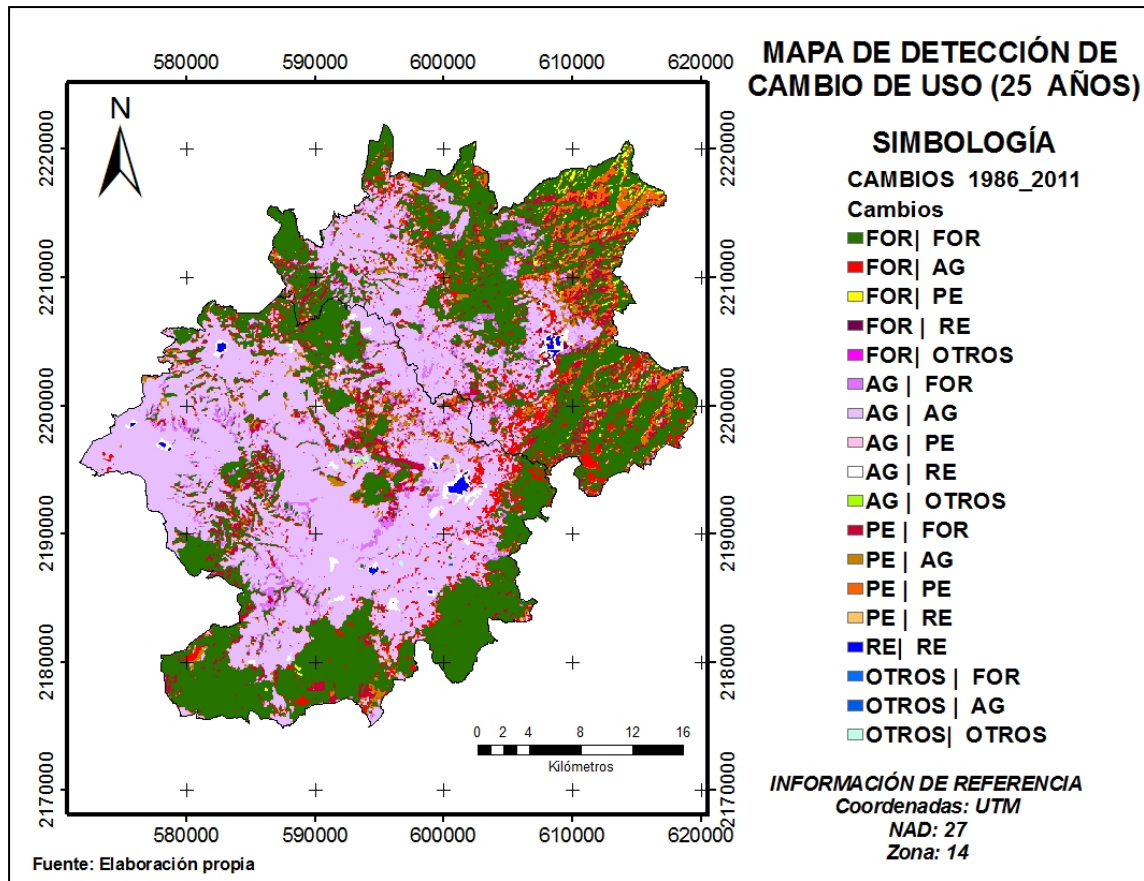


Figura 2.2. Distribución espacial del suelo durante los años 1986 (a), 1995 (b) y 2011 (c) a nivel regional (Chignahuapan- Zacatlán).

(b) Detección de cambio de uso del suelo

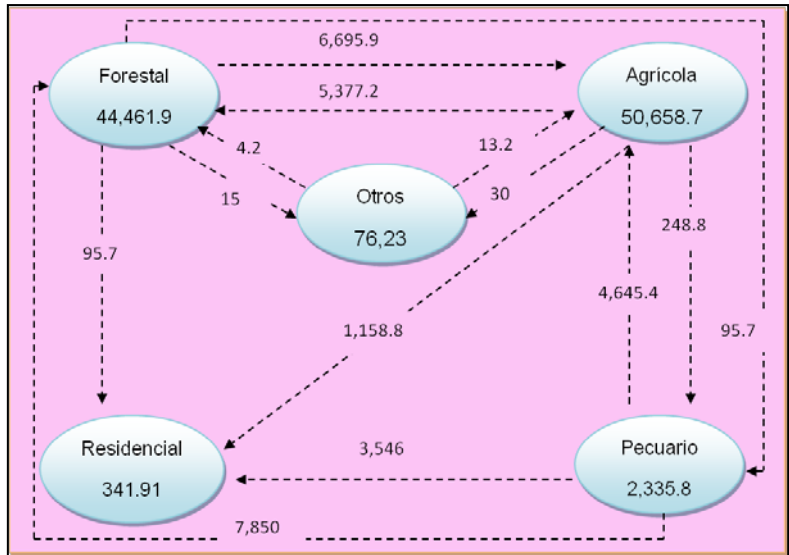
Durante el periodo de 25 años, la superficie localizada al noroeste de la región presentó una dinámica mayor de cambio de uso del suelo (Figura 2.3), mostrando una fragmentación directa del ecosistema forestal al presentarse cambios por transición hacia los usos pecuario y agrícola. Se observa los principales macizos forestales distribuidos en la parte sur y sureste de la región en 2011 (SMRN, 2007; Pineda *et al.*, 2009).



Nota: FOR= Forestal, AG= Agrícola, PE= Pecuario, RE= Residencial y OTROS = Cuerpos de agua

Figura 2.3. Detección de cambio de uso de suelo a nivel regional en el periodo de 25 años (1986-2011).

La Figura 2.4 muestra la dinámica del cambio de uso del suelo de 1986 al 2011, donde se identifica que el uso agrícola conservó 50,658 ha (88.1%), pese a las pérdidas ocurridas por el cambio a uso forestal, pecuario y residencial teniendo una transición de 9.3%, 0.43% y 2%, respectivamente. Aún con esta pérdida, el 12.8 % de la frontera agrícola se extendió hacia el uso forestal y el 31.2% de uso pecuario se convirtió en uso agrícola. El uso forestal tuvo un incremento del 52.7% debido a la reconversión del uso pecuario a forestal. Al existir dichos cambios, el uso pecuario sólo conservó el 15.7% de su territorio. Mientras que el incremento del 71% de la superficie residencial se obtuvo a partir de la transformación de terrenos agrícolas a superficies residenciales.



Nota: Las cantidades se refieren a las superficies en hectáreas, las flechas indican la dirección de cambio y los óvalos los grupos de uso actual y la superficie estable.

Figura 2.4. Diagrama de transición del uso del suelo en el periodo de 1986 al 2011 a nivel regional.

La agricultura es considerada la actividad con mayor cobertura a nivel regional debido a que conservó el 40.5% de su superficie con respecto al total del área de estudio (124,818 ha). A lo largo de 25 años, dicha actividad amplió sus límites y ocupó 19.7% de superficie de otros usos aunque perdió 11.8% del territorio regional (Cuadro 2.3). En general, la superficie agrícola incrementó 7.9% a nivel regional, representando el 59.5% de las actividades desarrolladas en el sector primario (SMRN, 2007; INAFED, 2009).

El 85% de la superficie forestal no mostró cambio de ocupación en el periodo de 25 años (Cuadro 2.3), a pesar de que en el periodo de 1986 a 2011 obtuvo una ganancia por cambio de ocupación de 25.4% y una pérdida de sólo 14.5%. Escalona (2005) menciona que la disminución de los recursos forestales se debe al aprovechamiento ilegal de la madera.

La actividad productiva que menos se realiza es el uso pecuario, conservando únicamente 15.7% de la superficie original (14,876 ha). Este uso ha perdido el 82.4%, y tuvo un incremento poco significativo de 1.9%. Por el contrario, el uso residencial tuvo un incremento de 380% en los últimos 25 años, asociado a un incremento poblacional de 66.4% (INEGI, 2010); lo anterior influyó en la expansión de la mancha urbana cerca de los límites agrícolas (Figura 2.3).

Finalmente, el uso otros son los que menos superficie estable ocupan (0.06%) comparativamente con los otros usos; esta superficie ha incrementado en 29.9% con respecto a la superficie de 1986 (3.69 ha). El incremento de la superficie de cuerpos de agua intermitentes se debe a la inundación de terrenos agrícolas por causa de las precipitaciones recurrentes (SMRN, 2007).

Cuadro 2.3. Superficie de estabilidad, ganancias y pérdidas por tipo de ocupación del suelo y porcentaje en relación a la superficie por uso en el 2011 a nivel regional en el periodo de 1986-2011.

Ocupación	Superficie 1986 (ha)	Superficie 2011 (ha)	Diferencia de superficie 1986-2011 (ha)	Superficie estable (ha)	Pérdidas por cambio de ocupación (ha)	Ganancias por cambio de ocupación (ha)
Forestal	52,032.88 (90.19%)	57,693.78 (100%)	5,660.90 (9.81%)	44,461.98 (77.07%)	7,570.9 (13.12%)	13,231.8 (22.93%)
Agrícola	57,473.38 (92.67%)	62,022.34 (100%)	4,548.96 (7.33%)	50,658.76 (81.68%)	6,814.62 (10.99%)	11,363.58 (19.70%)
Pecuario	14,876.10 (444.32%)	3,348.09 (100%)	-11,528.01 (-344.32)	2,335.86 (69.77%)	12,540.24 (374.55%)	1,012.23 (1.75%)
Residencial	341.91 (20.95%)	1,631.97 (100%)	1,290.06 (79.05%)	341.91 (20.95%)	0 (0)	1,290.06 (2.24%)
Otros	93.69 (76.94%)	121.77 (100%)	28.08 (23.06%)	76.23 (62.60%)	17.46 (14.34%)	45.54 (0.08%)

2.4.2 Modelos probabilísticos de cambio de uso del suelo a nivel regional y municipal

(a) Variable dependiente a nivel regional y por municipio

A nivel regional y municipal se consideró la superficie correspondiente al uso forestal debido a que el modelo lo utiliza como variable dependiente para estimar el riesgo de deforestación; por tanto, se consideraron 57,593 ha correspondientes a la variable dependiente a nivel regional, 29,654 ha para Chignahuapan y 28,039 en Zacatlán.

(b) Estadísticas básicas de las variables independientes

En el Cuadro 2.4 se observa que el número total de observaciones es de 52,832 celdas o ha, mostrando que algunas variables independientes reportan medias menores a 1 tales como los predios bajo manejo forestal, densidad de población y

tenencia de la tierra, las cuales son variables dicotómicas con desviación estándar que varía entre 0.4 y 0.5. Las medias con valores altos pertenecen a variables cuantitativas y estas variables se relacionan a las distancias a carreteras, aserraderos y la población. El resultado de la desviación típica está en función de los valores mínimos y máximos de cada variable ya que indica la dispersión de los datos respecto a la media (Morales, 2008).

Cuadro 2.4. Estadísticas básicas de las variables independientes y dependiente.

Nombre de la variable		Tipo de variable	Media	Desviación típica	Unidades	Mínima	Máximo
Cambio de uso de suelo	(Yi)	Discreta	1.16	0.42	1-4	1	4
Distancia a aserraderos	(X1)	Continua	3830	2331	Metros	18.24	17655
Predios bajo manejo forestal	(X2)	Discreta	0.42	0.49	0-1	0	1
Distancia a carreteras pavimentadas	(X3)	Continua	3641	2446	Metros	0	13270
Distancia a carreteras de terracería	(X4)	Continua	1491	1146	Metros	0	6494
Distancia a corrientes permanentes	(X5)	Continua	1383	1251	Metros	0	7116
Densidad poblacional	(X6)	Continua	1.15	0.4	Metros	0.45	1.72
Distancia a manantiales	(X7)	Continua	2768	1416	Hab./ ha.	0	8340
Altitud	(X8)	Continua	2467	409.72	Metros	882.66	3437
Pendientes	(X9)	Continua	28.8	23.63	Porcentaje	0	268.09
Distancias a brechas	(X10)	Continua	2034	1479	Metros	0	6641
Distancia a veredas	(X11)	Continua	572.98	449.41	Metros	0	2419
Distancia a hogares que usan leña o carbón	(X12)	Continua	1529	813.81	Metros	0	4242
Distancia a marginación alta	(X13)	Continua	1611	854.23	Metros	0	5336
Distancia a marginación muy alta	(X14)	Continua	5502	3404	Metros	0	14270
Distancia a marginación media	(X15)	Continua	5409	2797	Metros	0	13272
Distancia a marginación baja	(X16)	Continua	4672	3037	Metros	301	9999
Distancia a población mayor a 100 habitantes	(X17)	Continua	1654	826.72	Metros	0	4224
Distancia a límites agrícolas	(X18)	Continua	487.71	479.18	Metros	30	2686
Distancia a pastizales	(X19)	Continua	302.42	323.03	Metros	30	2282
Tenencia ejidal	(X20)	Discreta	0.29	0.46	0-1	0	1
Tenencia privada	(X21)	Discreta	0.6	0.49	0-1	0	1

n= 52,832

(c) Correlación entre variables a nivel regional y por municipio

A nivel regional y en el municipio de Zacatlán existe una correlación positiva entre las variables dependientes con el cambio de uso del suelo; pero no existe relación lineal entre las variables independientes (Cuadro 2.5); por tanto, las 21 variables son significativas en el proceso de deforestación, además en el Cuadro 2.5 se muestra la importancia relativa de cada variable; es decir, el orden en que tales variables

entraron al modelo. Por tanto, la variable distancia a límites agrícolas contribuye más al proceso de deforestación indicando que a menor distancia a límites agrícolas existe mayor riesgo de deforestación. Mas *et al.* (2003) concuerdan que los límites agrícolas son una de las principales causas que provocan la deforestación, mientras Cháves y Rosero (2001) coincide que la distancia mínima a vías de comunicación son las variables que menos influyen en el proceso de deforestación a nivel regional y municipal considerando que la distancia a carreteras pavimentadas es la variable menos significativa en la deforestación.

Sin embargo, para el municipio de Chignahuapan se eliminaron las variables que no tienen relación con el cambio de uso del suelo forestal (Cuadro 2.5) excluyendo a la densidad de población, distancia a veredas, marginación baja, tenencia ejidal y privada; ya que su inclusión no fue significativa en el modelo (Villagarcía, 2004). Indica que la inclusión de las variables no significativas en el modelo dificulta la distinción de las variables independientes que explican el cambio de uso de suelo.

Cuadro 2.5. Importancia relativa de las variables independientes y nivel de significancia para el modelo logístico regional y municipal

Variable	REGIÓN			Chignahuapan			Zacatlán		
	Wald		Imp.	Wald Chi-		Imp.	Wald Chi-		Imp.
	Chi-cuadrado	Pr> ChiSq		cuadrado	Pr> ChiSq		cuadrado	Pr> ChiSq	
(X1)	118.87	< .0001	14	2329.59	<.0001	11	189.76	<.0001	8
(X2)	584.75	< .0001	4	47.5	<.0001	6	589.12	<.0001	4
(X3)	20.29	0.0001	21	23.52	<.0001	10	13.68	0.0034	21
(X4)	25.09	< .0001	19	17.7	0.0005	15	36.99	<.0001	16
(X5)	225.17	< .0001	7	16.34	0.001	5	93.24	<.0001	13
(X6)	67.15	< .0001	18	NS			13.95	0.003	20
(X7)	22.05	< .0001	20	9.72	0.0211	8	38.84	<.0001	17
(X8)	2551.55	< .0001	2	9.82	0.0201	1	1139.77	<.0001	2
(X9)	1975.69	< .0001	3	16.94	0.0007	2	1895.1	<.0001	1
(X10)	60.49	< .0001	17	1475.93	<.0001	13	32.43	<.0001	18
(X11)	157.76	< .0001	10	NS			181.53	<.0001	10
(X12)	325.28	< .0001	6	940.11	<.0001	14	362.59	<.0001	5
(X13)	118.39	< .0001	12	170.61	<.0001	12	108.81	<.0001	12
(X14)	162.81	< .0001	11	162.47	<.0001	16	134.38	<.0001	11
(X15)	70.65	< .0001	16	166.59	<.0001	9	15.78	0.0013	19
(X16)	76.31	< .0001	15	NS			54.48	<.0001	14
(X17)	124.64	< .0001	13	95.01	<.0001	7	46.55	<.0001	15
(X18)	3600.43	< .0001	1	56	<.0001	3	1013.95	<.0001	3
(X19)	399.22	< .0001	5	26.03	<.0001	4	197	<.0001	9
(X20)	404.19	< .0001	9	NS			261.09	<.0001	7
(X21)	207.78	< .0001	8	NS			331.65	<.0001	6

Nota: (X1) Distancia a aserraderos; (X2) Predios bajo manejo forestal; (X3) Distancia a carreteras pavimentadas; (X4) Distancia a carreteras de terracería; (X5) Distancia a corrientes permanentes; (X6) Densidad poblacional; (X7) Distancia a manantiales; (X8) Altitud; (X9) Pendientes; (X10) Distancias a brechas; (X11) Distancia a veredas; (X12) Distancia a hogares que usan leña o carbón; (X13) Distancia a marginación alta; (X14) Distancia a marginación muy alta; (X15) Distancia a marginación media; (X16) Distancia a marginación baja; (X17) Distancia a población mayor a 100 habitantes; (X18) Distancia a límites agrícolas; (X19) Distancia a pastizales; (X20) Tenencia ejidal y (X21) Tenencia privada; NS= no significativa. $\hat{P} \leq 0.05$; Imp.= Importancia donde 1 mas importante en el proceso de deforestación y 21 menos importante.

(d) Estimadores de las variables independientes por cambio de ocupación

Los estimadores y las variables independientes que influyen en la deforestación difieren ya que cada escala espacial (regional o municipal) representa un enfoque apropiado para estudiar el proceso; por ejemplo, la escala regional está asociada a grandes unidades de paisaje y considera 21 variables significativas en el proceso de deforestación, mientras que a nivel municipal dichas unidades de paisaje se

fraccionan considerándose, 21 variables independientes específicas para Zacatlán y 16 variables para Chignahuapan. Por tanto, los estimadores de las variables independientes a nivel regional y municipal generan un modelo diferente para cada cambio de uso de la tierra (forestal/agrícola, forestal/pecuario y forestal/residencial) (Bocco et al., 2001; Alcaraz et al., 2008).

Posteriormente, a nivel regional se determinaron las variables no significativas para predecir la probabilidad de cambio forestal a uso agrícola indicando que la distancia mínima a carreteras pavimentadas, terracería, corrientes permanentes y densidad de la población no son significativas (Cuadro 2.6). Pese a descartar cuatro variables para el cambio de forestal a pecuario sólo coinciden las variables relacionadas a vías de comunicación (carreteras pavimentadas y terracería); mientras que para el modelo del cambio forestal a uso residencial se consideraron solamente 14 variables que influyen de manera negativa en este cambio.

El modelo para determinar probabilidad de cambio forestal-agrícola en el municipio de Zacatlán consideró 19 variables independientes eliminando las variables altitud y distancia a marginación alta por resultar no significativas (Cuadro 2.6). Sin embargo, el modelo de cambio de forestal a pecuario consideró 13 variables eliminando variables sociales y económicas; esto probablemente se deba a que los sistemas de producción pecuarios se encuentran alejados de las zonas urbanas y semiurbanas; por su parte la probabilidad de cambio de suelo forestal a uso residencial incluyó únicamente 11 variables significativas.

Finalmente, el modelo utilizado para obtener el cambio de uso de forestal a agrícola para el municipio de Chignahuapan se alimentó con 14 variables que influyen en el proceso de deforestación, eliminando algunas variables tales como distancia mínima a brechas y marginación alta ya que no fueron significativas. En la determinación de la probabilidad de cambio de forestal a uso pecuario el modelo logístico consideró solamente cinco variables que explican dicho cambio; posteriormente, el modelo para determinar el cambio de forestal a residencial se construyó con cuatro variables (distancia a corrientes permanentes, pendiente, marginación alta y distancia a población mayor a 100 habitantes) que influyen de manera negativa en el proceso de deforestación (Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6. Resultados de la regresión logística, estimadores de las variables independientes, por cambio de uso de suelo a nivel regional y municipal.

	REGIÓN								
	$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/Agrícola (1.3113)}$			$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/ Pecuario}$			$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/Residencial (13.2483)}$		
	$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)	$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)	$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)
(X1)	0.000017	0.0396	4.24	0.000069	0.0202	5.39	-0.00369	<.0001	72.27
(X2)	-0.6253	<.0001	209.22	-0.477	0.0029	8.85	NS	NS	0.08
(X3)	NS	NS	2.61	NS	NS	0.99	0.00129	<.0001	16.25
(X4)	NS	NS	0.06	NS	NS	0.14	0.00178	<.0001	19.25
(X5)	NS	NS	2.22	0.000264	<.0001	18.28	0.00383	<.0001	100.56
(X6)	NS	NS	3.16	1.8421	<.0001	38.21	5.3737	<.0001	16.28
(X7)	-0.00002	0.0302	4.7	0.000144	0.0003	13.21	NS	NS	3.64
(X8)	-0.00071	<.0001	64.42	-0.0018	<.0001	100.46	-0.0147	<.0001	18.53
(X9)	-0.0481	<.0001	1699.11	-0.00363	0.0193	5.47	-0.1997	<.0001	66.28
(X10)	-0.00006	<.0001	19.8	0.000201	<.0001	27.37	NS	NS	1.69
(X11)	-0.00048	<.0001	132.27	0.000226	0.0163	5.77	-0.00336	<.0001	21.75
(X12)	-0.00016	<.0001	18.77	-0.00057	0.0003	12.94	NS	NS	1.01
(X13)	0.000157	<.0001	17.55	0.000346	<.0001	18.3	0.00358	<.0001	48.6
(X14)	-0.00007	<.0001	91.7	NS	NS	1.86	NS	NS	0.83
(X15)	-0.00007	<.0001	58.84	-0.00006	0.0381	4.3	-0.00143	<.0001	26.28
(X16)	-0.00002	<.0001	17.66	-0.00009	<.0001	16.6	NS	NS	3.3
(X17)	-0.00041	<.0001	134.6	NS	NS	0.19	-0.00274	<.0001	17.67
(X18)	-0.00287	<.0001	1111.74	-0.00013	0.2044	1.61	-0.0242	<.0001	38.78
(X19)	0.000791	<.0001	135.58	-0.00241	<.0001	60.51	0.00136	0.0411	4.17
(X20)	2.0573	<.0001	303.6	-0.7335	0.0004	12.57	NS	NS	0
(X21)	2.1117	<.0001	346.28	-1.1217	<.0001	69.99	7.3421	0.9429	0.01

Nota: (X1) Distancia a aserraderos; (X2) Predios bajo manejo forestal; (X3) Distancia a carreteras pavimentadas; (X4) Distancia a carreteras de terracería; (X5) Distancia a corrientes permanentes; (X6) Densidad poblacional; (X7) Distancia a manantiales; (X8) Altitud; (X9) Pendientes; (X10) Distancias a brechas; (X11) Distancia a veredas; (X12) Distancia a hogares que usan leña o carbón; (X13) Distancia a marginación alta; (X14) Distancia a marginación muy alta; (X15) Distancia a marginación media; (X16) Distancia a marginación baja; (X17) Distancia a población mayor a 100 habitantes; (X18) Distancia a límites agrícolas; (X19) Distancia a pastizales; (X20) Tenencia ejidal y (X21) Tenencia privada; NS= no significativa. $\hat{P} \leq 0.05$.

Continuación

CHIGNAHUAPAN

$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/Agrícola (5.3736)*}$			$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/ Pecuario (-3.7933)*}$			$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/Residencial (23.3854)*}$		
$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)	$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)	$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)
0.00004	<.0001	18	NS	0.2884	1.18	NS	0.0582	3.56
-0.4791	<.0001	89.34	NS	0.6773	0.18	NS	0.4756	0.5
0.000055	0.0003	14.05	-0.00061	0.0437	4.01	NS	0.7806	0.08
0.00009	0.0003	13.94	NS	0.6126	0.24	NS	0.0814	3.05
-0.00006	0.0005	12.59	NS	0.7035	0.15	-0.00194	0.0024	9.11
NS								
-0.00008	<.0001	35.53	NS	0.263	1.27	NS	0.1606	1.98
-0.0016	<.0001	79.49	NS	0.6703	0.21	NS	0.058	3.61
-0.0544	<.0001	703.79	NS	0.7798	0.07	-0.2849	0.0005	12.23
NS	0.4717	0.28	0.00128	0.0073	7.18	NS	0.2456	1.34
NS								
0.000233	0.001	11.13	0.0038	0.0431	4.08	NS	0.8181	0.05
NS	0.9404	0.02	-0.0034	0.0041	8.26	0.00557	0.0308	4.67
-0.00005	0.0001	14.99	NS	0.7084	0.15	NS	0.1922	1.71
NS								
-0.0001	<.0001	54.59	NS	0.8101	0.06	NS	0.3182	0.99
-0.00046	<.0001	87.68	NS	0.1671	1.92	-0.00642	0.0325	4.57
-0.00397	<.0001	746.97	NS	0.4645	0.55	NS	0.0885	2.91
0.000843	<.0001	113.37	0.00154	0.0164	5.8	NS	0.3769	0.79
NS								
NS								

Nota: (X1) Distancia a aserraderos; (X2) Predios bajo manejo forestal; (X3) Distancia a carreteras pavimentadas; (X4) Distancia a carreteras de terracería; (X5) Distancia a corrientes permanentes; (X6) Densidad poblacional; (X7) Distancia a manantiales; (X8) Altitud; (X9) Pendientes; (X10) Distancias a brechas; (X11) Distancia a veredas; (X12) Distancia a hogares que usan leña o carbón; (X13) Distancia a marginación alta; (X14) Distancia a marginación muy alta; (X15) Distancia a marginación media; (X16) Distancia a marginación baja; (X17) Distancia a población mayor a 100 habitantes; (X18) Distancia a límites agrícolas; (X19) Distancia a pastizales; (X20) Tenencia ejidal y (X21) Tenencia privada; NS= no significativa. $\hat{P} \leq 0.05$.

Continuación.....

ZACATLÁN

$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/Agrícola} (-1.3437)$			$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/ Pecuario} (-0.1598)$			$\hat{\beta}_0 = \text{Forestal/Residencial} 55.4306)$		
$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)	$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)	$\hat{\beta}_i$	Significancia (Pr> ChiSq)	Wald (Pr> ChiSq)
0.000048	0.0366	4.37	0.000068	0.0453	4.01	-0.00856	<.0001	42.44
-0.8024	<.0001	131.32	-0.5144	0.006	7.56	NS	0.9402	0.01
0.000057	0.0034	8.57	NS	0.0517	3.78	NS	0.2092	1.58
-0.00027	<.0001	50.89	NS	0.1164	2.46	NS	0.2598	1.27
0.000225	<.0001	44.61	0.000426	<.0001	27.48	0.00387	<.0001	18.77
1.0887	0.0032	8.68	NS	0.5798	0.31	-22.1791	0.0244	5.06
0.000086	<.0001	18.36	NS	0.0525	3.76	NS	0.2474	1.34
NS	0.103	2.66	-0.00229	<.0001	119.8	NS	0.0672	3.35
-0.0498	<.0001	960.99	-0.00411	0.0105	6.55	-0.1229	0.0004	12.52
-0.0001	<.0001	24.86	0.000096	0.0327	4.56	NS	0.0659	3.38
-0.00081	<.0001	151.02	NS	0.252	1.31	-0.00677	<.0001	18.47
-0.00032	<.0001	43.04	-0.00056	0.001	10.92	0.00582	0.0063	7.45
NS	0.8246	0.05	0.0002	0.0196	5.45	0.00318	0.0258	4.97
-0.0001	<.0001	61.81	NS	0.9674	0	NS	0.4854	0.49
-0.00005	<.0001	15.94	NS	0.0766	3.14	-0.00257	0.0087	6.89
-0.00004	<.0001	16.91	-0.00011	<.0001	15.61	NS	0.6108	0.26
-0.00022	0.0002	14.18	0.000464	0.0047	8.01	-0.00734	0.0001	14.82
-0.00209	<.0001	301.87	NS	0.1839	1.77	-0.0108	0.0364	4.38
0.000637	<.0001	15.53	-0.0054	<.0001	158.11	0.0115	<.0001	20.97
1.9632	<.0001	217.78	-0.7226	0.0042	8.19	NS	0.9584	0
2.1138	<.0001	309.76	-0.997	<.0001	50.75	NS	0.9824	0

Nota: (X1) Distancia a aserraderos; (X2) Predios bajo manejo forestal; (X3) Distancia a carreteras pavimentadas; (X4) Distancia a carreteras de terracería; (X5) Distancia a corrientes permanentes; (X6) Densidad poblacional; (X7) Distancia a manantiales; (X8) Altitud; (X9) Pendientes; (X10) Distancias a brechas; (X11) Distancia a veredas; (X12) Distancia a hogares que usan leña o carbón; (X13) Distancia a marginación alta; (X14) Distancia a marginación muy alta; (X15) Distancia a marginación media; (X16) Distancia a marginación baja; (X17) Distancia a población mayor a 100 habitantes; (X18) Distancia a límites agrícolas; (X19) Distancia a pastizales; (X20) Tenencia ejidal y (X21) Tenencia privada; NS= no significativa. $\hat{P} \leq 0.05$.

(e) Validación de los modelos

A nivel regional y municipal, se obtuvo en promedio, 80.7% de observaciones concordantes; es decir, que están ordenadas en la misma dirección en la variable dependiente e independientes favoreciendo la predicción del modelo teniendo así

una relación lineal entre la variable dependiente y las variables independientes. Respecto a los índices de D de Somers, Gamma y C indican alta concordancia y asociación entre los datos lo que favorece la determinación de la capacidad de predicción del modelo (SAS Institute Inc, 2002; González, 2000) (Cuadro 2.7).

Los tres modelos (regional y para cada municipio) poseen R^2_{adj} mayor a 20% aunque baja, se considera adecuada por la inclusión de variables biofísicas, económicas y sociales; situación similar ha sido encontrada en investigaciones previas (González, 2000; Villagarcía, 2006; Frías, López & Díaz, 2003), determinaron que al aplicar modelos con variables económicas o sociales generalmente se tienen ajustes menores del 50%. Cabe mencionar que los tres modelos no se ven afectados por multicolinealidad ya que presentan tolerancias mayores a 1 y los factores de inflación de la varianza son menores que 10; por tanto, se corrobora que no existe relación lineal entre las variables regresoras o independientes del modelo (Kuter *et al.*, 2005)

Cuadro 2.7. Medidas de asociación de probabilidades predichas y respuestas observadas mediante el modelo regional y municipal

Escala	Medidas de asociación			Pares	Índices de correlación				R^2_{adj}	Multicolinealidad	
	(%) concordante	(%) discordante	Porcentaje ligado		D de Somers	Gamma	Tau-a	c		Tolerancia	FIV
Región	80	19.2	0.9	340628933	0.608	0.613	0.153	0.804	25.44%	0.75	1.34
Chignahuapan	85.9	13.2	0.9	75418437	0.727	0.733	0.161	0.863	37.33%	0.63	1.60
Zacatlán	76.3	22.9	0.8	94900581	0.534	0.539	0.151	0.767	20.12%	0.80	1.25

FIV = factor de inflación de la varianza.

2.4.3 Probabilidad de cambio de uso del suelo a nivel regional

La Figura 2.5 muestra a nivel regional el mapa de probabilidades (45 al 90%) de cambios de uso forestal a uso agrícola; esta superficie se localiza principalmente en áreas cercanas a los límites agrícolas localizados al noreste de la región Mahar y Schneider, (1994) confirman que el avance de la frontera agrícola incrementa significativamente la probabilidad de deforestación. Por otro lado, la superficie con probabilidades de deforestación por la introducción del uso pecuario (del 10 al 50%) se ubica principalmente en el bosque mesófilo de montaña al noroeste de la región (Figura 2.6) (SMRN, 2007).

Cabe mencionar que la superficie con probabilidad de que una hectárea de uso forestal cambie a uso residencial es muy baja (5%) (Figura 2.7). Este cambio se ve limitado ya que las zonas forestales se encuentran alejadas de los centros urbanos y estos a su vez se encuentran rodeados de zonas agrícolas. De tal manera que el uso residencial tiene una tendencia de cambio más marcada por el uso agrícola.

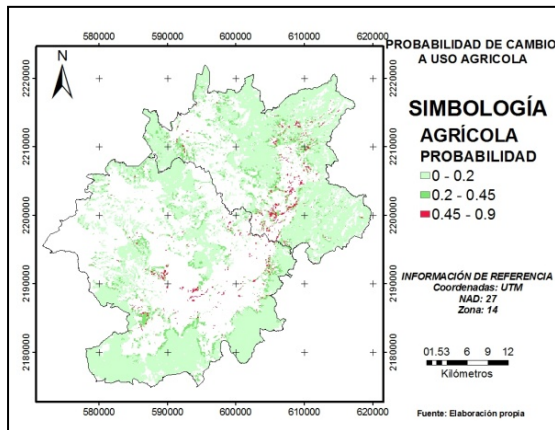


Figura 2.5. Probabilidad de cambio de uso forestal a uso agrícola obtenido mediante el modelo regional (Chignahuapan- Zacatlán).

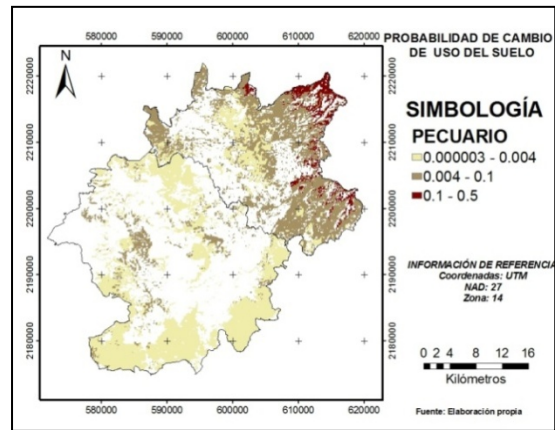


Figura 2.6. Probabilidad de cambio de uso forestal a uso pecuario obtenido a través del modelo regional (Chignahuapan- Zacatlán).

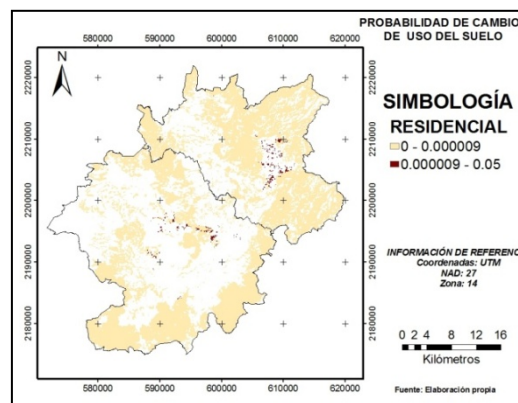


Figura 2.7. Probabilidad de cambio de uso forestal a uso residencial (modelo regional Chignahuapan- Zacatlán).

2.4.4 Escenario base de riesgo de deforestación a nivel regional

Teniendo una densidad poblacional por uso residencial, pecuario y agrícola de 164, 21 y 2 hab.Ha⁻¹ respectivamente, se estimó a nivel regional un aumento de 30,331 habitantes para el año 2030. De tal manera que la población necesitará de 14,298 ha para uso agrícola, 1,497 ha para actividades pecuarias y 186 ha para uso residencial. Dicho escenario poblacional genera un alto riesgo de deforestación localizado principalmente en la zona noroeste de la región, mientras que al sur se

encuentran pequeños manchones con alto riesgo de pérdida de la cubierta forestal (Figura 2.8).

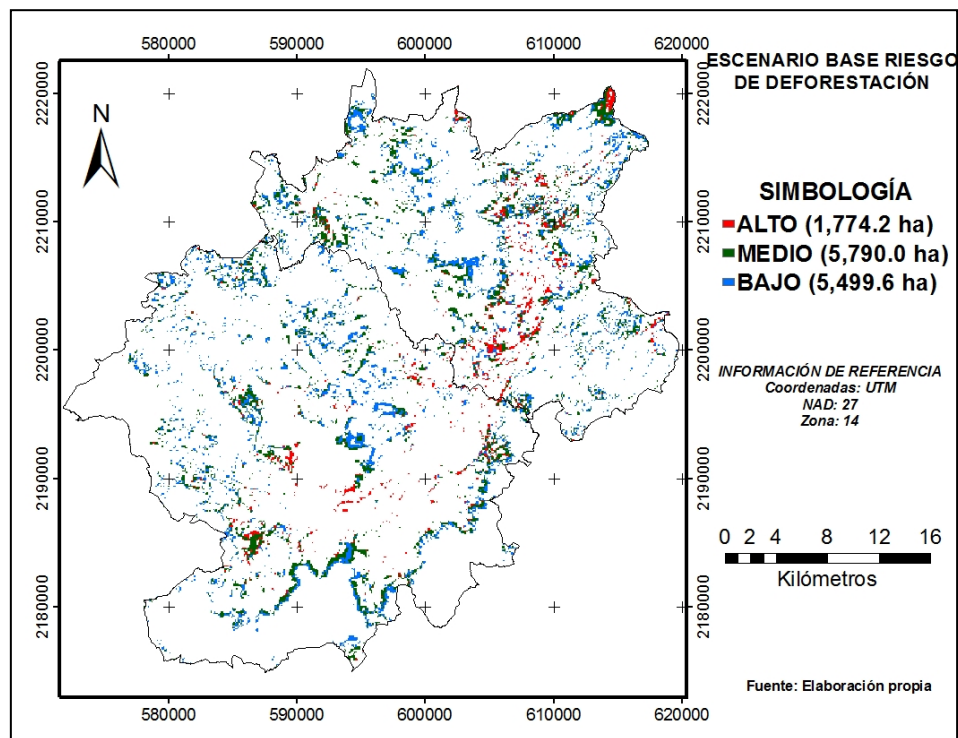


Figura 2.8. Escenario futuro de riesgo de deforestación a nivel regional.

2.4.5 Detección de los cambios de usos del suelo a nivel municipal

(a) Chignahuapan

En 1986, la ocupación agrícola es la más relevante a nivel municipal con 43,636 ha, representando el 57.7% del territorio, seguido del uso forestal (34.4%) y pecuario (7.7%) (Cuadro 2.8). Posteriormente, en el periodo 1986-1995 el uso agrícola disminuyó 14%, mientras que el uso forestal y pecuario incrementaron 21.4% y 3.4%. El incremento de los usos forestal y pecuario probablemente se deba a las políticas estatales implementadas en el sector forestal y pecuario durante ese periodo (INE, 2007). De todos los usos, el residencial presentó un incremento muy considerable del 116.1%. Para el periodo de 1995 al 2011, el uso agrícola incrementó 19.3% ocasionado seguramente por la disminución del 6.4% del uso forestal y 96.3% del uso pecuario; mientras que el crecimiento del uso residencial en este periodo de análisis fue considerable como al anterior.

Cuadro 2.8 Superficie y porcentaje por uso de suelo del municipio de Chignahuapan durante el periodo 1986-2011.

Uso del suelo	Superficie en ha			Tasa de cambio %		
	Años			Periodos		
	1986	1995	2011	1986-1995	1995-2011	1986-2011
Forestal	26,092.4 (34.4%)	31,682.3 (41.7%)	29,654.1 (39.1%)	21.4	-6.4	13.7
Agrícola	43,636.8 (57.7%)	37,523.3 (49.4%)	44,749 (58.9%)	-14	19.3	2.5
Pecuario	5,850.7 (7.7%)	6,050.9 (8%)	225 (0.3%)	3.4	-96.3	-96.2
Residencial	254.4 (0.3%)	549.7 (0.75)	1,174.9 (1.5%)	116.1	113.7	361.8
Otros	88.2 (0.12%)	116.3 (0.15%)	119.5 (0.16%)	31.9	2.8	35.5

Al analizar el período de 25 años (1986-2011), se detecta (Cuadro 2.8) que el uso agrícola tuvo un incremento en superficie de 2.5% ocupando el 44.7% del territorio municipal. A pesar del incremento del 13.7% de la superficie forestal, permaneció en segundo lugar de importancia ocupando 29,654 ha. Por otro lado, el uso residencial incrementó la superficie de 254 a 1,174 ha en el periodo de 1986 a 2011. En contraste con lo anterior, el uso pecuario disminuyó un 96.2% de la superficie ocupada en el municipio de Chignahuapan.

En Chignahuapan se observa una disminución drástica de la superficie pecuaria a través del tiempo (Figura 2.9a y 2.9c), mientras que se identifica que el uso agrícola (Figura 2.9b) tuvo una disminución significativa probablemente causada por los apoyos otorgados al sector pecuario y forestal. Cabe mencionar que los macizos forestales por su parte incrementaron en la parte sur del municipio (Figura 2.9b).

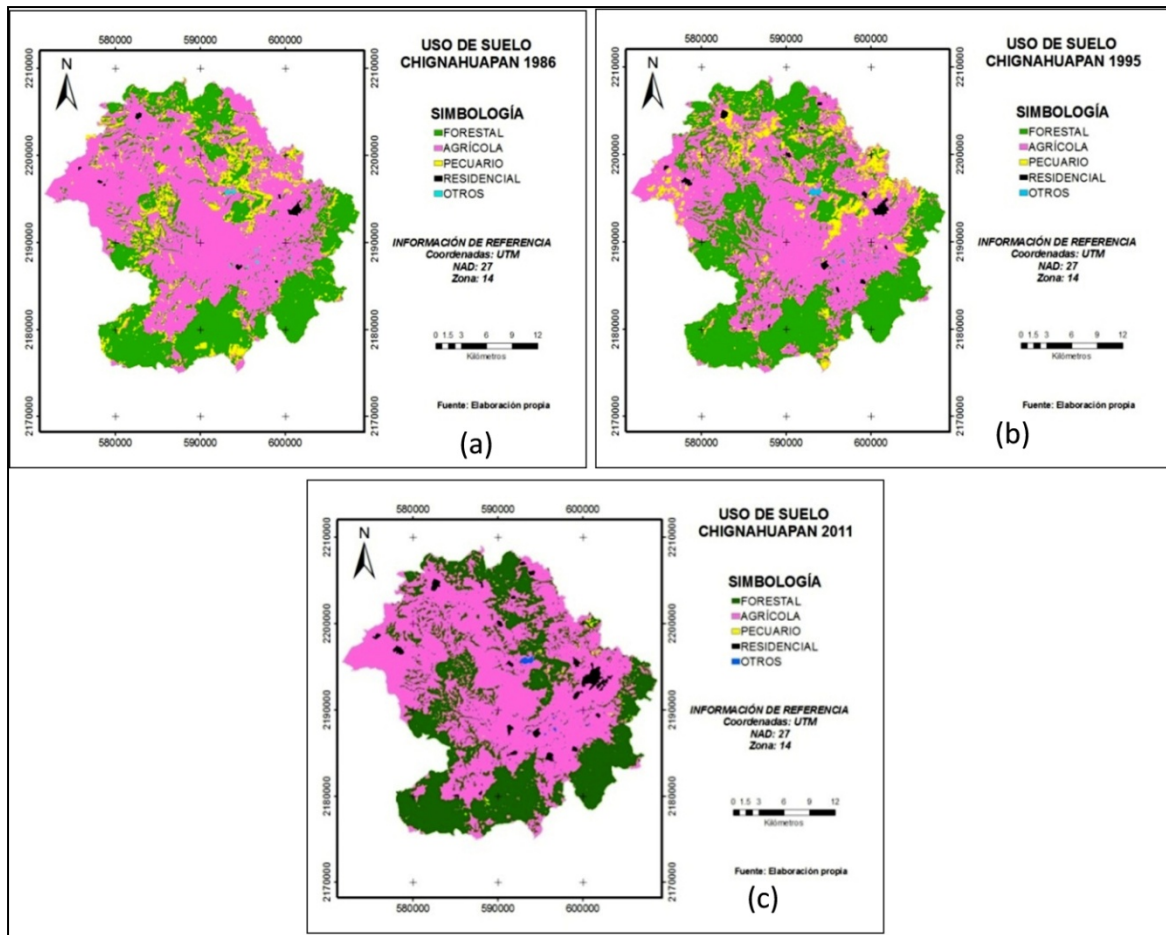


Figura 2.9. Uso del suelo durante los años 1986 (a), 1995 (b) y 2011 (c) del municipio de Chignahuapan, Puebla.

(b) Zacatlán

En 1986, el 53% (25,940 ha) del territorio de Zacatlán se encontraba cubierto por uso forestal, siendo esta actividad la más importante en relación a la superficie ocupada. El uso agrícola ocupaba el segundo lugar de importancia con 28.3% seguido del uso pecuario con 18.5% (Cuadro 2.9). Para el periodo de 1986-1995 la actividad forestal tuvo una disminución poco representativa (0.2%) en contraste con la actividad agrícola que decreció 22%; mientras que el uso pecuario y residencial incrementaron un 33.1% y 126%, respectivamente. Este incremento probablemente ocurrió debido a que la población utiliza el pastoreo como una fuente principal de alimento para el ganado (Hernández, 2008).

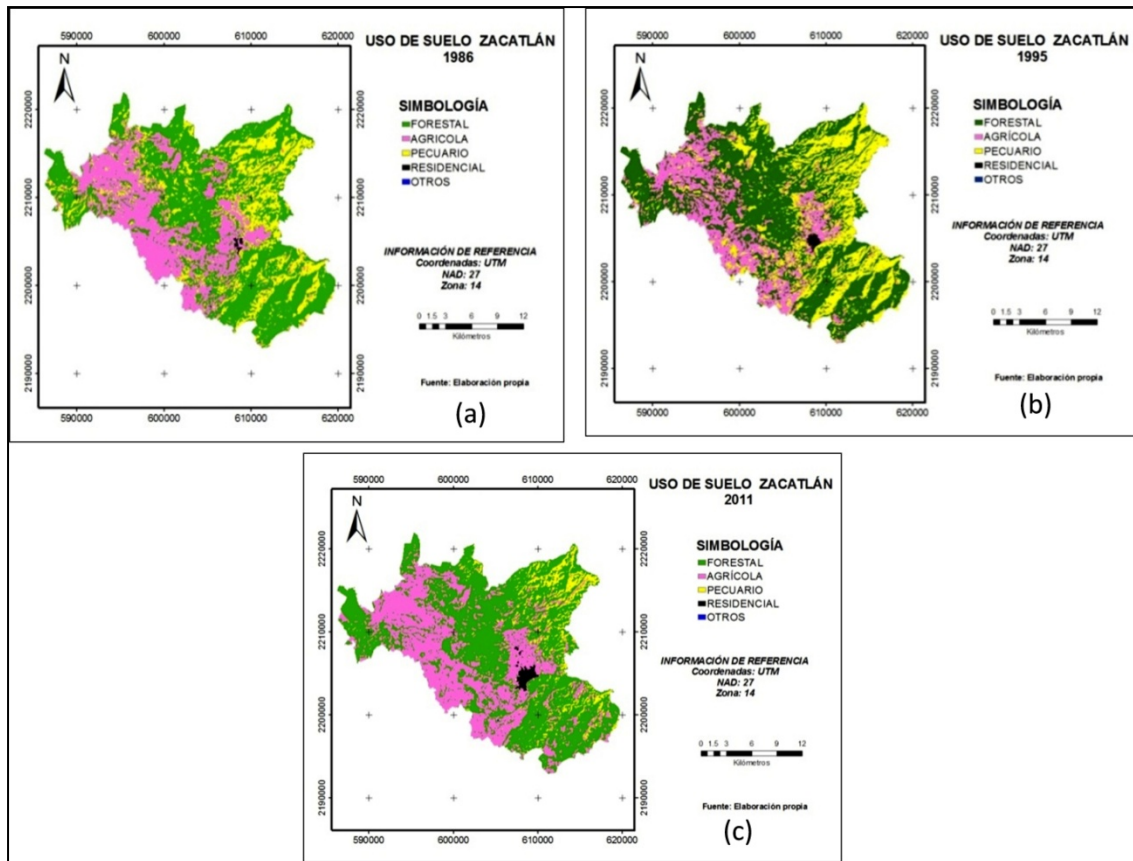


Figura 2.10. Uso del suelo durante los años 1986 (a), 1995 (b) y 2011 (c) del municipio de Zacatlán, Puebla.

La tasa de cambio de 1995 al 2011 muestra que la actividad agrícola tuvo un aumento de 10,789 a 17,273 ha; mientras, el uso pecuario decreció significativamente (74%). En la Figura 2.10b se observa que el avance de la frontera agrícola tuvo una tendencia negativa en 1995 y en la Figura 2.10c se identifica que los límites agrícolas se extendieron hacia el uso pecuario y forestal ocasionando deforestación en 2011. Mahar y Schneider (1994) concuerdan que la extensión de la frontera agrícola es una de las principales causas que ocasiona la deforestación. Al analizar el período de 1986 al 2011 se identifica en el Cuadro 2.9 que la actividad agrícola tuvo una tasa de cambio de 24.8%; a pesar de este incremento en superficie, la actividad forestal es la principal actividad con 28,039 ha cubriendo el 57.3% del municipio. La tendencia del uso residencial durante los periodos analizados es a incrementar considerablemente teniendo como superficie original 87 ha y para 2011 incrementó a 457 ha. Por el contrario, el uso pecuario presentó un decremento de 65.4%.

En el periodo de 25 años, se observa una fragmentación de los ecosistemas forestales del municipio de Zacatlán principalmente por la presencia del uso pecuario (Figura 2.10a, b y c). En el caso del área urbana, ésta muestra una expansión notoria y aunque se encuentra rodeada principalmente por zonas agrícolas, influye también en el proceso de deforestación (SMRN, 2007).

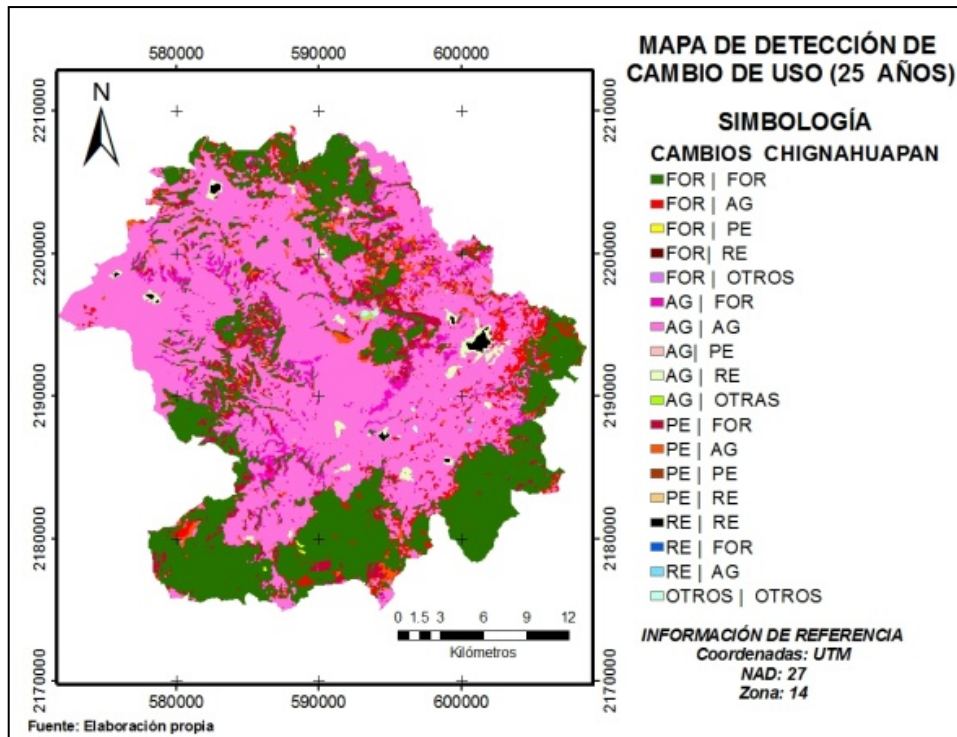
Cuadro 2.9. Superficie y porcentaje por uso de suelo del municipio de Zacatlán durante el periodo de 1986 al 2011.

Uso del suelo	Superficie en (ha)			Tasa de cambio %		
	Años			Periodos		
	1986-1995	1995-2011	1986-2011	1986-1995	1995-2011	1986-2011
Forestal	25,940.4 (53.1%)	25,894.1 (53%)	28,039.5 (57.3%)	-0.2	8.3	8.1
Agrícola	13,836.5 (28.35)	10,789.9 (22.1%)	17,273.2 (35.3%)	-22	60.1	24.8
Pecuario	9,025.3 (18.5%)	12,009.2 (24.6%)	3,123 (6.4%)	33.1	-74	-65.4
Residencial	87.4 (0.2%)	198.3 (0.4%)	457 (0.9%)	126.9	130.5	422.9
Otros	5.4 (0.011%)	3.5 (0.007%)	2.2% (0.004)	-35.2	-37.1	-59.3

Detección de cambio de uso del suelo a nivel municipal

(a) Chignahuapan

En el municipio de Chignahuapan, la actividad agrícola se encuentra dispersa a lo largo del municipio dejando los macizos forestales en las partes altas del suroeste del municipio. Además se observa la fragmentación de la superficie agrícola por la presencia de zonas urbanas y pequeños cuerpos de agua (Figura 2.11) (SMRN, 2007).

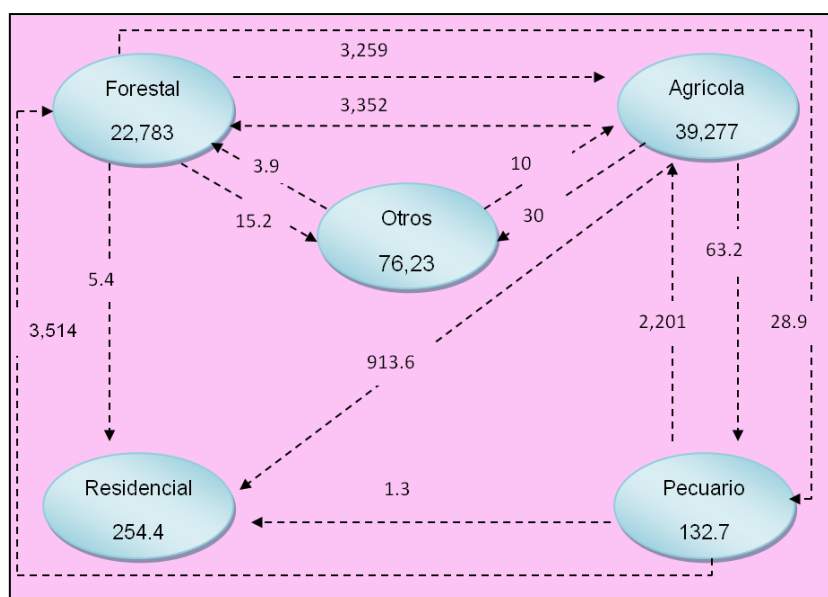


Nota: FOR= Forestal, AG= Agrícola, PE= Pecuario, RE= Residencial y OTROS = Cuerpos de agua

Figura 2.11. Detección de cambio de uso de suelo para el municipio de Chignahuapan en el periodo de 25 años.

Los terrenos ocupados por el uso agrícola en el municipio de Chignahuapan conservaron el 90% de la superficie original (43,636 ha) (Figura 2.11), y su dinámica de cambio de uso se observa en la Figura 2.12. De tal manera que el uso agrícola tuvo una transición del 10% a los usos forestal, residencial, pecuario y otros, teniendo tasas de cambio de 7.6%, 0.14%, 2.9% y 0.07%, respectivamente. Por tanto, se concluye que se tiene una pérdida del 9.8% y una ganancia de 12.5% (Cuadro 2.10), por lo que la ganancia neta del uso agrícola es de 2.5% debido al incremento de la frontera agrícola.

Por su parte, el uso forestal conservó el 87.3% afectado por el uso agrícola que deforestó 3,352 ha (12.5%) y la pérdida restante de territorio forestal fue ocupada por los otros usos. Cabe mencionar que el uso forestal y agrícola son los que mayor superficie ocuparon del uso pecuario, cambiando 8.5% y 5% a superficie forestal y agrícola, respectivamente.



Nota: Las cantidades se refieren a las superficies en hectáreas, las flechas indican la dirección de cambio y los óvalos los grupos de uso actual y superficie estable.

Figura 2.12. Diagrama del municipio de Chignahuapan de transición en hectáreas del uso del suelo en el periodo de 25 años.

El uso residencial se encuentra rodeado de zonas agrícolas (Figura 2.11) debido a que el 2.9 % (913.6 ha) de la superficie agrícola fue ocupada por zonas residenciales, mientras que la ubicación de áreas residenciales en zonas con bosque es casi nula ocupando únicamente 5 ha.

Cuadro 2.10. Superficie de estabilidad, ganancias y pérdidas por tipo de ocupación del suelo y porcentaje en relación a la superficie por uso en el 2011 a nivel regional en el periodo de 1986-2011.

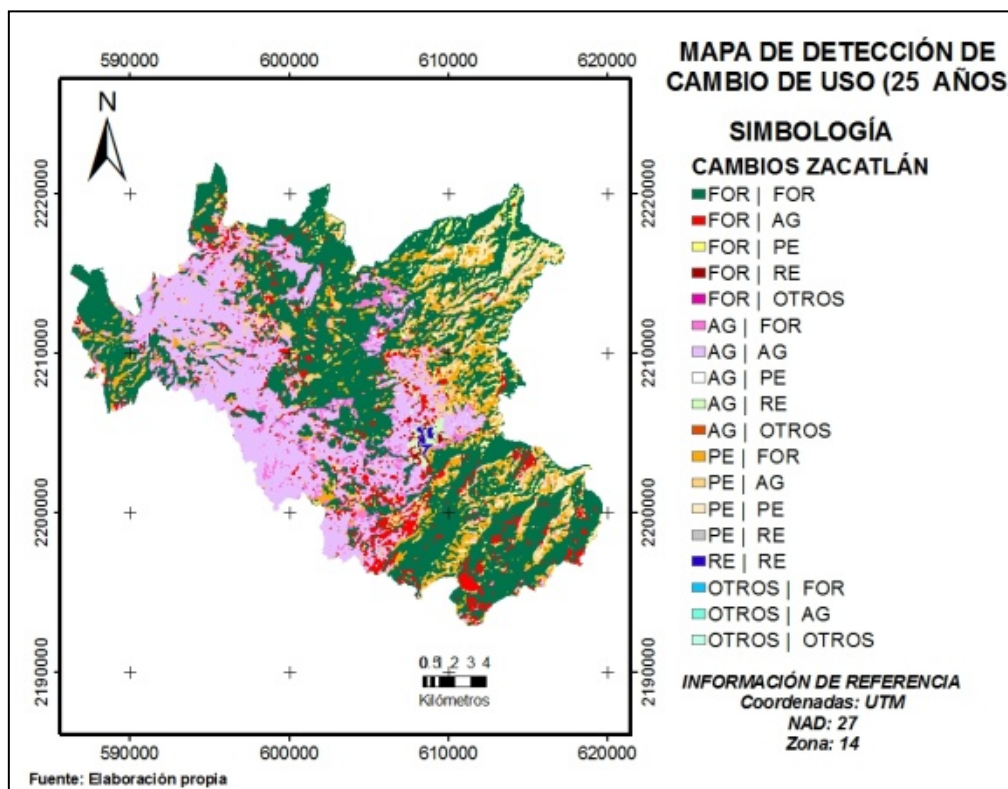
Ocupación	Superficie 1986 en ha.	Superficie 2011 en ha.	Diferencia de superficie 1986 -2011	Superficie estable	Pérdidas por cambio de ocupación	Ganancias por cambio de ocupación
Forestal	26092.4 (87.99%)	29654.1 (100%)	3561.7 (12.01%)	22783.3 (76.83%)	3309.1 (11.16%)	6870.8 (23.17%)
Agrícola	43636.8 (97.51%)	44749.0 (100%)	1112.2 (2.49%)	39,277.6 (87.77%)	4359.2 (9.74%)	5471.4 (12.23%)
Pecuario	5850.7 (2600.31%)	225 (100%)	-5625.7 (-2500.31%)	132.7 (58.98%)	5717.9 (2541.29%)	92.2 (40.98%)
Residencial	254.4 (21.65%)	1174.9 (100%)	920.5 (78.35%)	254.4 (21.65%)	0 (0%)	920.5 (78.35%)
Otros	88.2 (73.81%)	119.5 (100%)	31.2 (26.11%)	74.2 (62.09%)	14.4 (12.05%)	45.2 (37.82%)

El uso forestal conservó el 87.3% del territorio estable, adquiriendo 6,870 ha por cambio de ocupación y perdió al mismo tiempo 3,309 ha; por tanto, el uso forestal

incrementó 13.6% (3,561 ha) por cambio de ocupación. En el caso del uso pecuario, este conservó una superficie mínima (2.2%) debido a la pérdida del 97% de su territorio por cambio de ocupación; cabe indicar que este uso sólo ganó 92 ha por cambio de ocupación. Caso contrario, el uso residencial obtuvo un aumento significativo de 377% incrementando 369 ha en el periodo de 1986 al 2011 y no presentó pérdida por cambio de ocupación (Cuadro 2.10).

(b) Zacatlán

La distribución espacial de la detección de cambios de suelo del municipio de Zacatlán presenta un grado crítico de fragmentación al noroeste del municipio (Figura 2.13), esto se debe principalmente al uso intensivo de tierras para fines agrícolas o pecuarios. Por otro lado, los bosques ubicados al suroeste se encuentran intervenidos por actividades agrícolas.

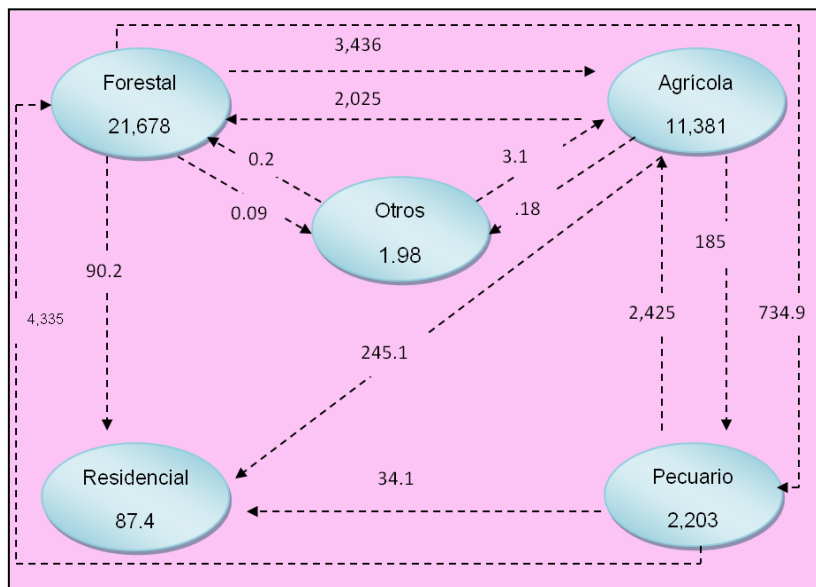


Nota: FOR= Forestal, AG= Agrícola, PE= Pecuario, RE= Residencial y OTROS = Cuerpos de agua

Figura 2.13. Detección de cambios de uso de suelo en un periodo de 25 años para el municipio de Zacatlán.

En la Figura 2.14 se observa que el uso forestal conservó 21,678 ha respecto al uso forestal en 1986, siendo ésta la actividad más importante en el municipio, no sólo

por conservar 83.6% de su uso si no por los bienes y servicios que proporciona a la población (SMRN, 2007). A pesar de los esfuerzos de conservación, se deforestó 13.2% por uso agrícola y 2.8% ocasionado por el uso pecuario; pero no únicamente sufrió cambios negativos sino que también se identifica que el 48% del territorio pecuario y el 14.6% del agrícola cambiaron a uso forestal. El uso agrícola conservó el 82.2% de su territorio, además de obtener cambios positivos del uso forestal, pecuario y cuerpos de agua, teniendo tasas de 13.2%, 26.8% y 57.4%, respectivamente. Los usos forestal y agrícola obtuvieron un incremento en la superficie por el uso pecuario; finalmente, el uso pecuario obtuvo solamente 2.8% de superficie forestal y 1.3% del uso agrícola. El aumento del uso residencial se debe principalmente a la pérdida de 245 ha del uso agrícola, 30 ha de uso pecuario y 90 ha de uso forestal.



Nota: Las cantidades se refieren a las superficies en hectáreas, las flechas indican la dirección de cambio y los óvalos los grupos de uso actual y superficie estable.

Figura 2.14. Diagrama del municipio de Zacatlán de transición en hectáreas del uso del suelo en el periodo de 25 años.

Cuadro 2.11. Superficie de estabilidad, ganancias y pérdidas por tipo de ocupación del suelo en el municipio de Zacatlán, Puebla en el periodo de 1986- 2011.

Ocupación	Superficie 1986 en ha.	Superficie 2011 en ha.	Diferencia de superficie 1986	Superficie estable	Pérdidas por cambio de ocupación	Ganancias por cambio de ocupación
	25940.43	28039.59	2099.16	21678.7	4261.77	6360.93
Forestal	(92.5%)	(100%)	(7.5%)	(77.3%)	(15.2%)	(22.7%)
	13836.51	17273.25	3436.74	11381.1	2455.38	5865.12
Agrícola	(80.1%)	(100%)	(19.9%)	(65.9%)	(14.2%)	(34.0%)
	9025.38	3123.09	-5902.3	2203.11	6795.27	919.98
Pecuario	(289.0%)	(100%)	(-189.0%)	(70.5%)	(217.6%)	(29.5%)
	87.48	457.02	369.54	87.48	0	369.54
Residencial	(19.1%)	(100%)	(80.9%)	(19.1%)	(0%)	(80.9%)
	5.4	2.25	-3.15	1.98	3.42	0.27
Otros	(240%)	(100%)	(-140.0)	(88.0%)	(152.0%)	(12.0%)

Al identificar las ganancias y pérdidas por cambio de ocupación que se han presentado en los últimos 25 años en Zacatlán, se identifica que el área forestal conservó el 85.5% de la superficie original (Cuadro 2.11). Además, esta superficie tuvo una ganancia por cambio de ocupación del 24.5%, aunque disminuyó 16.4% en este mismo periodo. Por su parte, la superficie forestal incrementó 2,099 ha mostrando que la actividad forestal juega un papel importante en el municipio (Escalona, 2005). En una proporción similar, la superficie con uso agrícola conservó 82.2% y aunque tuvo una ganancia de 42.3% por cambio de ocupación se considera como la segunda actividad más importante en el municipio.

La actividad productiva que menos se desarrolla en el municipio es el uso pecuario el cual perdió 65.1% de la superficie en 1986 (9,025 ha). Las áreas pecuarias se asocian principalmente a zonas agrícolas abandonadas o en descanso, y que posteriormente cambian a uso agrícola o forestal. Por otro lado, la zona residencial ocupa 341 ha invadiendo 0.17% del territorio de Zacatlán en 1986. Pese a que la actividad ocupa poca superficie dentro del municipio, tuvo un incremento significativo de 420% como resultado del aumento poblacional en los últimos 25 años. Finalmente, los cuerpos de agua (por ej., otros) son los que menos superficie estable ocupan (1.98 ha).

2.4.6 Probabilidad de cambio de uso forestal a nivel municipal

(a) Forestal–agrícola

Los resultados del modelo de probabilidad de cambio de uso forestal a agrícola a nivel municipal muestran probabilidades altas de cambio de uso del suelo de (60 a 99%) para ambos municipios (Chignahuapan y Zacatlán). La superficie con mayor probabilidad de deforestación por efecto de la expansión de la frontera agrícola se encuentra distribuida cerca de los límites agrícolas ubicados en el centro de los municipios. Cabe mencionar que el municipio de Zacatlán presenta más superficie con probabilidad de deforestación (Figura 2.16) comparativamente con Chignahuapan, ya que en este último se ve disminuida (Figura 2.15). Lo anterior probablemente se debe a que en el municipio de Zacatlán los ecosistemas se encuentran más fragmentados mientras que en Chignahuapan la preocupación de la población por el manejo y el cuidado de los recursos naturales ha contribuido a conservar los bosques sin fragmentación por uso agrícola (SMRN, 2007).

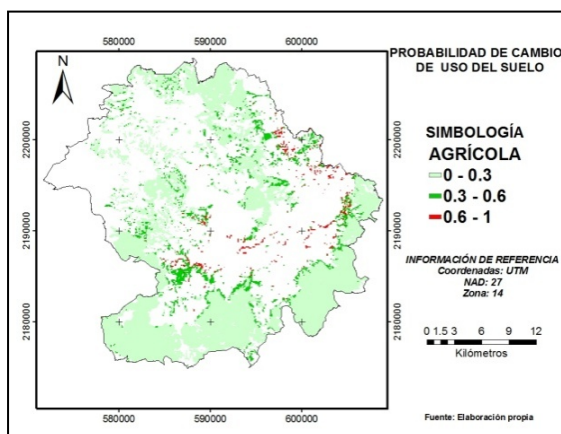


Figura 2.15. Modelo de cambio de uso forestal–agrícola para el municipio de Chignahuapan.

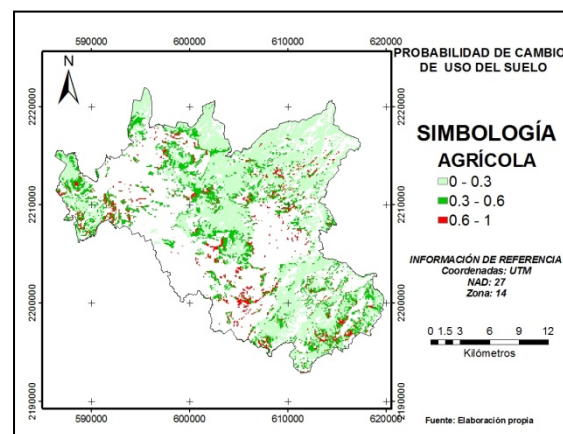


Figura 2.16. Modelo de cambio de uso forestal–agrícola para el municipio de Zacatlán.

(b) Forestal–pecuario

El municipio de Chignahuapan presenta una probabilidad superior al 90% para que una superficie pequeña cambie a uso pecuario principalmente al sur del municipio (Figura 2.17). Por el contrario, en el municipio de Zacatlán se encontraron probabilidades bajas (1 a 7%) de riesgo de pérdida forestal por uso pecuario, presentándose esta situación en el bosque mesófilo de montaña al noroeste del municipio (Figura 2.18). Rojas *et al.* (2012) corroboraron la información al señalar

que la probabilidad para deforestar una hectárea por uso pecuario es del 1%, mientras que Villagarcía (2004) menciona que el porcentaje de probabilidad de deforestación está directamente relacionado con las variables independientes que se incluyen en los modelos a nivel municipal.

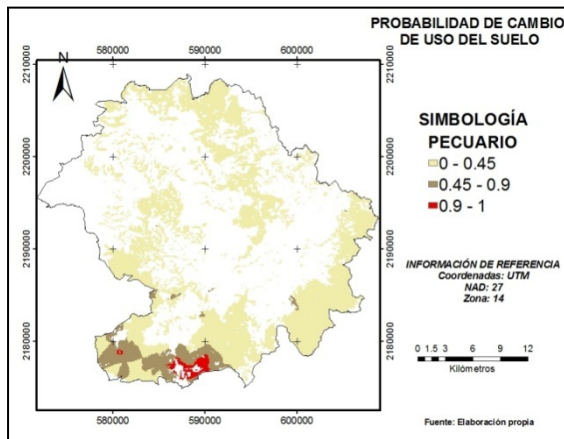


Figura 2.17. Modelo de cambio de uso forestal-pecuario para el municipio de Chignahuapan.

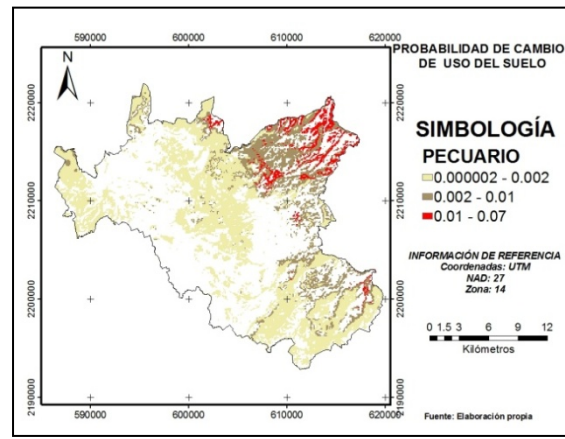


Figura 2.18. Modelo de cambio de uso forestal-pecuario para el municipio de Zacatlán.

(c) Forestal-residencial

El cambio de uso forestal a residencial en ambos municipios tiene una probabilidad del 50 al 99%. Para el municipio de Chignahuapan, el crecimiento poblacional se observa generalmente alrededor de la superficie urbana (Figura 2.19); sin embargo el municipio de Zacatlán presenta mayor superficie con probabilidad de deforestación (Figura 2.20); lo anterior, como resultado de la fragmentación de los ecosistemas forestales ocasionados por los cambios a uso agrícola (Cuadro 2.6). Por otro lado, para el municipio de Chignahuapan resultaron sólo 4 variables significativas para el modelo forestal-residencial (Cuadro 2.6).

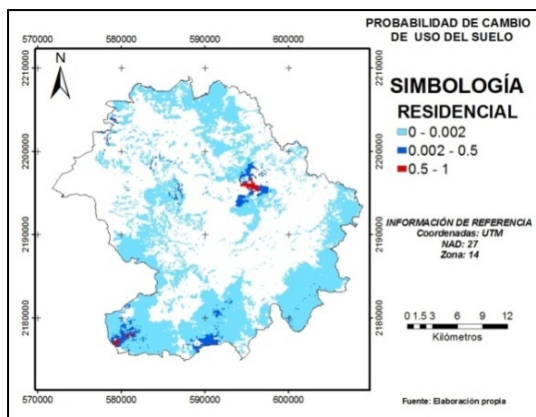


Figura 2.19. Modelo de cambio de uso forestal-residencial para el municipio de Chignahuapan.

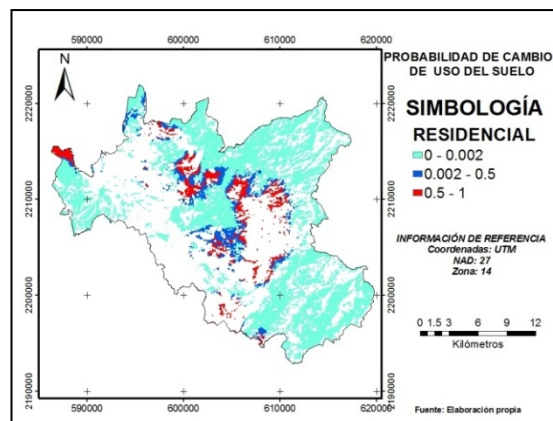


Figura 2.20. Modelo de cambio de uso forestal-residencial para el municipio de Zacatlán.

2.4.7 Escenario futuro riesgo de deforestación a nivel municipal

La tendencia de deforestación a nivel municipal depende del incremento poblacional y la densidad a la cual se poblaran las áreas en las superficies pecuarias, residencial y agrícola. Con una densidad de 71 habitantes por hectárea para el uso residencial, 90.3 pecuario y 1.1 para el agrícola se estimó un aumento de 13,518 habitantes en el municipio de Chignahuapan. La población predicha requerirá 12,297 ha de uso agrícola, 150 para uso pecuario y 191 ha para expansión de la zona residencial.

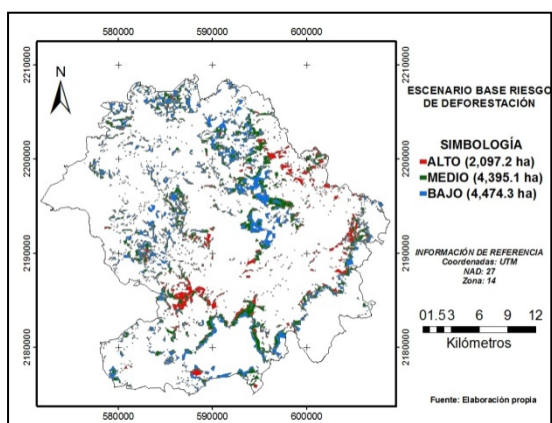


Figura 2.21. Escenario base riesgo de deforestación (Chignahuapan).

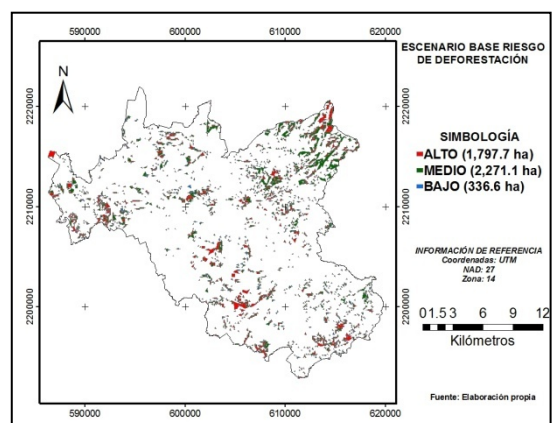


Figura 2.22. Escenario base riesgo de deforestación (Zacatlán).

El crecimiento poblacional puede contribuir en un alto riesgo de deforestación en áreas cercanas a zonas agrícolas puesto que los usos pecuario, agrícola y residencial presentan alto riesgo de deforestación (Figura 2.21). Por ejemplo, en el municipio de Zacatlán se estimó un incremento de 16,813 habitantes para el 2030 con una densidad de 4.6 hab. ha⁻¹ para el uso agrícola, 11.7 hab. ha⁻¹ para el uso pecuario y 328 hab. ha⁻¹ para el uso residencial. Respecto a estas densidades se requerirá de 3,701 ha de uso agrícola, 1,448 ha de uso pecuario y 52 ha de uso residencial. En la Figura 2.22 se observa la distribución de las áreas que presentan alto riesgo de deforestación, dichas áreas se localizan principalmente en los límites agrícolas y pecuarios del municipio de Zacatlán.

2.4.8 Comparación de escalas a nivel regional y municipal

En la Figura 2.23 se muestra la diferencia cualitativa con respecto a los resultados obtenidos de los modelos a diferentes escalas espaciales (regional y municipal). La superficie resultante al correr el modelo a nivel regional es menor, respecto a la superficie obtenida con el modelo municipal, mientras que el riesgo de deforestación se presenta principalmente en las fronteras agrícola-forestal a nivel regional y municipal; cabe mencionar que dicha superficie se encuentra localizada en diferentes áreas, debido a que las variables y estimadores que determinan el riesgo de deforestación son distintas a nivel regional y municipal (CONAFOR, 2012; Mahar y Schneirder, 1994).

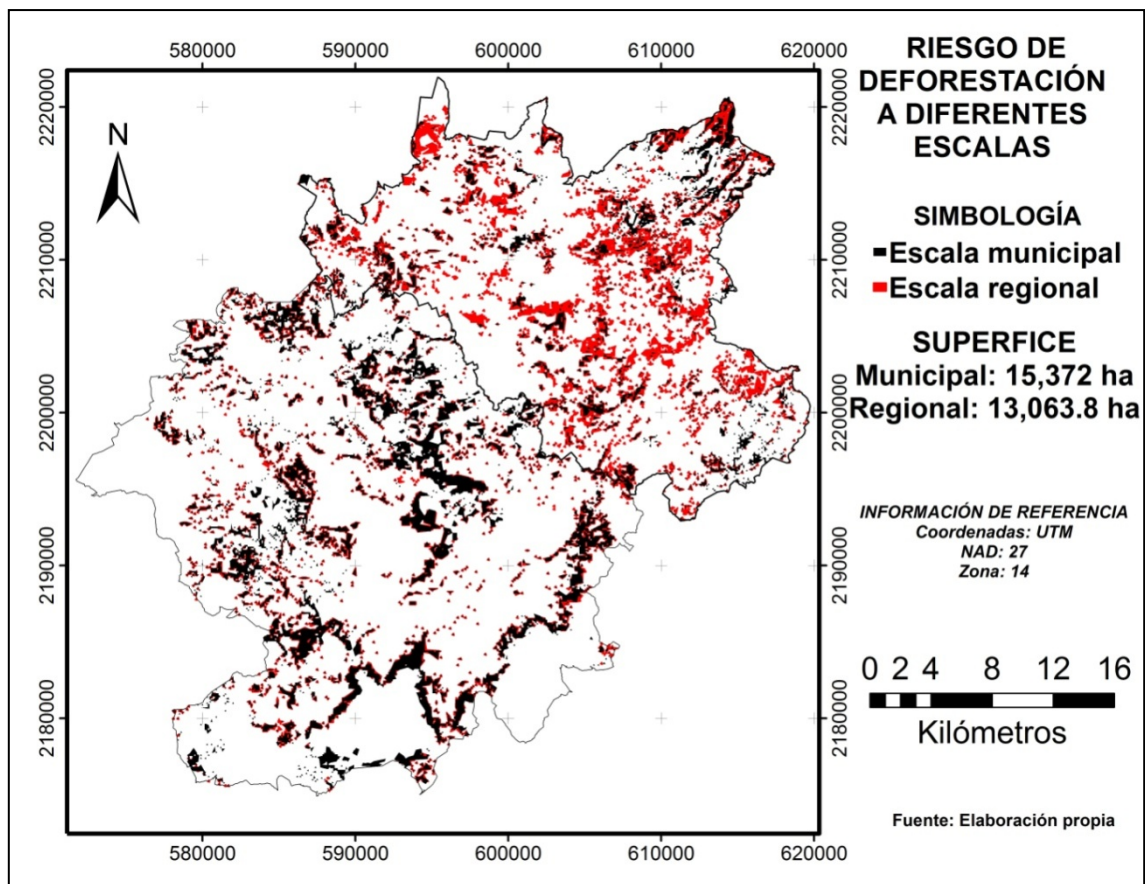


Figura 2.23. Comparación cualitativa de escalas sobre riesgo de deforestación a nivel regional y municipal.

La comparación cuantitativa de la superficie con riesgo de deforestación se observa en las Figura 2.24, 2.25 y 2.26, mostrando que a nivel regional el riesgo de deforestación incrementa conforme aumentan las necesidades básicas de la población (por ejemplo, alimentación, energía y hospedaje). A nivel regional (Figura 2.24) se estiman 13,063 ha de las cuales, 1,774.2 ha se consideran con riesgo alto de deforestación, 5,790.0 ha de riesgo medio y 5,499.6 ha con riesgo bajo de deforestación. Sin embargo, la Figura 2.25 muestra la misma tendencia de deforestación del modelo regional pese a que el 7% (2,097 ha) de la superficie total forestal de Chignahuapan (29,654 ha) presenta alto riesgo de deforestación; estas áreas se localizan en los límites agrícolas y pecuarios. Por otro lado, 14% (4,395 ha) muestra riesgo medio de deforestación y sólo el 15% (2,097.2) se considera con riesgo bajo en dicho proceso. Por su parte, en la Figura 2.26 se identifican 1,797.7 ha con prioridad alta en el proceso de deforestación para el municipio de Zacatlán y 2,271 ha con prioridad media. Cabe mencionar que la superficie forestal se encuentra fragmentada por agricultura y ganadería lo que incrementa el riesgo de

deforestación en el municipio; por tanto, sólo 336 ha se consideran con bajo riesgo de deforestación. Cabe indicar que las categorías de riesgo alto y medio son las que cubren la mayor superficie con problemas de deforestación para el municipio; por tanto, la probabilidad de deforestación es diferente a la tendencia mostrada a nivel regional y Chignahuapan.

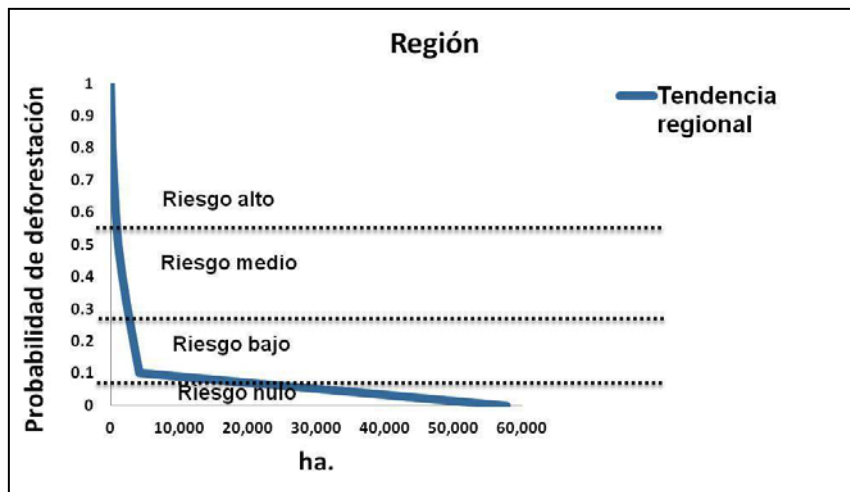


Figura 2.24. Tendencia del riesgo de deforestación a nivel regional.

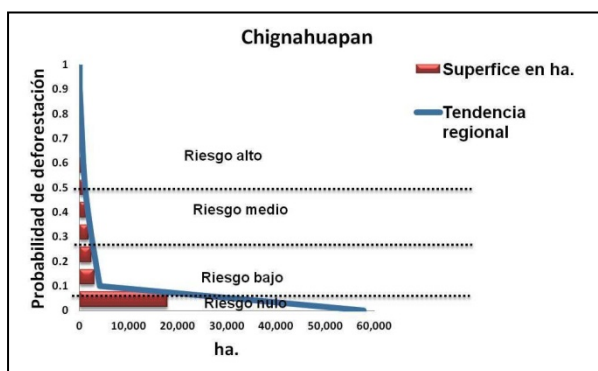


Figura 2.25. Tendencia de riesgo de deforestación del municipio de Chignahuapan.

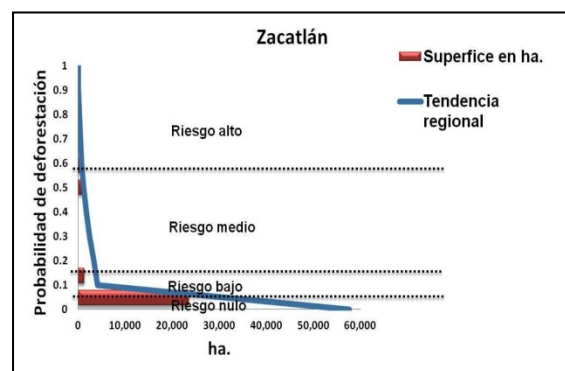


Figura 2.26. Tendencia de riesgo de deforestación del municipio de Zacatlán

De manera general, se tiene que los modelos de riesgo de deforestación son adecuados dependiendo la escala a la cual se desean generar estrategias de manejo sobre los recursos naturales. Saab (1999) y Cueto (2006) concuerdan que la escala es un factor muy importante en la delineación de planes y estrategias, por lo que la selección de la escala a utilizar depende de los objetivos del estudio y las

características del objeto de estudio (García *et al.*, 2011). Cabe mencionar que el cambio de escalas genera irregularidades o falacias (Brenner, 2001); por ejemplo, si se quisiera aplicar el modelo regional a nivel municipal se generaría la “falacia ecología”, contrariamente, el modelo generado a nivel municipal al tratar de aplicarlo a nivel regional, se cometería la “falacia individualista”; por su parte, si se quisiera aplicar el modelo generado para el municipio de Chignahuapan y aplicarlo al municipio de Zacatlán o viceversa, se generaría la “falacia o irregularidad transversal” (Bissonette, 1997; Weins *et al.*, 1993); por tanto, cada modelo es bueno a su escala espacial realizado. Es decir, si las decisiones de política van a ser aplicadas a nivel regional, se debería de aplicar el modelo correspondiente y lo mismo a nivel de cada municipio.

2.4.9 Estrategias de las áreas con riesgo de deforestación

Con base a la superficie estimada y la ubicación de las áreas con riesgo de deforestación en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán se generaron estrategias de manejo dependiendo el grado de riesgo de deforestación. Es necesario mencionar que las estrategias deben ser implementadas a nivel municipal.

Riesgo de deforestación alto

- ✓ Elaborar un plan de ordenamiento para las actividades agrícolas, pecuarias y residenciales con la finalidad de conservar el recurso forestal y evitar que dichos usos ocasionen deforestación por ser sitios muy vulnerables.
- ✓ Generar alternativas económicas que disminuyan el avance de la frontera agrícola hacia las áreas boscosas (implementación de nuevas tecnologías para la producción agrícola).
- ✓ Concientizar a los dueños de los recursos naturales y forestales sobre la preservación de los mismos, con la finalidad de que las futuras generaciones puedan aprovecharlos.

Riesgo de deforestación medio

- ✓ Prevenir la deforestación de los recursos naturales mediante alternativas económicas de manejo, con la finalidad de mejorar las condiciones de vida de los poseedores de los recursos naturales.
- ✓ Generar políticas y estrategias de planificación para la conservación de las áreas con alto valor ambiental de los recursos naturales.
- ✓ Elaborar programas de manejo sustentable de los recursos naturales con la finalidad de conservar las áreas con riesgo medio de deforestación.

Riesgo de deforestación bajo

- ✓ Elaborar programas de manejo forestal sustentable con la finalidad de conservar el recurso forestal.
- ✓ Establecer políticas ambientales sustentables con la finalidad de incluir el pago por servicios ambientales.
- ✓ Generar información académica científica que ayude a los pobladores a conseguir recursos económicos con la finalidad de disminuir el riesgo de deforestación dependiendo la escala de manejo.

2.5 CONCLUSIONES

(a) El modelo resultó ser una herramienta flexible y poderosa para la generación y planeación de estrategias del uso del suelo y recursos naturales, debido a que las variables independientes introducidas ayudan a explicar los cambios de uso del suelo ocurridos a nivel regional y municipal.

(b) Las probabilidades de cambio de uso del suelo a niveles regional y municipal difieren. A nivel municipal, se determinaron probabilidades \geq a 90% de que una hectárea forestal cambie a uso agrícola o residencial; mientras que a nivel regional, las probabilidades son \leq 90%. Por tanto, se observan impactos importantes en los resultados por consiguiente el modelo resulta ser una herramienta flexible y poderosa dependiendo la escala a la cual se deseen generar estrategias del uso de los recursos naturales.

(c) La generación de escenarios futuros al 2030, es una herramienta ideal para generar información y diseñar estrategias de manejo sobre los recursos

naturales a nivel regional y municipal. A nivel regional, se estimó una deforestación de 13,063.8 ha; en el municipio de Chignahuapan cambiarán 10,966.6 ha de uso forestal, mientras que en Zacatlán, la población requerirá 4,405.5 ha para poder satisfacer las necesidades básicas de la población.

2.6 LITERATURA CITADA

- Agresti, A. 1990. *Categorical data analysis*. John Wiley & sons. United States of América. 558 p.
- Alcaraz, S. D., G. Baldi, P. y M.F. Garbulsky. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 17: 108- 117.
- Allison, P. D. 1999. *Logistic regression using the SAS system: Theory and Application*. John Wiley & sons, SAS institute inc. Cary, NC, USA. 279 p.
- Altamirano, A. y A. Lara. 2010. Deforestación en ecosistemas templados de la precordillera andina del centro- sur de Chile. *Bosque* 31: 53-64.
- Andersen, E. B. and V. Fienberg. 1990. *The statistical analysis of categorical data*. Berlin: Springer. 532 p.
- Arriaga, L. 2009. Implicaciones de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: un enfoque multiescalar. *Investigación ambiental* 1: 6-16.
- Arriaga, L., A. E. Castellanos, V., E. Moreno y J. Alarcón. 2004. Potential ecological distribution of alien invasive species and risk assessment: a case study of buffel grass in arid regions of Mexico. *Conservation Biology* 18: 1504- 1514.
- Beltrán, C. 2011. Aplicación del análisis de regresión logística multinomial en la clasificación de textos académicos: *Biometría, filosofía y lingüística informática*. INFOSUR 53-64
- Bissonette, J.A. 1997. Scale-sensitive ecological properties: Historical context, current meaning. In *Wildlife and landscape ecology*. Springer, New York. 3-31.
- Bocco, G., M. Mendoza y O. R. Masera. 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas* 44: 18-36.
- Brenner, N. 2001. The limits to scale? Methodological reflections on scalar structuration. *Progress in human Geography* 25: 591-610.
- Chávez, E. E. y L. Rosero, L. 2001. Valoración del riesgo de deforestación futura en Costa Rica. *Uniciencia* 18: 29-38.
- Chávez, G. H. 2014. Áreas prioritarias mediante escenarios de deforestación y servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México.

- Comisión forestal Nacional (CONAFOR). 2012 compendio de estadísticas ambientales. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/Compendio_2012/mce_index.html.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2009. Estudios de dinámica de uso de suelo 1993- 2002- 2007. INEGI. Mapas de uso de suelo y vegetación, series II, III, IV (escala 1: 250, 000).
- Cueto, V. R. 2006. Escalas en ecología: su importancia para el estudio de la selección de hábitat en aves. *Hornero* 21: 1-13.
- Eastman, R. J. 2003. IDRISI Kilimanjaro. Guía para SIG y procesamiento de imágenes, Clark Labs, Worcester, MA. USA. 290 p.
- Eastman, R. J. 2009. IDRISI Taiga. Guide to GIS and image processing. Clark Labs, Worcester, MA. USA. 290 p.
- Enciclopedia de los municipios de México (INAFED). 2009. Los Municipios de Puebla. Gobierno del Estado de Puebla. En línea: http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_Puebla (Mayo del 2010).
- Escalona, M. M .J. 2005. El paisaje del municipio de Texcoco: análisis morfológico y funcional en el marco de un modelo cartográfico. Estado de México, Estados Unidos Mexicanos. Doctorado; Universidad de Alcalá. España 479 p.
- 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.
- Frías, A. M., A. E. López, E. y S.G. Díaz, M. 2003. Predictores de la conducta antisocial juvenil: un modelo Ecológico. *Estudios de psicología* 15- 24.
- García, C. L., I. Teich y M. Balzarini. 2011. Una aproximación multivariada para identificar la escala de análisis en estudios de asociación entre comunidades de aves y la composición del paisaje. *Revista de asociación Argentina de ecología de paisaje* 2: 26-34.
- Geist, H.J. and E. Lambin. 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* 52: 143-149.
- 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.
- Hernández, H. L. 2008. La ganadería ovina en pequeña escala y su impacto en el desarrollo rural, Chignahuapan, Puebla.
- Hosmer, D. W. y S. Lemeshow. 1989. Applied logistic regression. Wiley series in probability and and mathematical statistics, New York, 307 p.
- Instituto nacional de ecología (INE). 2007. El manejo de los recursos forestales en México (1992-2002) procesos, tendencias y políticas públicas. UNAM, PROCYMAF, CONAFOR Y SEMARNAT. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/363/cap10.html> (15 de noviembre del 2013).

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2011. Usos del índice de presión económica (riesgo) de la deforestación. <http://www.inecc.gob.mx/irdef-usos>. (10 de enero del 2014).
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2010. Censo de la población y vivienda. Base de datos digital. En línea: <http://www.inegi.org.mx/> (septiembre del 2013).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1900-1930. Censo de la población y vivienda. Base de datos digital. En línea: <http://www.inegi.org.mx/> (septiembre del 2013).
- Krannich, R.S., M. S. Carroll., S. E. Daniels and G. B. Walker. 1994. Incorporating social assessment and public involvement processes into ecosystem – based resource management: Applications to the east side ecosystem management project. Ecosystem Management Project. Walla. 128 p.
- López, V. H. V y W. Plata, R. 2009. Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. Investigaciones geográficas, boletín del instituto de Geografía, UNAM. 68: 85-101.
- Maass, F.S., H. H. Rengil, G., C. González, E. y G. Nava, B. 2006. Cambio de uso del suelo en el parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972- 2000. UNAM. Boletín del instituto de geografía 61: 38-57.
- Mahar, D. and R. Schneider, R. 1994. Incentives for tropical deforestation: some examples from Latin America. In: Brown, K., Pearce, D.W .Eds., *The Causes of Tropical Deforestation*: University College London Press. London, 56-78 pp.
- Mas, J. F., H. Puig., J.L. Palacio y A. Sosa. 2003. Un modelo espacial del riesgo de deforestación. UNAM. INPE 1357-1363.
- Mas, J. F., V. Sorani y R. Álvarez. 1996. Elaboración de simulación del proceso de deforestación. Investigaciones geográficas 5: 43. 57.
- Meyer, W.B. and Turner, B.L. 1992. Human population growth and global land- use/ cover change. *Ecology and systematics* 23: 36-61.
- Montgomery, D. C. 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Editorial Limusa. México, D.F. 686 p.
- Morales, V. P. 2008. *Estadística aplicada a las ciencias sociales*. Universidad Pontificia Comillas. Madrid. 23 p.
- Nellemann, C. 2001. *GLOBIO- Global methodology for mapping human impacts on the biosphere*. UNEP, Nairobi, Kenia. 47p.
- Neter, J., W. Wasserman y M. H. Kutner. 2005. *Applied Linear Statistical Models*. Edn. 5. McGraw-Hill. 1396 p.
- O`Neill, R. V. 1989. *Perspectives in Hierarchy and scale. Perspectives in ecological theory*. Princeton University press. 140-156.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). 2012. *El estado de los bosques del mundo*. FAO. 32 p.

- Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). (2000). Causas y tendencia de deforestación en América latina. <http://www.fao.org/docrep/007/ad680s/ad680s05.htm> (20 octubre del 2013).
- 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.
- Pinedo, A. C., A. Pinedo, A., R.M. Quintana, M. y M. Martínez, S. 2007. Análisis de áreas de deforestadas en la región centro- norte de la Sierra Madre Occidental, Chihuahua, México. Tecnociencia 1: 36-43.
- Pontius, R. G; E. Shusas and M. McEachern. 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. Agriculture, ecosystems and environment. 101: 251-268.
- Procuraduría federal de protección al ambiente (PROFEPa). 2013. Glosario. http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/766/1/mx/glosario.html?num_letra=2&num_letra_siguiete=3 (10 octubre del 2013).
- Puga, D. 2008. Crecimiento urbano desordenado: causas y consecuencias. Centre de Recerca en Economía Internacional (CREI), 29 p
- Rojas, L.O., M.J. González G., A. Gómez G. y J. Romo L. 2012. Renta de la tierra y pago de servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla. Ciencias Forestales 3: 41- 56.
- Romero, H., C. Fuentes. 2009. Análisis multiescalar de los cambios en los complejos dinámicos territoriales en la Cuenca del río Itata. Centro EULA de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción 1:17.
- Rosete, V. F.A., J. L. Pérez, D. y G. Bocco. 2008. Cambio de uso de suelo y vegetación en la península de Baja California, México. Investigaciones geográficas, boletín del instituto de geografía, UNAM 67: 39-58.
- Saab, V. 1999. Importance of spatial scale to habitat use by breeding birds in riparian forests: a hierarchical analysis. Ecological applications 9: 135-151.
- Said, I. G. y G. P. Zarate de L. 2003. Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. Editorial Trillas. México, DF. 643 p.
- Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SMRN), Secretaría del Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2009. Estudio regional forestal. Asociación Regional de Silvicultores A.C. 259 p.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2012. El ambiente en números. Edición. 2012. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap0_docs_previos.pdf (7 de enero del 2014).
- Secretaría del Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SMRN). 2007. Diagnóstico socioeconómico y de manejo forestal unidad de manejo forestal, Zacatlán. Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan - Zacatlán. A.C, 281 p.

- Silva, A. L. C. 1995. Excursión a la regresión logística en ciencias de la salud. Edición Díaz Santos, S. A. Madrid, España. 229 p
- Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM). 1990-2010. Descarga de bases de datos (municipios en cifras). <http://www.municipios-web.com.mx/informaci%C3%B3n-municipal/snim-inafed/>.(nov. del 2013)
- Southgate, D. and M. Basterrechea. 1992. Population growth, public policy and resource degradation: The case of Guatemala. *Ambio* 21: 460-464.
- Sullivan, M. 1997. Monitoring forest resource dependence in southern Utah: Applications to ecosystem management. Unpublished MSc thesis. Department of Forestry. Utah State University, Logan, Utah, 180 p.
- Trucíos, C. R., M. Rivera, G., G. Delgado, R. J. Estrada, A y J. Cerano, P. 2013. Análisis sobre cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. *TERRA LATINOAMERICANA* 31: 339-346.
- Velázquez, A. y G. Bocco. 2003. Ecología del paisaje y su potencial para acciones de conservación de ecosistemas templados de montaña. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Secretaria del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 315 p.
- Villagarcía. T. 2006. Regresión. Curso de metodología de la investigación cuantitativa. Técnica estadística. CSIC. 35 p.
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney., J. Lubchenco y J. M. Melillo. 1997. Human domination of earths ecosystems. *Science* 277: 494 - 499.
- Weins J.A., N. C. Stenseth., B. Van Homer and R. A. Ims. 1993. Ecological Mechanisms and landscape ecology. *Oikos*: 66: 369- 380.

CAPÍTULO III

DEFINICIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN PARA CAPTURA DE CARBONO

3.1 INTRODUCCIÓN

El protocolo de Kyoto, el cual tiene su origen en el convenio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre el cambio climático (UNFCCC, 2007), es un tratado internacional que busca que los países industrializados reduzcan los gases que contribuyen al calentamiento global (por ej., dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoro de azufre (SF₆)) (ONU, 1988; Caballero *et al.*, 2007). La reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) se promueve a través de mecanismos flexibles; por ejemplo, el comercio de emisiones, el desarrollo limpio, la aplicación de ambos mecanismos en conjunto, así como la contabilización del carbono absorbido por los bosques, océanos y tierras de cultivo denominados “sumideros de carbono” (ONU, 1998; Ruiz, 2011).

Los bosques representan uno de los principales reservorios o sumideros de carbono en el mundo; es por ello que resulta importante determinar la capacidad real que tienen estos ecosistemas para fijar carbono (FAO, 2006). La capacidad de secuestro de carbono varía dependiendo de la composición florística, edad y densidad de la vegetación por estrato; sin embargo, los árboles son el componente más importante debido a que almacenan el carbono en su estructura leñosa por periodos prolongados favoreciendo la mitigación del cambio climático (Schelze *et al.*, 2000; Laclau, 2003; Pardos, 2010).

En el mundo, se tienen aproximadamente 4,000 millones de hectáreas de bosque lo que representa casi el 30% de la superficie total de la tierra y almacenan más de un billón de toneladas de carbono, cantidad que es el doble del total presente en la atmósfera (FAO, 2006). Cabe indicar que los bosques no sólo almacenan carbono sino que también ofrecen otros bienes y servicios a sus poseedores. Por ejemplo,

los bosques ubicados en zonas tropicales y subtropicales benefician a 1,200 millones de personas con diversos bienes y servicios, además de influir en la reducción y almacenamiento de aproximadamente el 17% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Zambrano *et al.*, 2004; CCMP, 2009).

México se ubica dentro de los 25 países con mayor población, Producto Interno Bruto (PIB) y emisión de CO₂ por quema de combustibles fósiles (SEMARNAT, 2010), ubicándose en el lugar 13, con relación a los países que más emisiones liberan (Elvira, 2010). Según datos reportados por el inventario nacional de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del 2002, México emitió más de 553 millones de toneladas de GEI, que corresponden aproximadamente al 1.6% de las emisiones mundiales de GEI (SEMARNAT e INE, 2010). Se considera a la deforestación y degradación de los bosques, la tercera fuente de emisiones de CO₂ ya que aporta 12.4% del total emitido en el país. Cabe mencionar que la industria y actividades agropecuarias (agricultura y ganadería) son las dos fuentes principales de emisiones de CO₂.

La estimación de carbono aéreo se realiza utilizando métodos directos destructivos o estimaciones indirectas del material vegetal (Brown *et al.*, 1989; Masera *et al.*, 2000) (ver Capítulo 1). Los métodos destructivos consisten en determinar el carbono a través de ecuaciones alométricas realizadas mediante mediciones directas del material vegetal, mientras que los métodos indirectos permiten estimar el carbono utilizando inventarios forestales; estas mediciones generalmente son más económicas ya que se realizan en un tiempo corto y necesitan menos insumos comparadas con los métodos destructivos; cabe mencionar que son menos precisos que los métodos destructivos (Husch, 2001; Ordoñez y Masera, 2001; Ordoñez, 2008; Fonseca *et al.*, 2009).

Para reducir emisiones en México, se han creado esquemas de financiamiento para identificar y valorar los servicios ambientales (captura de carbono, conservación de la biodiversidad y regulación del ciclo hidrológico), además de participar en el mecanismo REDD+ (CCMSS, 2009). Estas actividades tienen la finalidad de promover un desarrollo sustentable a través de la reducción, presión, deforestación y degradación forestal, promoviendo la calidad de vida de las comunidades rurales

(CONAFOR, 2010; IICA, 2012). Sin embargo, para orientar y optimizar los recursos utilizados en estos esfuerzos, se requiere de una estrategia de planificación de los bosques para mantener y favorecer el secuestro de carbono; para ello, es necesario la definición de áreas prioritarias de captura de carbono (García y Lagares, 2011). Las áreas prioritarias son definidas a partir de la base de una alta biodiversidad, aspectos de alto valor ecológico, amenazas por actividades humanas y oportunidades para la conservación (Collins *et al.*, 2001; Morgan *et al.*, 2005). En México, las áreas prioritarias de conservación se han promovido en las dos últimas décadas, inicialmente por grupos de investigación del extranjero y recientemente por investigadores nacionales (Ceballos *et al.*, 2009; Bojórquez *et al.*, 2004; Cantú *et al.*, 2004; Riemann y Ezcurra, 2005; Ceballos, 2007; Chávez, 2014).

La delimitación de áreas prioritarias de captura de carbono se ha utilizado para promover la disminución de las tasas altas de deforestación y recuperar las áreas degradadas; lo anterior para implementar la compensación o retribución económica hacia el dueño con el objetivo de mantener, proteger y mejorar los beneficios que el ecosistema proporciona (Vargas *et al.*, 2009; Saavedra *et al.*, 2011; Álvarez y Rubio, 2013). Por otro lado, el ordenamiento ecológico enfocado a la identificación de áreas prioritarias de captura de carbono permite identificar las zonas importantes para la provisión de servicios ambientales, como la captura de carbono (SEMARNAT y SRNyMA, 2009). La CORENA (2000) en el Distrito Federal determinó las áreas prioritarias de conservación con el objetivo de reducir la pérdida de biodiversidad derivada de la degradación ambiental y destrucción de los ecosistemas naturales. Dicha delimitación se realizó mediante la reclasificación del uso del suelo y vegetación utilizando las densidades de carbono propuestos por Ordoñez (2004) que generó índices de contenido y captura de carbono aéreo.

Los ecosistemas forestales de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán se han visto afectados por actividades que realiza el hombre; por ejemplo, la obtención de leña de manera clandestina para actividades domésticas, tala clandestina comercial, apertura de caminos y áreas arboladas para de cultivos agrícolas (SMRN, 2007). Lo anterior ha provocado cambio de uso del suelo, degradación y deforestación, siendo estas actividades la tercera fuente de emisiones de dióxido de carbono a nivel nacional. Debido a estos fenómenos, es importante realizar la delimitación de áreas

prioritarias de conservación de captura de carbono con la finalidad de aportar elementos que identifiquen áreas con potencial de captura de carbono y riesgo de deforestación. Esta investigación pretende lograr este propósito.

3.2 OBJETIVOS

- a) Determinar el contenido de carbono aéreo en ecosistemas forestales bajo manejo de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla con la finalidad de determinar los reservorios existentes.
- b) Identificar las áreas prioritarias de conservación considerando la aptitud de los terrenos de captura de carbono y riesgo de deforestación.
- c) Generar estrategias de manejo para la conservación de áreas prioritarias de conservación para captura de carbono en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.

3.3 MÉTODOS Y MATERIALES

La presente investigación se integró en cuatro etapas: (1) Estimación del contenido de carbono a partir de los datos de volumen reportados en los inventarios forestales provenientes de los planes de manejo; (2) Determinación de la aptitud de carbono aéreo; (3) Delimitación de áreas prioritarias de conservación de captura de carbono y generación de estrategias de manejo y conservación; y (4) Análisis comparativo de las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono a los niveles regional y municipal.

3.3.1 Estimación del contenido de carbono aéreo

Para la estimación del carbono aéreo se utilizó el método indirecto, a través de datos de inventarios forestales provenientes de Programas de Manejo Forestal. Este método permitió estimar el carbono en biomasa aérea a partir de datos existentes provenientes de los predios bajo manejo, evitando realizar el muestreo destructivo en el área de estudio (Brown *et al.*, 1989; Masera *et al.*, 2000; Husch, 2001; Ordoñez y Masera, 2001; Ordoñez, 2008; Fonseca *et al.*, 2009).

Los Programas de Manejo Forestal (PMF) se obtuvieron de los técnicos forestales de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla incluyendo el apoyo de Asesores en Manejo de Recursos Forestales, S. C. (ASMARF), la Unión de Ejidos de Producción, Explotación y Comercialización Industrial, Agropecuaria y Forestal de la Sierra Norte de Puebla, y de la Asociación Regional de Silvicultores de Chignahuapan-Zacatlán A.C. Dichos inventarios se realizaron a escala pequeña (predio) proporcionando información confiable y reciente debido a que los datos son obtenidos de las mediciones que utilizan para elaborar los programas de corta de los predios bajo manejo forestal. Por tanto, para el municipio de Chignahuapan se recopiló la información de 24 predios que cubren una superficie de 20,187.0 ha, mientras que para Zacatlán se obtuvo información de 28 predios equivalentes a 6,124.2 ha.

Posterior a la identificación de predios (Anexos 2.4), se realizó el cálculo de carbono en biomasa aérea mediante la ecuación 1 (Masera *et al.*, 2000).

$$C_{BA} = V * WD * BEF * CC \quad (Ec.1).$$

Donde:

C_{BA} = Contenido de carbono en biomasa aérea;

V = Volumen de la madera;

WD = Densidad de la madera;

BEF = Factor de expansión de biomasa; y

CC = Contenido de carbono.

La ecuación (1) se considera conservadora, debido a que únicamente incluyó el volumen por especie de árboles con diámetros maderables comerciables, sin incluir árboles muertos ni diámetros menores a 15 cm.

La utilización del factor de expansión en la Ec. (1) tiene la finalidad de incluir los componentes de la biomasa que son difíciles obtener a partir de mediciones directas (por ejemplo, ramas, follaje, raíces y otra vegetación). Los valores de referencia de los factores de expansión (*BEF*) se tomaron de trabajos previos: *Pinus* spp. (1.38), *Quercus* spp. (1.5), *Abies* spp. (1.3) y latifoliadas (1.3) (Brown y Lugo, 1984; Domínguez *et al.*, 2009; Silva y Návar, 2010).

Para determinar la densidad de la madera (*WD*) de cada especie (EC. 1), se recurrió a la base de datos de CONAFOR (2011) e investigaciones previas (Goche, 1999; Goche *et al.*, 2000; Honorato y Fuentes, 2001; Arredondo y Návar, 2012) donde se reportan densidades de madera de especies forestales existentes en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Densidad de la madera de especies maderables de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla

Especie	Densidad (kg m ⁻³)
<i>Abies religiosa</i>	380
<i>Quercus</i> spp.	760
<i>Pinus pseudostrobus</i>	550
<i>Pinus patula</i>	430
<i>Pinus ayacahuite</i>	340
<i>Pinus montezumae</i>	460
<i>Pinus hartwegii</i>	496
<i>Pinus leiophylla</i>	485
<i>Pinus teocote</i>	480
<i>Pinus rudis</i>	530
Latifoliadas	600

Debido a la falta de información específica y considerando que la estimación del peso seco de carbono en biomasa varía entre 0.45 y 0.55, esta investigación utilizó un valor de 0.50. Lo anterior tomando en consideración que el 50% del peso seco de cualquier organismo vegetal está constituido por carbono (IPCC, 1996; Brown, 1997; Houghton *et al.*, 1999).

Con los datos de volumen, densidad, factor de expansión y contenido de carbono se realizó el cálculo de biomasa aérea por especie utilizando el Microsoft Office Excel ® en el cual se obtuvo el contenido de carbono en biomasa área de las especies representativas de cada predio con la finalidad de obtener el carbono total por predio. Posteriormente, se obtuvieron los reservorios de carbono en los municipios estudiados, los valores se presentaron en carbono equivalente (CO_{2eq}), el cual se

obtiene mediante la multiplicación de los datos de carbono total por la relación del peso de la molécula de CO₂ (44) y el peso del átomo de carbono (12) (Brown *et al.*, 1989; Raev *et al.*, 1997; Husch, 2001; Pacheco *et al.*, 2007). Por ejemplo, un predio compuesto por *Pinus teocote* con una edad de 23 años tiene un volumen de 50.43 m³ ha⁻¹ año⁻¹. al multiplicarlo por 0.48 que corresponde a la densidad, 1.38 del factor de expansión y 0.5 que corresponde al contenido de carbono, da como resultado 0.726 ton CO₂ ha⁻¹ año⁻¹, para obtener el carbono equivalente se multiplica por 3.67 que es el resultado de dividir 44 entre 12; teniendo así un reservorio de 2.66 ton CO_{2eq} ha⁻¹ año⁻¹

3.3.2 Determinación de la aptitud de carbono aéreo

La base de datos creada en Microsoft Office Excel ® con información de carbono equivalente por predio analizado se unió a la base de datos de los polígonos de dichos predios mediante el programa ArcGis 9.3 y el comando Join, dicha base de datos contiene información de carbono equivalente y el nombre del predio; teniendo la base completa se desplegó en ArcGis ArcMap™ Versión 9.3 y fue representada a través de polígonos. Posteriormente, se extrajo la información de carbono con ayuda de la malla creada en el Capítulo II, con la finalidad de tener homogeneidad, ya que la unidad básica del estudio es la hectárea. Cabe mencionar que la información de los datos de carbono se interpolaron a la superficie forestal total de cada municipio Chignahuapan (29,654.1ha) y Zacatlán (28,039.5 ha) (Aguirre *et al.*, 2009). Dicha interpolación se realizó con el método Krigging el cual es un método de interpolación determinístico basado en modelos estadísticos (Murillo *et al.*, 2012). El Método Krigging es adecuado cuando hay una influencia direccional o la distancia esta correlacionada espacialmente con los datos (Eastman, 2009).

Posterior a la interpolación, se obtuvo el mapa de distribución de carbono por municipio (Chignahuapan y Zacatlán). Con la finalidad de estandarizar los criterios de aptitud de carbono, los valores interpolados se dividieron en tres intervalos o clases considerando las estimaciones máximas y mínimas de cada municipio, consecutivamente se utilizó el comando Reclassify localizado en el módulo Spatial Analyst dentro del programa ArcGis 9.3. Lo anterior, para asignar un nuevo valor a

cada intervalo (Eastman, 2009) y obtener como producto final un mapa con categorías de aptitud de captura de carbono: (1) alta, (2) media y (3) baja.

3.3.3 Delimitación de áreas prioritarias de conservación de captura de carbono

La delimitación de áreas prioritarias de captura de carbono se realizó usando la técnica de álgebra de mapas, la cual permite calcular escenarios a partir de dos criterios combinados: Aptitud de carbono y riesgo de deforestación. El mapa de riesgo de deforestación fue el que se obtuvo a nivel municipal en el Capítulo II, Figura 2.21 y 2.22. Los mapas consideraron los criterios estandarizados siguientes: 1: aptitud alta 2: aptitud media; 3: Aptitud baja; para el caso de riesgo de deforestación se emplearon las mismas clases utilizadas por aptitud (CORENA, 2000; SEMARNAT, INE Y PEMEX, 2008; Vargas *et al.*, 2009). Los mapas con los criterios estandarizados de aptitud de carbono y riesgo de deforestación, se procesaron mediante módulo de Spatial Analyst y la herramienta Raster Calculator para ejecutar la operación de multiplicación de los dos raster (riesgo por aptitud). El resultado de la operación fue un mapa con la combinación de los criterios como se muestran en el (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Obtención de áreas prioritarias de conservación de carbono.

Riesgo	Aptitud	Prioridad de conservación
Alto	Alta	Alta
Alto	Media	Alta
Medio	Alta	Alta
Alto	Baja	Media
Medio	Media	Media
Bajo	Alta	Media
Medio	Baja	Baja
Bajo	Media	Baja
Bajo	Alta	Baja

Una vez obtenido el mapa de áreas prioritarias, se desarrollaron las estrategias de manejo y conservación para las áreas prioritarias de conservación en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.

3.3.4 Análisis comparativo de las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono a los niveles regional y municipal

Finalmente, se realizó un análisis comparativo sobre los resultados expresados en hectáreas de riesgo de deforestación, aptitud de carbono y áreas prioritarias de conservación de captura de carbono, con la finalidad de observar las diferencias existentes al delimitar las áreas prioritarias con fines de captura de carbono en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de resultados está ordenado por municipio (Chignahuapan y Zacatlán), considerando información sobre distribución de carbono, la aptitud de los bosques para captura de carbono, definición y validación de las áreas prioritarias y generación de estrategias de manejo. Finalmente, se concentra la información y se analiza comparativamente los resultados más importantes sobre aptitud de carbono, riesgo de deforestación, y áreas prioritarias de conservación de captura de carbono a nivel municipal.

3.4.1 Chignahuapan

a) Estimación del contenido de carbono aéreo

La distribución de carbono por predio se observa en la Figura 3.1, destacando que existen varios predios que capturan más de 20 ton CO_{2eq} ha⁻¹ año⁻¹; por ejemplo, el predio San José Atzintlimeya captura 30 ton CO_{2eq} ha⁻¹ año⁻¹, mientras que Villa Cuauhtémoc, Michac y Piedra ancha capturan 26, 22 y 21 ton CO_{2eq} ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. En el caso de los predios de *Quercus* spp con volúmenes maderables altos presentan altas cantidades de CO_{2eq} almacenado en la parte centro y norte del municipio. Cabe mencionar que la captura de carbono y la cantidad de especies por predio de manejo presentan correlación directa (0.049) indicando que la captura de carbono depende del número de especies por predio (Anexos 2.3) y del volumen existente y tipo de especie. De hecho, Schulze *et al.* (2000) señalan que las diferencias entre predios pueden deberse principalmente a la composición de los bosques, tipo de especie y edad.

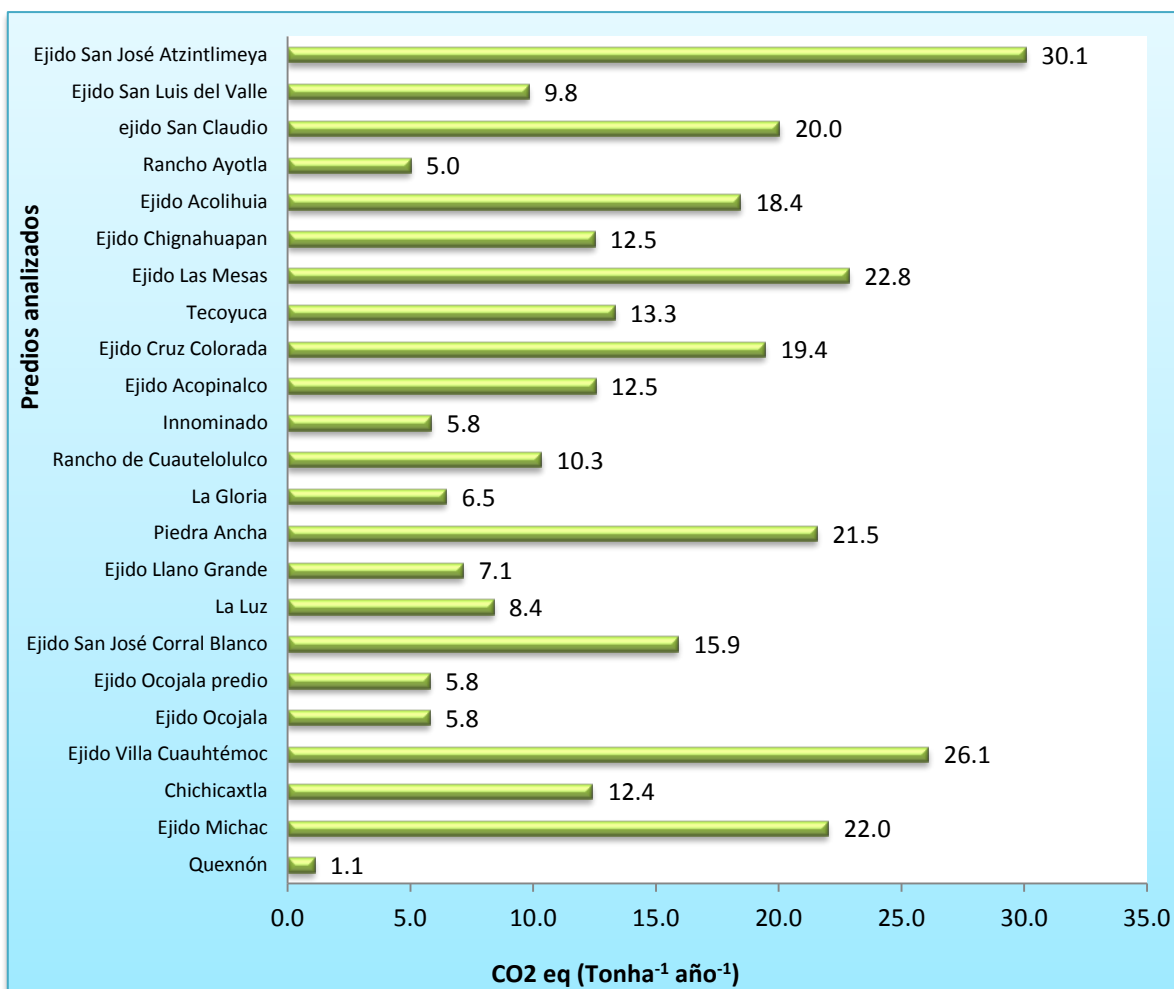


Figura 3.1. Distribución de carbono equivalente almacenado en los predios analizados del municipio de Chignahuapan, Puebla.

b) Aptitud de carbono del municipio de Chignahuapan

En el municipio de Chignahuapan se encuentran distribuidas 29,654 ha, de las cuales 3,480 ha de bosques corresponden a las áreas con aptitud alta con un potencial de captura de 16 a 32 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹ representando el 12 % de la superficie forestal del municipio (Figura 3.2). Por otro lado, el 18% (5,157.7 ha) almacenan de 7 a 15.9 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹, simbolizando las áreas con aptitud media de captura de carbono y el 70% de la superficie forestal municipal se define como áreas con aptitud baja ya que capturan en promedio 6 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹ y cubren una superficie de 20,760 ha; finalmente, las áreas sin vegetación se consideran con aptitud de captura de carbono nula.

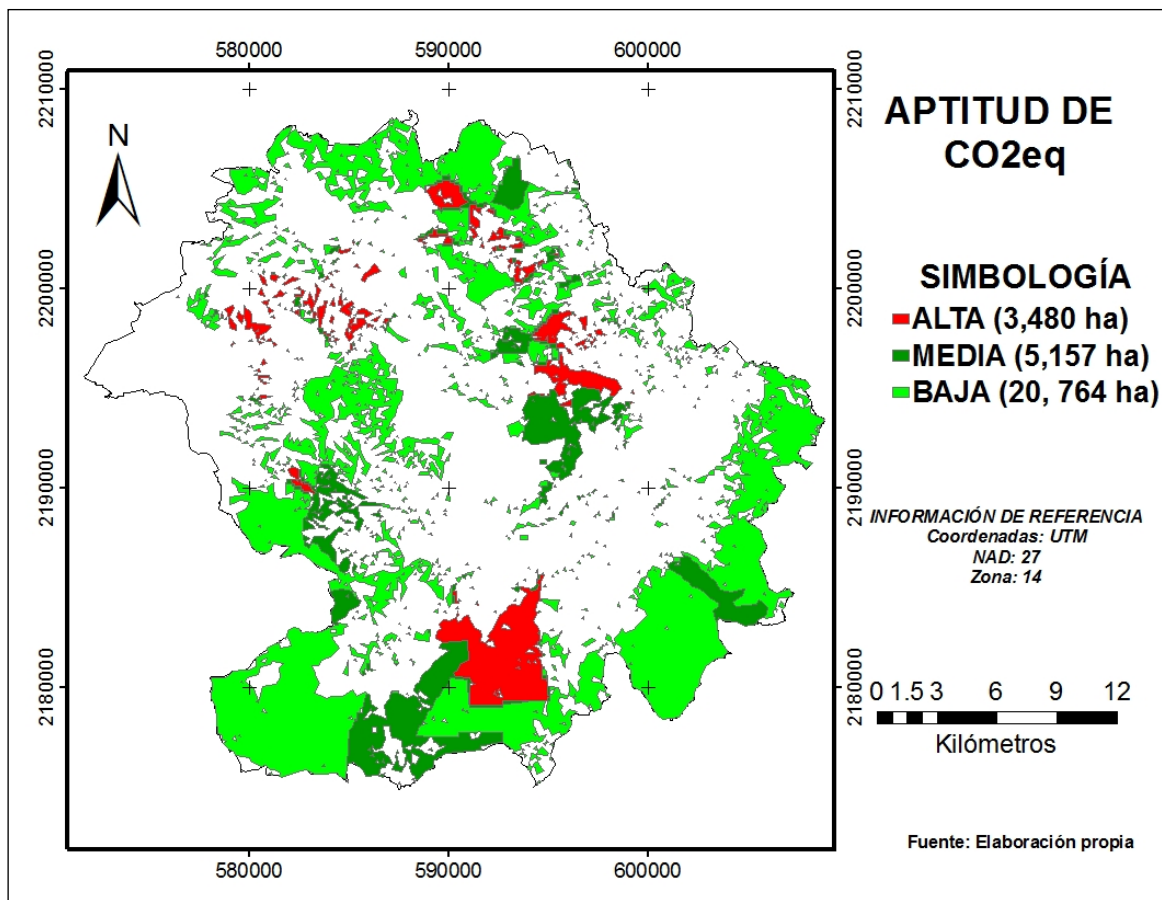


Figura 3.2. Reservorios de carbono dependiendo la aptitud de CO₂ eq ton ha⁻¹ año⁻¹, en el municipio Chignahuapan, Puebla.

Los reservorios de carbono en biomasa aérea están en función de la cantidad de carbono en un momento determinado por lo que al tener predios con aprovechamiento comercial disminuyen las reservas en el periodo en que se realiza la corta de regeneración. Ángeles *et al.* (2005) mencionan que las áreas que capturan menor cantidad de carbono se ubican en ecosistemas con arbolado joven y vegetación escasa producto de las actividades de cosecha. Por su parte, Lazcano y Zepeda (2003) analizaron el secuestro de carbono en tres especies de pino: *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, considerando un área basal de 10 m² ha⁻¹, una edad de 60 años y un índice de sitio de 24; además, señalan que el secuestro de carbono bajo esas condiciones varía de 8 a 11 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹ lo cual coincide con los resultados estimados en este trabajo considerando únicamente la captura de carbono en biomasa aérea.

c) Áreas prioritarias de captura de carbono

El mapa de riesgo de deforestación para el Municipio de Chignahuapan, Puebla de la Figura 3.3 (obtenido en el Capítulo II) muestra que el 7% (2,097 ha) de la superficie total forestal (29,654 ha) del municipio presenta alto riesgo de deforestación; estas áreas se localizan en los límites agrícolas y pecuarios. Asimismo, 14% (4,395 ha) de la superficie forestal total presenta un riesgo medio y sólo el 15% (2,097 ha) se considera con riesgo bajo de deforestación.

Al combinar el mapa de deforestación con el mapa obtenido de la aptitud de captura de carbono (Figura 3.2) se obtiene el mapa de áreas prioritarias de conservación de captura de carbono (Figura 3.4). Este último, muestra que a nivel municipal se tienen sólo 628 ha con prioridad alta de conservación para captura de carbono, 2,876.1 ha con prioridad media y 7,183 ha con prioridad baja. El hecho de que la mayor superficie forestal del municipio se estime con prioridad baja de conservación para captura de carbono quizás se deba al buen manejo que los administradores forestales realizan y a la preocupación por conservar los recursos forestales con la finalidad que las futuras generaciones hagan uso de los recursos de manera sustentable (SMRN, 2007).

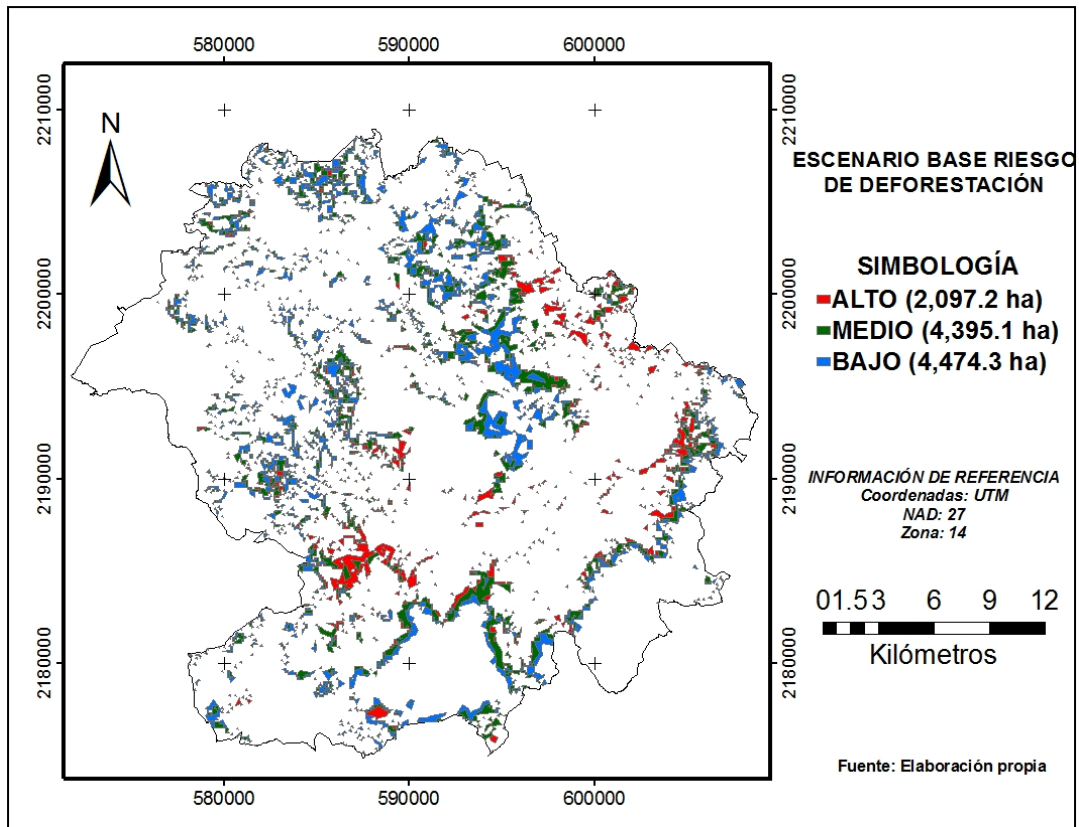


Figura 3.3. Escenario base de riesgo de deforestación para el municipio de Chignahuapan, Puebla.

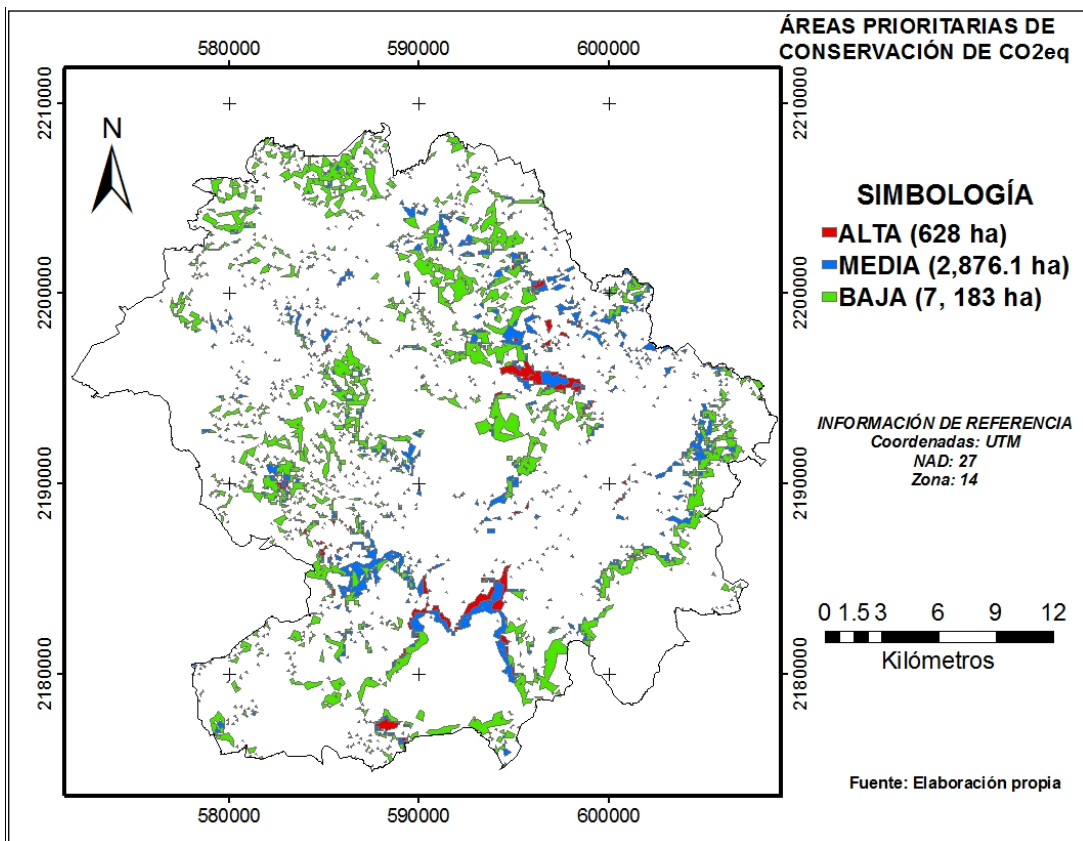


Figura 3.4. Áreas prioritarias de conservación de captura de carbono en el municipio de Chignahuapan, Puebla.

d) Validación de áreas prioritarias de conservación de captura de carbono

Lasso *et al.* (2011) coinciden que para la validación de las áreas prioritarias de conservación se deben de considerar puntos específicos en la cartografía y posteriormente visitas a campo. Además, otro aspecto importante a considerar para la validación de las áreas prioritarias de conservación son las mesas de trabajo con concedores del área de estudio.

En esta investigación se realizó la validación a través de recorridos de campo en el municipio de Chignahuapan; donde se encontró que las áreas con prioridad alta de conservación para captura de carbono se encontraban generalmente fraccionados por áreas agrícolas con cultivos de maíz, zonas pecuarias y la presencia de zonas urbanas (Figura 3.5a); lo anterior, indica que existe alto riesgo de deforestación, aunque también se encuentran conglomerados de bosque con aptitud alta de captura de carbono.

En el caso de las zonas con prioridad media de conservación (Figura 3.5 b), se identificaron áreas con bosque de pino-encino, pequeños manchones de zonas agrícolas dentro del área boscosa, o áreas agrícolas en descanso y/o abandonadas, lo que permite la recuperación de los bosques. Finalmente, el área con prioridad baja no presentó fragmentaciones por ningún uso de suelo; estas áreas se ubican alejadas de las fronteras agrícolas o en macizos forestales manejados en el municipio de Chignahuapan.

Además de lo anterior, se consideró la opinión de los Técnicos Asesores en Manejo de Recursos Forestales, S. C. (ASMARF) quienes consensuaron que la delimitación de las áreas de conservación de captura de carbono definida en este trabajo es adecuada.

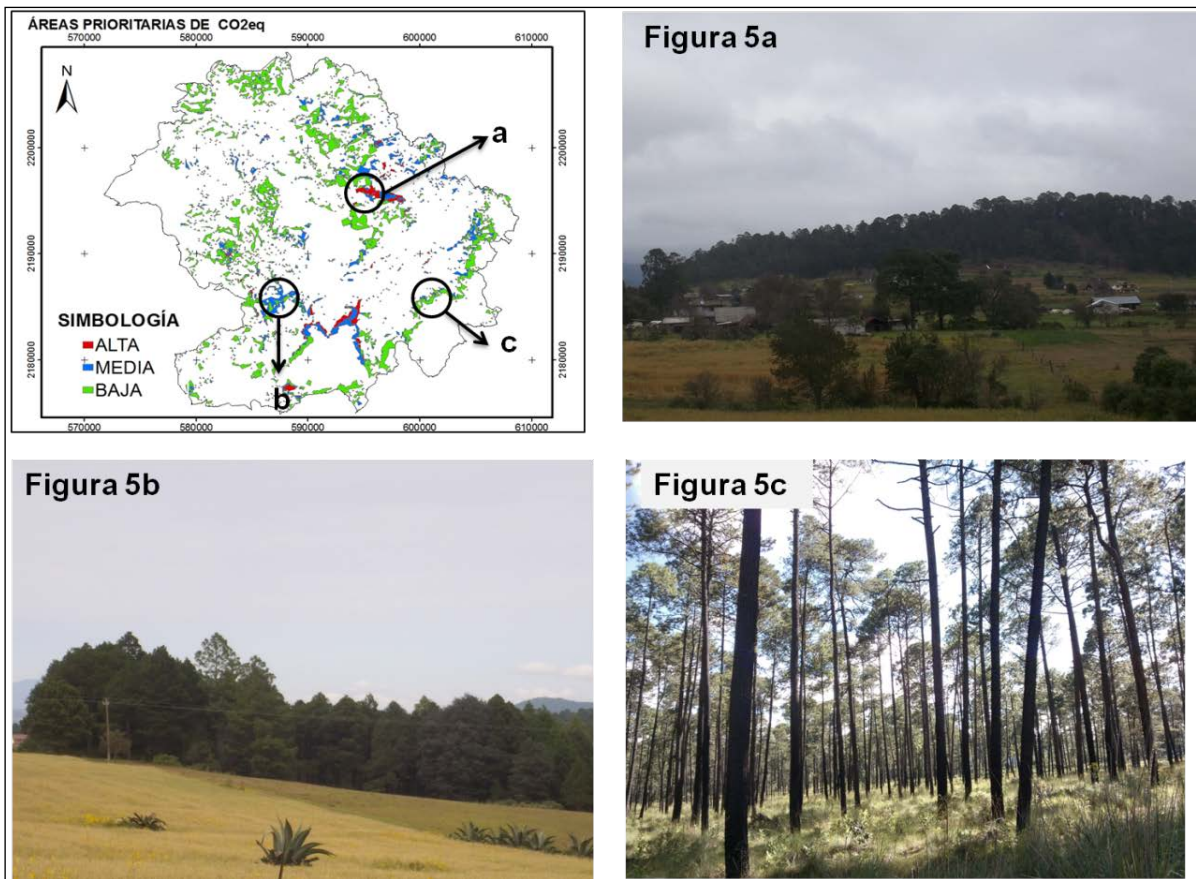


Figura 3. 5. Visualización de las áreas prioritarias de captura de carbono a) prioridad alta, b) prioridad media y c) prioridad baja.

e) Estrategias de manejo de las áreas prioritarias

En el Cuadro 3.3 se describen las estrategias de manejo generadas por prioridad de conservación, definiendo que las áreas con prioridad alta son muy vulnerables y fáciles de reemplazar por diferentes usos de suelos.

Cuadro 3.3. Estrategias de manejo de las áreas prioritarias de captura de carbono en el municipio de Chignahuapan, Puebla.

Prioridad	Superficie (ha)	Estrategias de manejo	Encargados de desarrollar las estrategias
Alta	628.0	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concientizar a la población sobre la importancia de los recursos forestales como productores de bienes y servicios ambientales. 2. Elaborar un plan de ordenamiento para las actividades agrícolas, pecuarias y residenciales con la finalidad de conservar el recurso forestal y evitar que dichos usos ocasionen deforestación por ser sitios muy vulnerables al cambio de uso del suelo. 3. Incluir las áreas forestales en el mercado de servicios ambientales (bonos por captura de carbono). 4. Vincular a los dueños del recurso con instituciones gubernamentales y no gubernamentales para generar alternativas económicas que no dañen a los ecosistemas. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Técnicos forestales, CONAFOR y SEMARNAT 2. Técnicos forestales, y municipio y CONAFOR 3. Municipio y estado 4. Técnicos forestales y CONAFOR
Media	2,876.1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evitar la introducción de ganado en las áreas abandonadas o en descanso ya que compactan el suelo y pueden dañar a la regeneración. 2. Reforestar las áreas agrícolas abandonadas. 3. Incluir los predios en programas de aprovechamiento forestal legal. 4. Evitar la extracción ilegal de los recursos forestales. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dueños del recurso forestal 2. CONAFOR y dueños de los recursos 3. Técnicos forestales 4. Dueños de los recursos y CONAFOR
Baja	7,183.0	<ol style="list-style-type: none"> 1. Continuar con el aprovechamiento forestal comercial. 2. Generar un esquema de pagos por bonos de carbono durante el crecimiento de los rodales hasta alcanzar diámetros comerciables. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dueños de los recursos 2. CONAFOR y técnicos forestales

Para poder desarrollar las estrategias de manejo (Cuadro 3.3) es necesaria la participación de los dueños del recurso forestal y los técnicos forestales, ya que son la base para el manejo de los recursos naturales; sin olvidar que es necesario incluir los apoyos gubernamentales y no gubernamentales mediante la elaboración de proyectos a nivel municipal con la finalidad de aprovechar los bosques y recursos naturales de manera sustentable, evitando así la deforestación.

3.4.2 Zacatlán

a) Distribución de carbono en el municipio de Zacatlán, Puebla

En el municipio de Zacatlán se localizaron predios que capturan altas cantidades de carbono. Por ejemplo el ejido Poxcuatzingo con una especie dominante de *Pinus patula* captura aproximadamente 39 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹. Castellanos (1993) realizó un estudio en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán y determinó que el carbono en biomasa área para *Pinus patula* con categoría diamétricas de 65 cm, captura en promedio 2 toneladas de carbono neto, por lo que las estimaciones realizadas a nivel de hectárea no varían mucho respecto a los datos obtenidos en el estudio.

De manera general, se obtuvo que los bosques en promedio capturan 11.6 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹, además de presentar una desviación estándar de 8.7; indicando el valor en el que los datos de captura de carbono se pueden alejar del promedio. Por su parte, la correlación entre el volumen de carbono y el número de especies por predio indica que existe poca correlación directa (R=0.02), es decir que el incremento del carbono por predio no está directamente ligado al número de especies (Anexos 2.3).

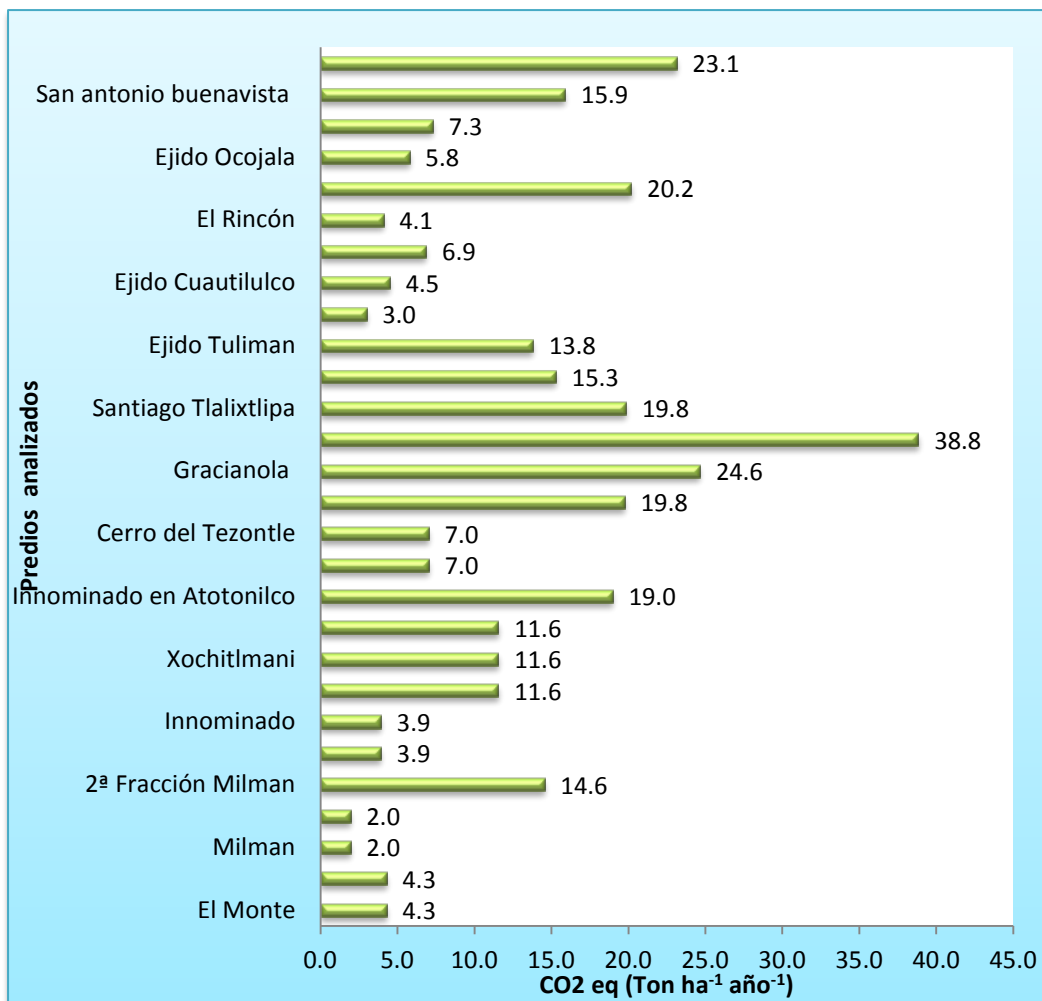


Figura 3.6. Distribución de carbono equivalente almacenado en los predios analizados del municipio de Zacatlán, Puebla.

b) Aptitud de carbono en el municipio de Zacatlán Puebla

En el municipio de Zacatlán se tiene una distribución de carbono que varía desde 200 kg de CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹, hasta 39 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹; la distribución se observa en la Figura 3.7 y muestra que el principal reservorio con aptitud alta de captura de carbono se localiza en la parte norte y centro del municipio. Dichas áreas se encuentran cubiertas por arbolado de los géneros *Pinus* spp y *Quercus* spp. Castañeda *et al.*, (2012) indican que los bosques *Quercus* spp. capturan en promedio 48.6 ton CO₂ eq ha⁻¹ mientras que los bosques de *Pinus oocarpa* capturan hasta 74 CO₂ eq ha⁻¹, dichos valores corroboran que los predios con presencia de *Quercus* spp tienen mayor potencial de captura de carbono.

Por el contrario, las áreas con una aptitud baja capturan en promedio sólo 5 toneladas de $\text{CO}_2_{\text{eq}} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y las áreas con aptitud media 12 toneladas de $\text{CO}_2_{\text{eq}} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Cabe mencionar que Figueroa (2010) reporta que en promedio un rodal de 25 años compuesto por *Pinus patula* y *Quercus* spp captura en promedio 86.4 ton C $\text{ha}^{-1} \text{ año}$, al convertir el valor resultante a $\text{CO}_2_{\text{eq}} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ da como resultado que el rodal captura 12.6 ton $\text{CO}_2_{\text{eq}} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ coincidiendo con los valores reportados en el presente estudio. Por tanto, es posible señalar que los bosques bajo manejo del municipio de Zacatlán pueden funcionar eficientemente como reservorios de captura de carbono ya que el 11% de los bosques se encuentran catalogados con aptitud alta de captura de carbono y 73% se considera como áreas con aptitud baja, con un potencial de captura que varía desde 200 kg $\text{CO}_2_{\text{eq}} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a 12 ton $\text{CO}_2_{\text{eq}} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

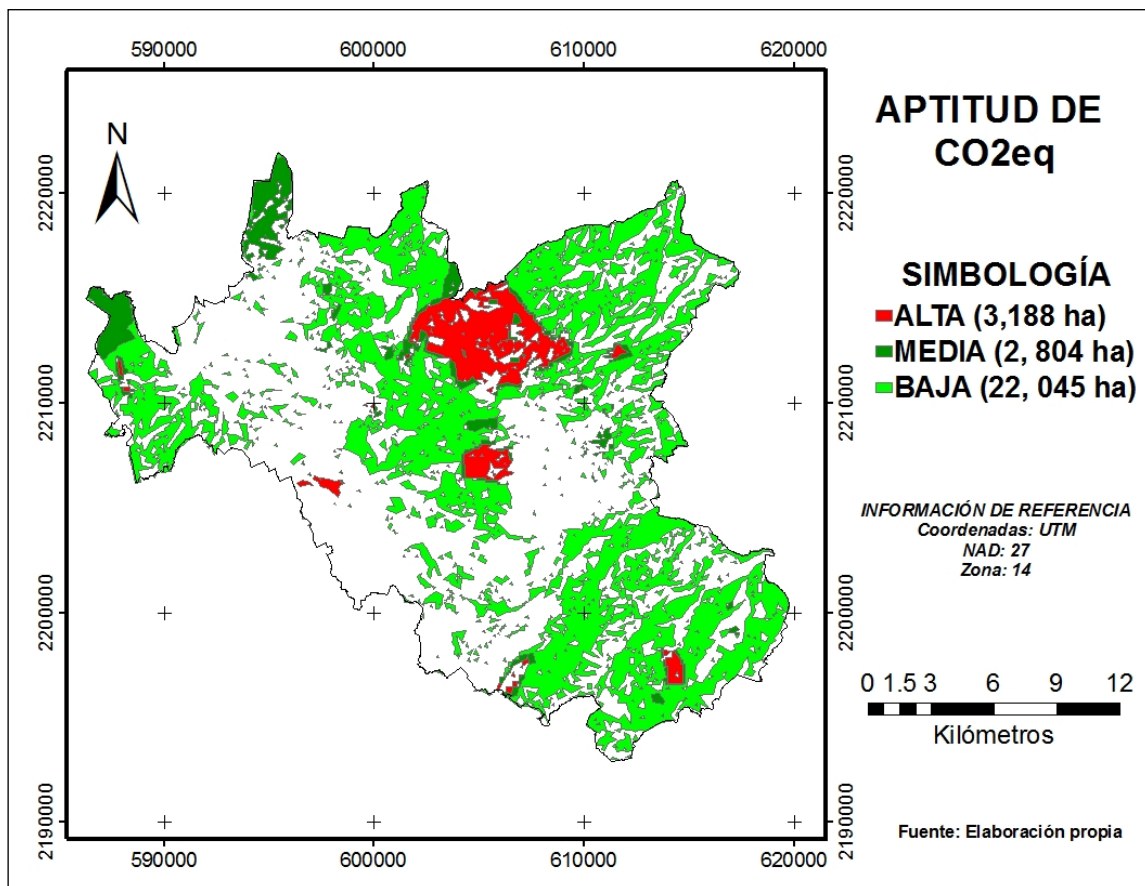


Figura 3.7. Reservorios de carbono dependiendo la aptitud de $\text{CO}_2_{\text{eq}} \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en el municipio de Zacatlán, Puebla.

c) Áreas prioritarias de captura de carbono en el municipio de Zacatlán, Puebla.

En la Figura 3.8 se identifican 1,797.7 ha con prioridad alta en el proceso de deforestación y 2,271.1 ha con prioridad media y sólo 336.6 ha tienen riesgo bajo de deforestación. Lo anterior es influenciado principalmente a que la superficie forestal se encuentra fragmentada por agricultura y ganadería lo que incrementa el riesgo de deforestación en el municipio. Cabe indicar que las condiciones de riesgo de deforestación y aptitud de carbono se consideran un factor importante para determinar las áreas prioritarias a nivel municipal. Finalmente, en Zacatlán se identificaron 310 ha con prioridad alta de conservación de captura de carbono; por su parte 1,744 ha mostraron prioridad media de conservación, y la mayor superficie (2,265 ha) la presenta la prioridad baja (Figura 3.9

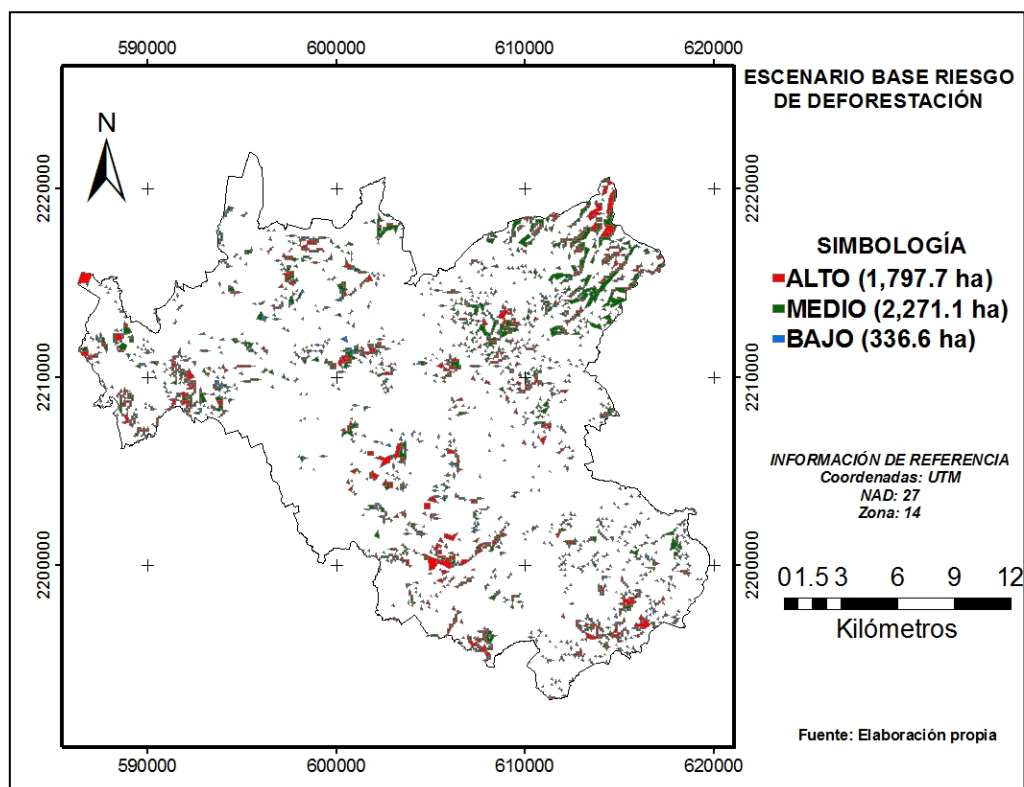


Figura 3.8. Riesgo de deforestación, escenario base del municipio de Zacatlán, Puebla.

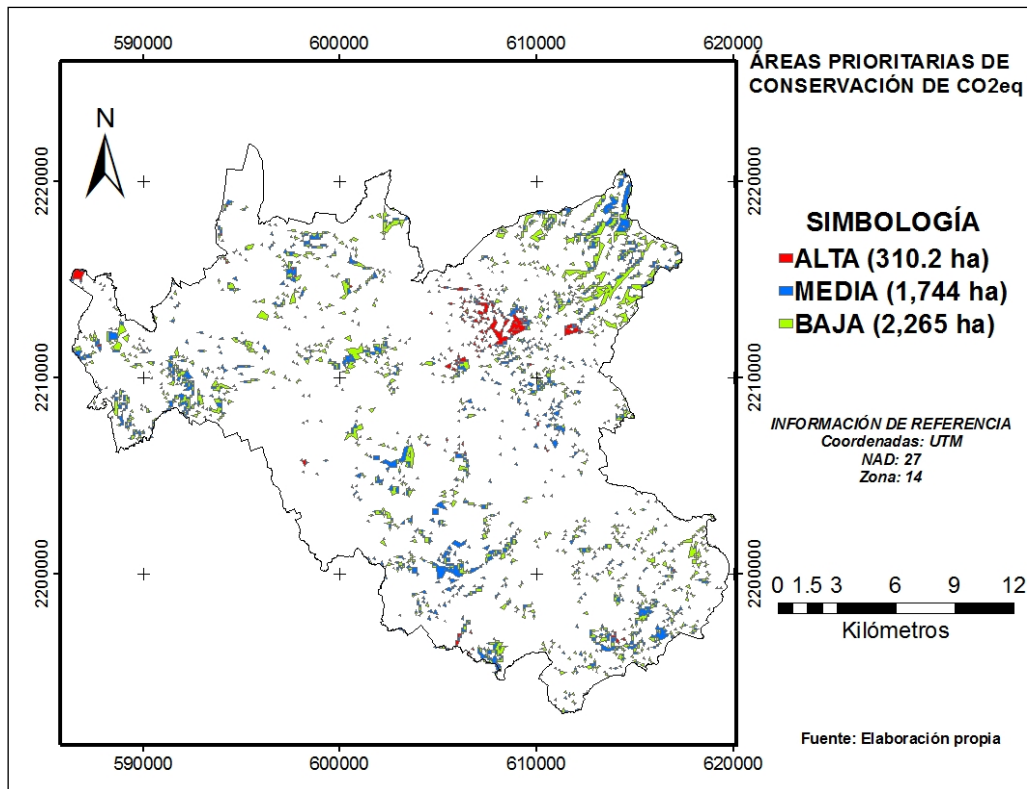


Figura 3.9. Áreas prioritarias de conservación de captura de carbono en el municipio de Zacatlán, Puebla.

d) Validación de áreas prioritarias de captura de carbono

Para la validación de las áreas prioritarias en Zacatlán, se identificó que las áreas con prioridad alta se encuentran fraccionadas por zonas agrícolas, residenciales y pecuarias; las cuales se localizan en pendientes pronunciadas mayores a 20% (Figura 3.10a). Una de las principales actividades en la región es la siembra de maíz lo cual favorece el cambio de uso del suelo. Cabe mencionar que dichas áreas resultaron con prioridad alta de conservación para captura de carbono debido a que los límites agrícolas se expanden rápidamente hacia la zona forestal; considerándose además zonas con riesgo alto de deforestación aquellas áreas que presentan aptitud alta de captura de carbono. Este cambio de uso se presenta principalmente en el suelo con tenencia privada y sin programas de manejo forestal.

Por su parte, las zonas con prioridad media se localizan en la parte sur del municipio en bosques de pino-encino (Figura 3.10b); estas áreas presentan poca fragmentación por cultivos de temporal y algunas huertas de manzano. Finalmente, las áreas de prioridad baja generalmente son conglomerados forestales que han

quedado aislados en partes de difícil acceso o que se encuentran bajo aprovechamiento forestal (Figura 3.10c).

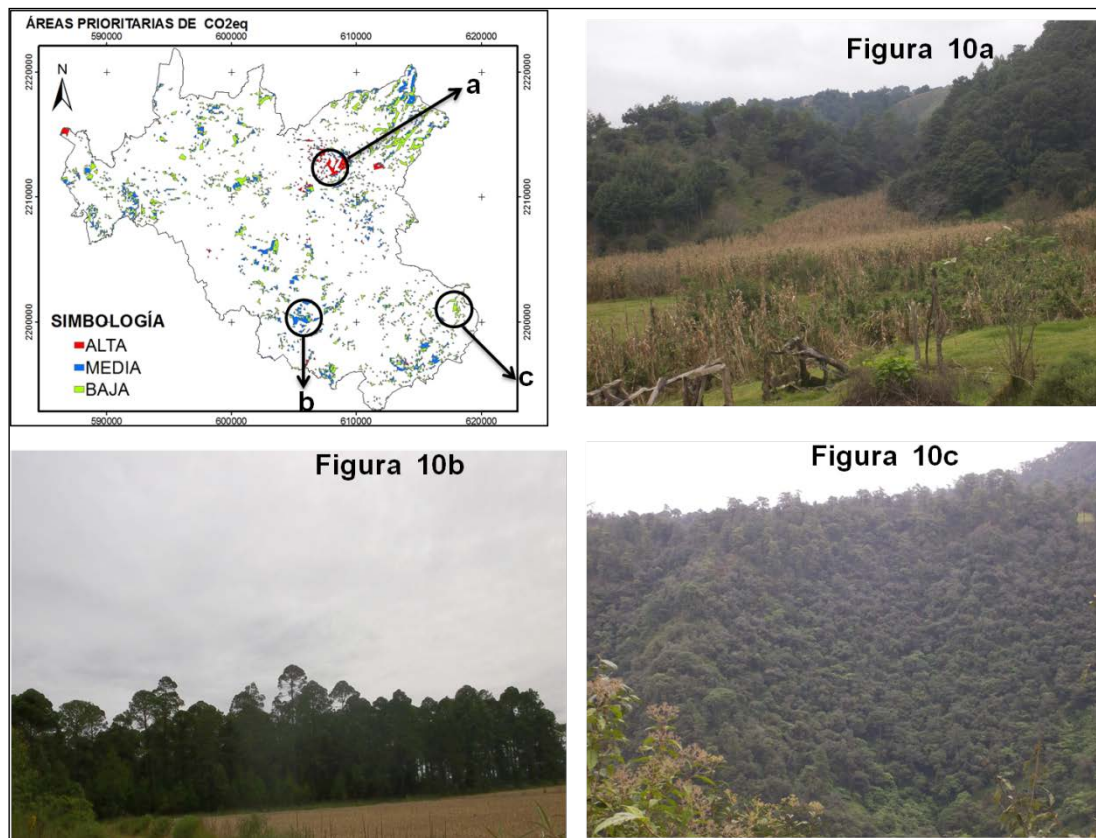


Figura 3.10. Visualización de las áreas prioritarias de captura de carbono (a) prioridad alta; (b) prioridad media; y (c) prioridad baja en el municipio de Zacatlán, Puebla.

e) Estrategias de manejo de las áreas prioritarias en el municipio de Zacatlán

En el Cuadro 3.4 se muestran las estrategias de manejo, conservación y recuperación de las áreas prioritarias, generadas a partir de la problemática presente en campo. Además, se identifica la superficie ocupada por áreas con base en la prioridad (alta, media y baja).

Cuadro 3.4. Estrategias de manejo de las áreas prioritarias de captura de carbono en el municipio de Zacatlán, Puebla.

Prioridad	Superficie (ha)	Estrategia	Encargados de desarrollar las estrategias
Alta	310.2	<ol style="list-style-type: none"> 1. Concientizar a la población sobre la importancia de los recursos forestales como productores de bienes y servicios ambientales. 2. Contrarrestar el deterioro del suelo mediante prácticas de conservación (terrazas, presas filtrantes, surcados al contorno). 3. Implementar reforestaciones en las áreas con pendientes pronunciadas con la finalidad de recuperar la superficie forestal. 4. Generar alternativas económicas que disminuyan el avance de la frontera agrícola hacia las áreas boscosas (implementación de nuevas tecnologías para la producción agrícola, áreas silvopastoriles y agroforestales). 5. Incluir las áreas forestales en el mercado de servicios ambientales (bonos por captura de carbono). 6. Vincular a los dueños del recurso con instituciones gubernamentales y no gubernamentales para generar alternativas económicas que no dañen a los ecosistemas 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Técnicos forestales 2. CONAFOR y CONAGUA. 3. CONAFOR, técnicos forestales y municipio. 4. Municipio, Estado, CONAFOR y SAGARPA 5. CONAFOR, SEMARNAT e Instituciones no gubernamentales 6. Técnicos forestales y CONAFOR
Media	1,744.0	<ol style="list-style-type: none"> 1. Proteger los recursos forestales, no permitiendo que se derribe arbolado sin autorización correspondiente. 2. Aprovechar de manera sustentable los terrenos destinados a el uso agrícola 3. Establecer un mecanismo de pago voluntariado por los servicios que proporciona el bosque (captura de carbono, recarga de acuíferos, provisión de alimentos a los pobladores). 4. Vincular a los dueños de los recursos forestales, con prestadores de servicios técnicos forestales para que les proporcionen información. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. CONAFOR, y dueños del recurso. 2. Dueños del recurso y CONAFOR. 3. SEMARNAT, CONAFOR e Instituciones no gubernamentales 4. Técnicos forestales y CONAFOR
Baja	2,265.7	<ol style="list-style-type: none"> 1. Incrementar programas de manejo forestal en áreas privadas para disminuir el deterioro de los recursos. 2. Generar diversas alternativas industriales para el proceso del producto madera. 3. Generar un esquema de pagos por bonos de carbono durante el crecimiento de los rodales hasta alcanzar diámetros comerciables 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Técnicos forestales y dueños del recurso. 2. Técnicos forestales, CONAFOR, industria forestal 3. CONAFOR, SEMARNAT, Gobierno estatal

Cada una de las estrategias requiere conocimientos específicos del área por lo que se recomienda que dichos proyectos los elaboren los planificadores de los recursos con conocimientos detallados de las necesidades de los poseedores del recurso con la finalidad de disminuir la degradación de los ecosistemas.

3.4.3 Análisis comparativo de áreas prioritarias de carbono entre los municipios Chignahuapan y Zacatlán

El municipio de Chignahuapan cuenta con 628 ha catalogadas con prioridad alta de captura de carbono, mientras que en Zacatlán sólo cuenta con 310 ha con esta categoría (Cuadro 3.5). La diferencia probablemente se deba a que en el municipio de Chignahuapan las áreas forestales presentan mayor riesgo de deforestación a causa de la presión social por satisfacer necesidades de alimentación, vestido, vivienda y energía. Pese a que los ecosistemas de Zacatlán se encuentran fragmentados, este municipio presenta menor riesgo de deforestación probablemente a que la población se concentra espacialmente en menor superficie.

Cuadro 3.5. Datos comparativos de aptitud de carbono, riesgo de deforestación y áreas prioritarias en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.

Criterio	Chignahuapan			Zacatlán		
	Superficie (ha)			Superficie (ha)		
	Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja
Aptitud de CO _{2eq}	3,480.0 11.8%	5,157.7 17.5%	20,764.0 70.6%	3,188.0 11.4%	2,804.8 10.0%	22,045.9 78.6%
Riesgo de deforestación	2,097.2 7.1%	4,395.1 14.9%	4,474.3 15.2%	1,797.7 6.4%	2,271.1 8.1%	336.6 1.2%
Prioridad de captura de carbono	628.0 2.1%	2,876.1 9.8%	7,183.0 24.4%	310.2 1.1%	1,744.0 6.2%	2,265.7 8.1
Superficie total forestal	29,401.8			28,039		

En el Cuadro 3.5 se observa que en el municipio de Chignahuapan existen 2,097.2 ha (7.1%) con riesgo alto de deforestación, 4,395 ha con riesgo medio y 4,474.3 catalogadas con riesgo bajo; mientras que en el municipio de Zacatlán se estimaron 1,797.7 ha que representan el (6.4%) del recurso forestal con riesgo alto de deforestación, 2,271ha con riesgo medio y 336 ha de riesgo bajo. Los resultados indican que el municipio de Chignahuapan tiene mayor superficie con riesgo de

deforestación pese a que en el municipio la mayor superficie forestal se encuentra con aprovechamiento forestal.

Por otra parte, al analizar los datos de aptitud de carbono respecto a la superficie total forestal de ambos municipios (Chignahuapan y Zacatlán), se identificó que en el municipio de Chignahuapan, el 11.8% de los bosques tienen aptitud alta de captura de carbono, 17.5% de aptitud media y 70.6% de aptitud baja. Por su parte, el municipio de Zacatlán presenta una distribución de aptitud similar al de Chignahuapan con el 11.4%, 10% y 78.6%, de aptitud alta, media y baja. Dichos resultados son muy semejantes debido a que se analizaron rodales con aprovechamiento forestal.

Sin embargo, al analizar las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono se observa que el municipio de Chignahuapan presenta mayor superficie de áreas catalogadas con prioridad alta de captura de carbono 2.1% (628 ha), representando el doble de la superficie que la que presenta el municipio de Zacatlán 1.1% (310.2 ha). Por otro lado, la prioridad media y baja para el municipio de Chignahuapan cubren el 9.8% y 24.4%, respectivamente, mientras que para Zacatlán se observa que el 6.2% de la superficie forestal presenta prioridad media y el 8.1% prioridad baja. En este estudio, el riesgo de deforestación y la aptitud de carbono, son los dos principales criterios utilizados para definir las áreas prioritarias de captura de carbono en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.

3.5 CONCLUSIONES

- (a) La estimación de carbono en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán mediante la información de volúmenes de los programas de manejo forestal y el método de interpolación Krigging sugieren estimaciones de carbono que varían de 1 hasta 39 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹. Por lo que se cuenta con áreas catalogadas de aptitud alta capturando 16 a 39 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹, con aptitud media de 7 a 15.9 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹ y áreas de aptitud baja que captura en promedio 6 ton CO₂ eq ha⁻¹ año⁻¹, dichos resultados tienen un potencial de captura de carbono similar en ambos municipios.
- (b) De acuerdo a los resultados obtenidos mediante los criterios de riesgo de deforestación y aptitud de carbono se determinaron 628 ha de prioridad alta

de captura de carbono para Chignahuapan y 310 ha de prioridad alta para el municipio de Zacatlán. Por tanto, la metodología permitió realizar un análisis cuantitativo y la identificación de las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono, considerando una amenaza futura (Riesgo de deforestación). La verificación en campo y la consulta con los manejadores del bosque permitió identificar que las áreas con prioridad alta presentan alta probabilidad de deforestación ya que se encuentran rodeadas de superficie agrícola, pecuaria y pequeños manchones de áreas urbanas.

- (c) La información obtenida permitió generar estrategias de manejo, conservación, recuperación y aprovechamiento de acuerdo al tipo de prioridad y al municipio, para disminuir el cambio en suelos forestales.

3.6 LITERATURA CITADA

- Álvarez, S. y A. Rubio. 2013. Línea base de carbono en bosques mixtos de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2 FIX V.3.2. Ciencias forestales y del ambiente 19: 125-137.
- Ángeles P., G., J. R. Valdez, L., H. M. De los Santos, P., P. Hernández, De la R., A. Gómez, G., and A. Velásquez, M. 2005. Carbon storage in managed *Pinus patula* forest in central Mexico. The International Forestry review 7: 294.
- Arredondo S., F. M y J. J. Návar, C. 2012. Estimación de densidad de madera en arboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. Madera y bosque 18: 77-88
- Bojórquez T., L. A., H. De la Cueva., S. Díaz., D. Melgarejo, G. Alcantar, J. Solares M., G. Grobet and G. Cruz, B. 2004. Environmental conflicts and nature reserves: Redesigning Sierra San Pedro Mártir National Park, Mexico. Biological Conservation 117: 111-126.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forest. A forest resources assessment publication FAO nº 134. Roma. 55 p
- Brown, S. and E. Lugo. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. Science 223:1290–1293.
- Brown, S., A. J. R. Gillespie., and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forest Science 35: 381–902.

- Caballero, M., S. Lozano y B. Ortega. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. Universidad Autónoma de México (UNAM) 8: 1-12.
- Cantú, C. J. M. Scott and R.G. Wright. 2004. The Gap Analysis Program on the assessment of nature reserves of México. Gap Analysis Bulletin 10: 8-11.
- Castañeda G., J. C., A. Gallegos, R., M. Sánchez, D y P. A. Domínguez, C. 2012. Biomasa aérea y posibles emisiones de CO² después de un incendio; caso del bosque "la primavera", Jalisco, México. Ra Ximhia, sociedad, cultura y desarrollo 1:1-15.
- Castellanos B., J. F. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento en rodales de *Pinus patula*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 66 p
- Ceballos, G. 2007. Conservation priorities for mammals in megadiverse Mexico: The efficiency of reserve networks. Ecological Applications 17: 569-578.
- Ceballos, G., E. Díaz, P., H. Espinoza., O. Flores, V., A. García., L. Martínez., E. Martínez, M., A. Navarro y L. Ochoa. 2009. Zonas críticas y de alto riesgo para la conservación de la biodiversidad de México, en capital natural de México. Estado de conservación y tendencia de cambio. México. CONABIO, México 2: 575-600.
- Climate Change Media Partnership (CCMP). 2009. Manual para la cobertura de REDD+. Panos Landon. 14 p.
- Collins M., G., F. R. Steiner and M. J. Rushman. 2001. Land-use suitability analysis in the United States: Historical development and promising technological achievements. Environmental management 28: 611-621.
- Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENA). 2000. Actualización del Programa de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal. 133 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2010. Visión de México sobre REDD+ hacia una estrategia nacional forestal, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 57 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2011. Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 50 p.
- Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, A.C. (CCMSS). 2009. Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+) en México. Nota informativa número 24. 5 p.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). 2007. Unidas por el clima. Guía de la conservación sobre el cambio climático y el protocolo de Kyoto. 39 p.
- Domínguez C., G., O. A. Aguirre, C., J. Jiménez, P., R. Rodríguez, L. y J. A. Díaz, B. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en

- bosques del sur de Nuevo León. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y el Ambiente 1: 59-64.
- Eastman R., J. 2009. IDRISI Taiga. Guide to GIS and image processing. Clark Labs, Worcester, MA. USA. 290 p
- Elvira Q., J. R. 2010. Cambio climático y la legislación en México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 21 p.
- Figuroa N., C. M. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el ejido La mojonera Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 72 p.
- Fonseca G., W., F. Alice, G. y J. M. Rey, B. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. Bosque 30: 36-47.
- García V., M. A. y N. Lagares, D. 2011. ¿Zonas prioritarias o acciones prioritarias? Desde que perspectiva una zona prioritaria lo es para cualquier tipo de acción de ayuda al desarrollo. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales. Universidad de Santiago de Compostela. X congreso AECPA. 33 p.
- Goche T., J. R. 1999. Perfiles de variación en el árbol, de la longitud de traqueidas, densidad básica, contenido de humedad, contracciones volumétricas y lineales, de la madera de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl Et Cham y *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 99 p.
- Goche T., J. R., M. Fuentes, S., A. Borja, De la R. y H. Ramírez, M. 2000. Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*. Chapingo ciencias forestales y del ambiente 6: 83-92
- Honorato S., J. A. y M. E. Fuentes, L. 2001. Propiedades físico- mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato. Ciencias forestales en México 26: 5-28.
- Houghton R., A., J. L. Hackler., and K.T. Lawrence. 1999. The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change. Science 285: 574-577.
- Husch, B. 2001. Estimación de contenido de carbono de los bosques. INFORA. Chile. 9 p.
- Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA). 2012. Potencial de servicios ambientales en la propiedad social en México. México. 103 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html> (5 enero del 2014).
- Laclau, P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cipress forests in Northwestern Patagonia. Forest Ecology and Management 180: 317-333.

- Lasso C., A., A. Rial, B., C. L. Matallana., W. Ramírez, J., C. S. Señaris., A. Díaz, P., G. Corzo y A. Machado, A. 2011. Biodiversidad de la cuenca del Orinoco. Áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 304 p.
- Lazcano H., I y M. Zepeda, B. 2003. Estimación de secuestro de carbono para cuatro coníferas en la región de Chignahuapan, Puebla. División de ciencias forestales. UACH, Chapingo, México. 28 p.
- Masera O., B. de Jong. y I. Ricalde. 2000. Consolidación de la oficina mexicana para la mitigación de gases de efecto invernadero. Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México-ECOSUR. 197 p.
- Morgan, L., S. Maxwell., F. Tsao., A. C. Wilkinson, T. and P. Etnoyer. 2005. Marine priority conservation areas: Baja California to the Bering Sea. Commission for Environmental Cooperation of North America and the Marine Conservation Biology Institute. Montreal. 125 p.
- Murillo, D., I. Ortega., J. D. Carrillo., A. Pardo y J, Rendón. 2012. Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. Ing.USBMed 1: 62-68.
- Ordoñez B., J. A. y O. Masera. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. Madera y bosque 7: 3-12.
- Ordoñez D., J. A. 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. Ciencias 90:37-42
- Ordoñez J., A. 2004. Índices de contenido y captura de carbono en áreas forestales. http://www.ine.gob.mx/descargas/djipea/fuente_datos.pdf.
- Organización de la Naciones Unidas (ONU). 1998. Protocolo de Kyoto de la convención de las naciones unidas sobre el cambio climático. ONU. 24 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2006. La FAO, los bosques y el cambio climático. Trabajando con los países para hacer frente al cambio climático por medio de la gestión forestal sostenible. FAO. 20p.
- Pacheco E., F. C., A. Aldrete., A. Gómez, G., A. Fierros, G., V. M. Cetina, A. y H. Vaquera, H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. Fitotecnia Mexicana 30: 251-254.
- Pardos J., A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto de Investigación y tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Ciencia e Innovación. INIA 2010. 252 p.
- Raev, I., U. Asan and O. Grozev. 1997. Acumulación de CO₂ en la parte aérea de la biomasa de los bosques de Turquía y Bulgaria, en las últimas décadas in memorias XI Congreso Forestal Mundial. Antalya, Turquía 1: 123-130.
- Riemann, H. and E. Ezcurra. 2005. Plant endemism and natural protected areas in the Peninsula of Baja California, Mexico. Biological Conservation 122: 141-150.

- Ruiz P., R. 2011. Los bosques y su efecto sumidero de carbono. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. 62 p.
- Saavedra, Z., L. Ojeda y R. F. López, B. 2011. Identification of threatened areas of environmental value in the conservation area of Mexico city, and setting priorities for their protection. *Investigaciones geográficas* 74: 19- 34
- Schulze E., D., Ch. Wirth and M. Heimann. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science (Washington)*. 289: 2058-2059.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE). 2010. Emisiones de gases de efecto invernadero. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/clave_2010/clave/indicadores/ibi_apps/archivos/clave_07.pdf (7 de febrero del 2014).
- Secretaría del medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT) y Secretaría de recursos naturales y medio ambiente (SRNyMA). 2009. Estudio de diagnóstico para el ordenamiento ecológico del municipio de Gómez Palacio, SEMARNAT-SRNyMA. Durango. 71 p.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE), Petróleos Mexicanos (PEMEX). 2008. Ordenamiento Ecológico región cuenca del río Burgos. Resumen ejecutivo. SEMARNAT, INE, PEMEX. 135 p.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2010. Cambio climático. <http://www.cambioclimatico.gob.mx/index.php/es/los-temas-clave-de-la-negociacion.html>.
- Secretaría del Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SMRN). 2007. Diagnóstico socioeconómico y de manejo forestal unidad de manejo forestal, Zacatlán. Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan - Zacatlán. A.C, 281 p.
- Silva A., F. M. y J. J. Návar, Ch. 2010. Factor de expansión de biomasa en comunidades templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1: 55- 62.
- Vargas G., A., S. Aguilar, M., M. A. Castillo, S., M. A. Esquivel, B., M. A. Hernández, V., A. M. López, G. y S. Quechulpa, M. 2009. Programa estatal para la compensación por servicios ecosistémicos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 58 p.
- Zambrano, A., F. Franqui y A. Infante. 2004. Emisión y Captura de Carbono en los Suelos en Ecosistemas Forestales. *Revista Forestal Latina* 35: 1-10.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES GENERALES

4.1 Conclusiones, implicaciones y recomendaciones

El crecimiento desordenado de los municipios en México genera problemas ambientales y sociales a diferentes escalas espaciales, trayendo como consecuencia la fragmentación de ecosistemas y la desertificación a causa del cambio de uso de suelo (Rosete *et al.*, 2008; Evangelista *et al.*, 2010). Por ejemplo, en México la degradación y deforestación de los bosques es la tercera fuente de emisiones de CO₂ con un 12.4% del total emitido en el país. De acuerdo a estos datos, México se encuentra dentro de los 25 países con mayor población, PIB y emisiones de CO₂ por quema de combustibles fósiles, contribuyendo con alrededor del 1.6% de las emisiones a nivel mundial de gas de efecto invernadero (GEI) (SEMARNAT, 2010).

En los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla ha existido un crecimiento urbano sin planificación adecuada, favoreciendo la deforestación y degradación de los ecosistemas (SMRN, 2007). Algunas causas incluyen: la obtención de leña para actividades domésticas de manera clandestina, tala clandestina comercial, apertura de caminos y áreas arboladas para cultivos agrícolas, afectando la producción de bienes y servicios ambientales (FAO 2000; SEMARNAT, 2012). Por lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo ajustar y aplicar un modelo que explique las posibles causas que provocan el proceso de cambio de uso del suelo y deforestación en el área de estudio, con la finalidad de identificar áreas prioritarias de carbono considerando riesgos de deforestación y con ello contribuir a definir estrategias de política que permitan la conservación de los recursos forestales.

El estudio se integró de cuatro capítulos: (I) Caracterización de los municipios de Chignahuapan–Zacatlán, Puebla y herramientas de planificación del territorio; (II) Modelando la deforestación en dos escalas espaciales; (III) Áreas prioritarias para captura de carbono; y (IV) Conclusiones generales.

El Capítulo I se realizó con la finalidad de mostrar una descripción general de la investigación; dicho capítulo contiene un diagnóstico de las características

biofísicas, socioeconómicas y una descripción del desarrollo histórico poblacional de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla, además de una revisión sobre las herramientas de planificación, definiendo una serie de conceptos relacionados a la planificación del territorio.

Dentro de la información se encontró que los municipios de Chignahuapan y Zacatlán tuvieron un crecimiento acelerado a partir de 1930. Éste se presentó de manera desordenada teniendo asentamientos a orillas de ríos, arroyos y en zonas con pendientes pronunciadas. Como consecuencia a este crecimiento, se observan ecosistemas fragmentados favoreciendo desastres naturales como deslaves, inundaciones y pérdida de biodiversidad (INEGI, 1900-1930; SMRN, 2007; Puga, 2008 y SNIM, 1990-2010). Para poder contrarrestar el problema de la degradación de los recursos naturales y vulnerabilidad de la población, surge la necesidad de incorporar técnicas de planeación de los recursos naturales, el cambio de uso de suelo y deforestación (INE, 2006; CONDESAN, 2007).

En México se adoptó al ordenamiento territorial como un instrumento de planificación ya que tiene por objetivo frenar la expansión poblacional desordenada evaluando de manera sistemática el potencial de los recursos naturales (FAO, 1993 y SEDESOL, 2009). Después de identificar el potencial de los recursos naturales, se definen las áreas prioritarias de conservación en la existencia de una alta biodiversidad, características únicas del área y la capacidad para captura de carbono, incorporando amenazas antropogénicas (riesgo de deforestación) y oportunidades para la conservación (Collins *et al.*, 2001; Morgan *et al.*, 2005).

En el Capítulo II se determinó el cambio de uso de la tierra a escala regional y municipal (Chignahuapan y Zacatlán) en un periodo de 25 años (1986, 2011), se determinó la probabilidad de cambios de usos del suelo forestal considerando factores socioeconómicos y biofísicos. Con base en esta información y la proyección del crecimiento poblacional se estimó espacialmente las áreas con riesgo de deforestación futura.

Los resultados de cambios de uso de suelo forestal a nivel regional indican ganancias de 13, 231.8 ha (22.9%) por cambios de ocupación, cabe indicar que es necesario atender el proceso de deforestación ya que se registró la pérdida del 13.12% (7, 570. 9) del territorio forestal. Por su parte, al considerar los resultados a

escala municipal se observa la misma tendencia en relación a los cambios ocurridos a nivel regional. Por tanto, para el municipio de Chignahuapan se identificaron 3,309 ha (11.16%) con cambios de ocupación de forestal a uso pecuario, agrícola y residencial, por su parte en Zacatlán se reportaron 4,261 ha (16%) de la superficie deforestada por actividades agrícolas pecuarias y residenciales. Estos datos indican que existió mayor pérdida de la cubierta forestal en el municipio de Zacatlán, principalmente en áreas con tenencia privada. Lo anterior debido a la falta de estrategias y proyectos dirigidos a los pequeños propietarios, propiciando la fragmentación de los ecosistemas tanto a escala regional como municipal. Por otro lado, se obtuvo que las variables que más influyen en el proceso de deforestación a nivel regional y municipal son: Altitud, pendiente, distancia a límites agrícolas y zonas de pastizales.

Asimismo, se determinó que la superficie con probabilidad de cambios de uso de forestal a otro uso depende de la escala del modelo y las variables incluidas. Por tanto, a nivel regional se consideraron 21 variables significativas obteniendo probabilidades de 45 a 90% de que una hectárea de uso forestal cambie a uso agrícola, del 50% que cambie a uso pecuario y una probabilidad mínima del 5% de cambio hacia el uso residencial. Por su parte los modelos municipales consideraron 16 variables significativas para Chignahuapan y 21 para Zacatlán. Los dos modelos coinciden que el cambio de uso forestal-agrícola presenta mayor probabilidad en el proceso de deforestación con 99% mientras que el uso pecuario y urbano consideran probabilidades del 50% de cambio.

Finalmente, el riesgo de deforestación a nivel regional estimó 13,063.8 ha, a nivel municipal se estimaron 10,966.6 ha para Chignahuapan y 4,405.5 ha en Zacatlán, identificando que el análisis escalar es una herramienta útil para la generación de estrategias respecto al aprovechamiento de los recursos naturales y forestales

En el Capítulo III se cuantificó el carbono equivalente en los predios bajo manejo forestal en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Puebla; dicha información se obtuvo utilizando información existente de los inventarios forestales que se encuentran dentro de programas de manejo forestal, con la finalidad de obtener la aptitud de carbono en el área estudiada. La delimitación de áreas prioritarias de

captura de carbono se realizó mediante álgebra de mapas utilizando la aptitud de carbono y riesgo de deforestación.

El municipio de Chignahuapan reportó mayor aptitud de captura de carbono con 3,480 ha de bosque con aptitud alta; sin embargo, a pesar de que el uso forestal en el municipio de Zacatlán cubre la mayor superficie territorial, se reportaron únicamente 3,188 ha de aptitud alta para la captura de carbono. Cabe mencionar que dichos municipios tienen gran potencial de captura de carbono distribuido en el territorio forestal.

Los datos de aptitud de captura de carbono combinados con los resultados de riesgo de deforestación determinaron que en el municipio Chignahuapan se concentran 628 ha y en Zacatlán 310 ha catalogadas como áreas de prioridad alta de conservación para captura de carbono. Dicha información indica que es necesario realizar un ordenamiento territorial e incluir pagos por servicios ambientales en los municipios estudiados.

Los resultados de este estudio proporcionan información y conocimiento valiosos para generar y aplicar políticas públicas que permitan reducir la deforestación y conservar las áreas prioritarias de captura de carbono en los municipios estudiados con la finalidad de mantener e incrementar los bienes y servicios que ellas producen en beneficio de las generaciones actuales y futuras.

4.2 Fortalezas y debilidades

Fortalezas

En esta investigación fue importante considerar la calidad de los datos utilizados, por tanto fue necesario realizar diversas clasificaciones y correcciones de las imágenes de satélite, permitiendo disminuir las interferencias atmosféricas, correcciones de píxeles y distorsiones de la imagen. Además, fue de vital importancia tener información confiable de cambio de uso del suelo de los municipios Chignahuapan y Zacatlán ya que dicha información fue la base para determinar la zona forestal del área de estudio; además de que en el ajuste del modelo de riesgo de deforestación se consideró como variable dependiente el cambio del suelo.

Al considerar 21 variables biofísicas y socioeconómicas independientes que influyen en el proceso de deforestación, permite al modelo de riesgo de deforestación generar información confiable respecto a las variables que influyen de manera negativa en los cambios de forestal a pecuario, agrícola y residencial.

La información obtenida en esta investigación es confiable ya que se realizó a nivel regional y posteriormente a nivel municipal, además de considerar la hectárea como unidad básica de estudio la cual se consideró adecuada para la superficie estudiada.

La estimación de los reservorios de carbono en los municipios de Chignahuapan y Zacatlán se generó con información confiable ya que es el resultado de analizar áreas pequeñas que se encuentran bajo aprovechamientos forestales supervisados por la SEMARNAT.

La definición de áreas prioritarias de captura de carbono son una herramienta importante para los planificadores de los recursos naturales, ya que consideran amenazas antropogénicas (riesgo de deforestación) y características únicas de captura de carbono en el ecosistema forestal de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán.

Debilidades

El estudio presenta algunas debilidades, debido a que no se incluyen variables como: superficie dedicada a tala ilegal y aserraderos clandestinos debido a que no se cuenta con la información cartográfica disponible.

La metodología aplicada para determinar las áreas prioritarias de conservación de captura de carbono requiere conocimientos apropiados para su desarrollo, por tanto constituye una debilidad para la aplicación correcta de la metodología.

La delimitación de las áreas prioritarias de conservación de carbono no considera la muestra total de los predios bajo manejo forestal debido a la compleja recolección de información de los programas de manejo forestal; como consecuencia se obtuvieron áreas forestales sin información de carbono siendo necesario utilizar un método de extrapolación.

Los datos de captura de carbono aéreo subestiman el reservorio total de carbono a nivel de hectárea, ya que no se consideró el carbono capturado en las especies no comerciables (árboles con diámetros menores a 15 cm, hierbas, arbustos, estratos inferiores y suelo).

4.3 Recomendaciones para futuros trabajos

Durante el proceso de realización de esta investigación, se detectaron algunas posibilidades de futuras investigaciones. Por ejemplo, la delimitación de áreas prioritarias de conservación de flora y fauna (biodiversidad), ecoturismo, hidrológicos, belleza escénica con la finalidad de contar con la definición de áreas prioritarias para todos los servicios ambientales, debido a que se observó una gran riqueza de recursos naturales pero se está perdiendo por la fragmentación de los ecosistemas.

Es importante la realización de un ordenamiento ecológico comunitario considerando las escalas de estudio, con la finalidad de proponer diversas formas de utilización del territorio y recursos naturales bajo un enfoque racional con la finalidad de disminuir el proceso de deforestación. Otro aspecto importante a considerar es la generación de conocimientos en relación a las políticas ambientales y el impacto que han tenido en relación de la conservación de los recursos naturales, con la finalidad de apoyar en la toma de decisiones a nivel municipal.

Sería importante realizar un estudio económico futuro sobre el aprovechamiento forestal combinado con el pago de servicios ambientales con la finalidad de concientizar a los pobladores del valor real que los recursos naturales y forestales tienen en el área de estudio.

4.4 Literatura citada

Collins, M. G., F. R. Steiner and M. J. Rushman. 2001. Land-use suitability analysis in the United States: Historical development and promising technological achievements. *Environmental management* 28: 611-621.

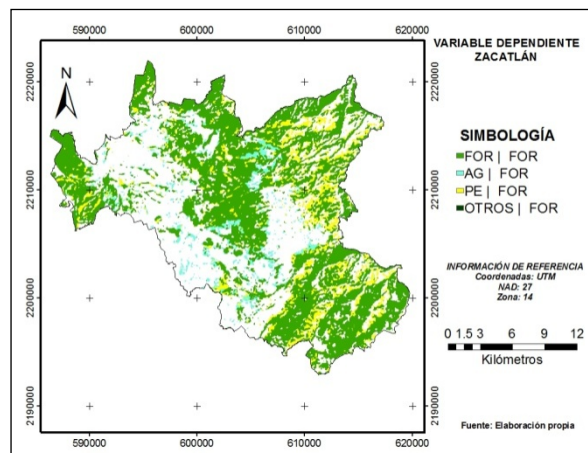
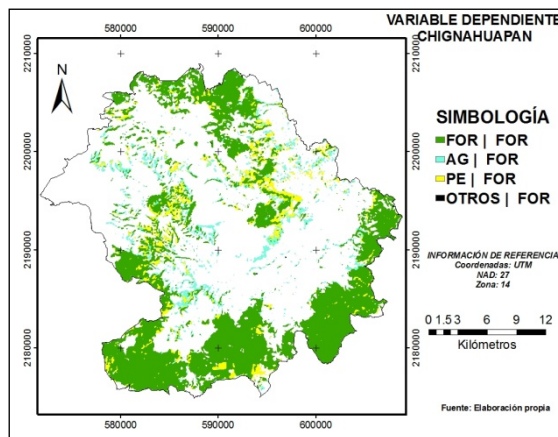
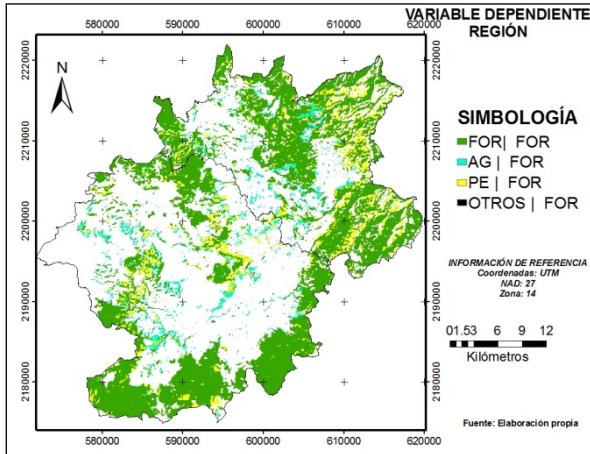
CONDESAN, 2007. Diálogos de políticas, ordenamiento territorial. Una herramienta para el desarrollo. 4 p

- 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.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2006. La investigación ambiental para la toma de decisiones. Instituto Nacional de Ecología 2001-2006. INE-SEMARNAT, México, 320 pp.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2010. Censo de la población y vivienda. Base de datos digital. En línea: <http://www.inegi.org.mx/>
- Morgan, L., S. Maxwell., F. Tsao., A.C. Wilkinson T. and P. Etnoyer. 2005. Marine priority conservation areas: Baja California to the Bering Sea. Commission for Environmental Cooperation of North America and the Marine Conservation Biology Institute. Montreal, 125 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 1993. Guidelines for land-use planning. FAO Development. Series 1. Rome, s.p.
- Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). (2000). Causas y tendencia de deforestación en América latina. <http://www.fao.org/docrep/007/ad680s/ad680s05.htm> (20 octubre del 2013).
- Puga, D. 2008. Crecimiento urbano desordenado: causas y consecuencias. Centre de Recerca en Economía Internacional (CREI), 29 p.
- Rosete, V. F.A., J. L. Pérez, D. y G. Bocco. 2007. Cambio de uso de suelo y vegetación en la península de Baja California, México. Investigaciones geográficas, boletín del instituto de geografía, UNAM 67: 39-58.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2009. La política de SEDESOL en materia de Ordenación Territorial. V Congreso Internacional de Ordenamiento Ecológico y Territorial. Morelia, Michoacán. 41 p
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2010. Cambio climático. <http://www.cambioclimatico.gob.mx/index.php/es/los-temas-clave-de-la-negociacion.html>.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2012. El ambiente en números. Edición. 2012.
- Secretaría del Medio Ambiente Y Recursos Naturales (SMRN). 2007. Diagnóstico socioeconómico y de manejo forestal unidad de manejo forestal, Zacatlán. Asociación Regional de Silvicultores Chignahuapan - Zacatlán. A.C, 281 p.
- Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM). 1990- 2010. <http://www.municipios-web.com.mx/informaci%C3%B3n-municipal/snim-inafed/>

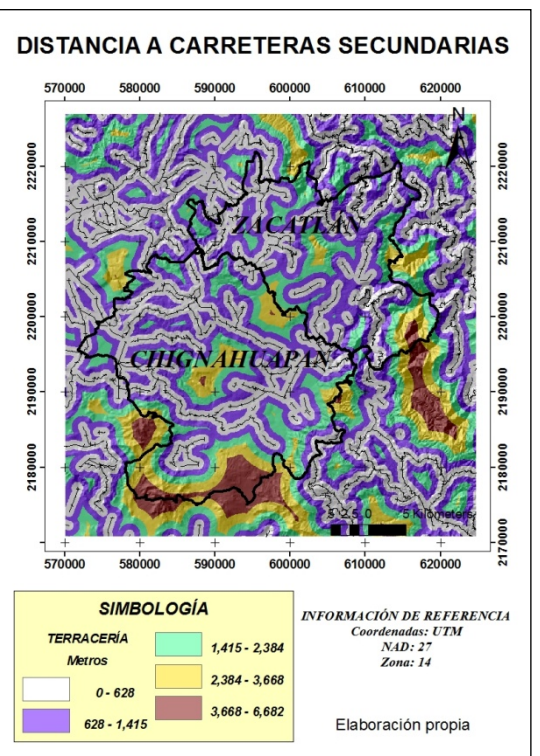
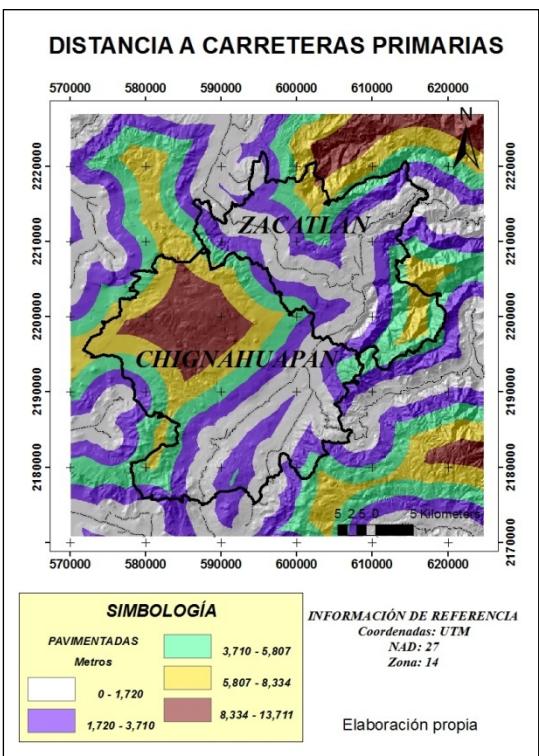
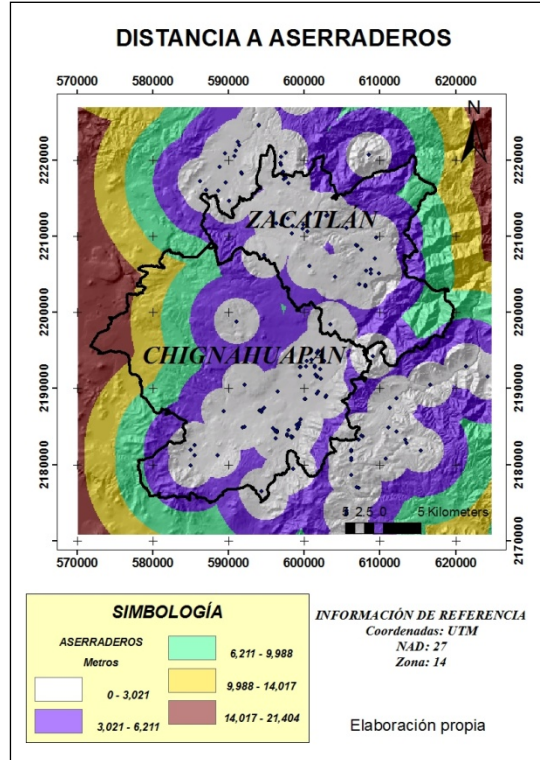
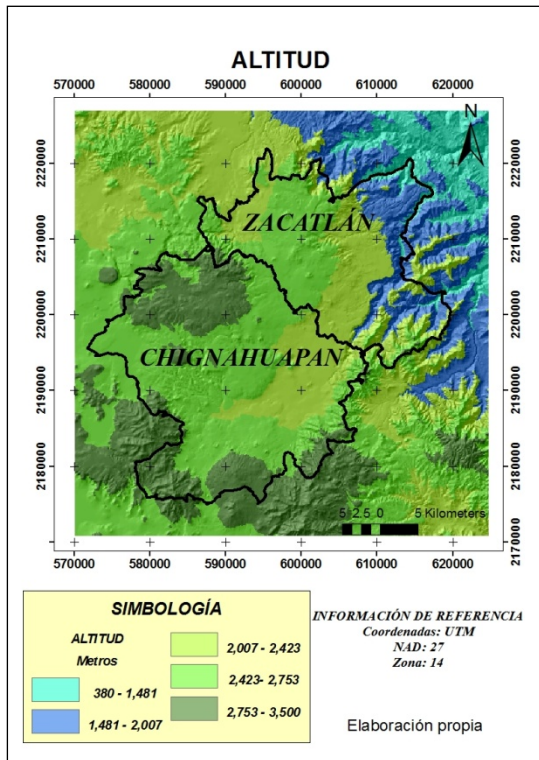
CAPÍTULO V

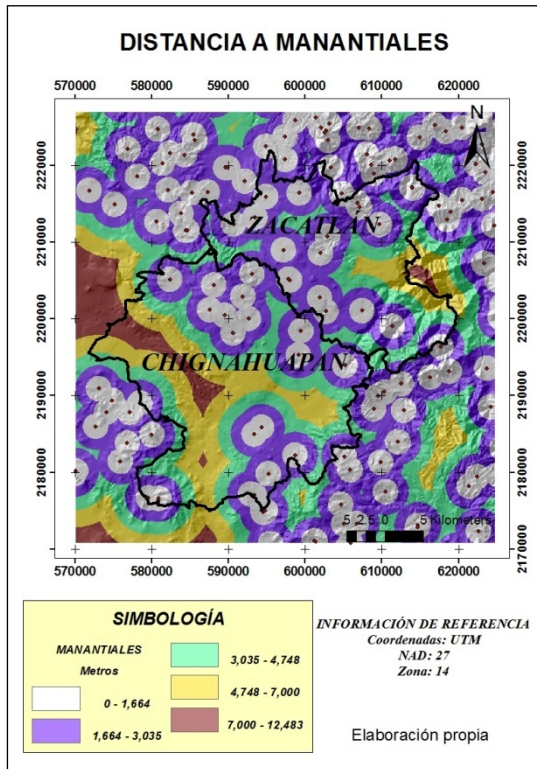
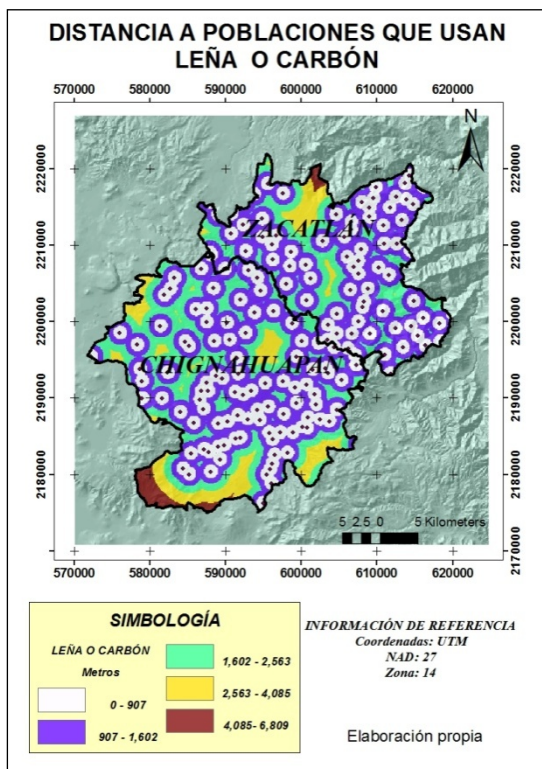
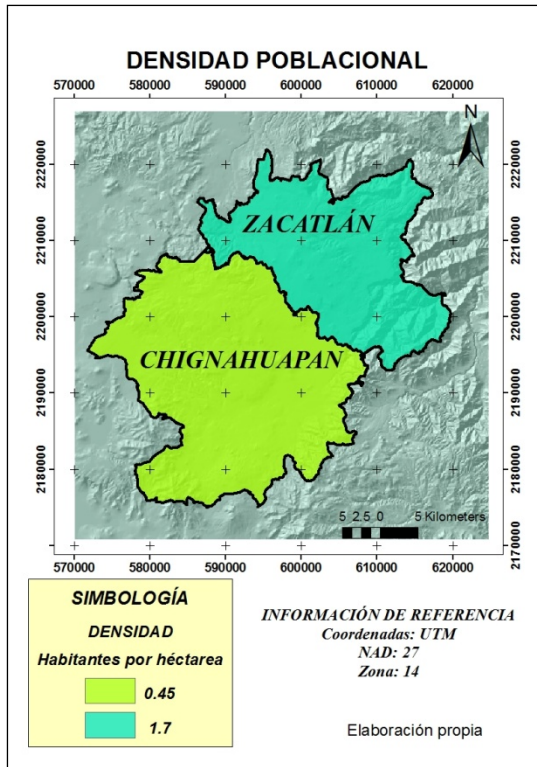
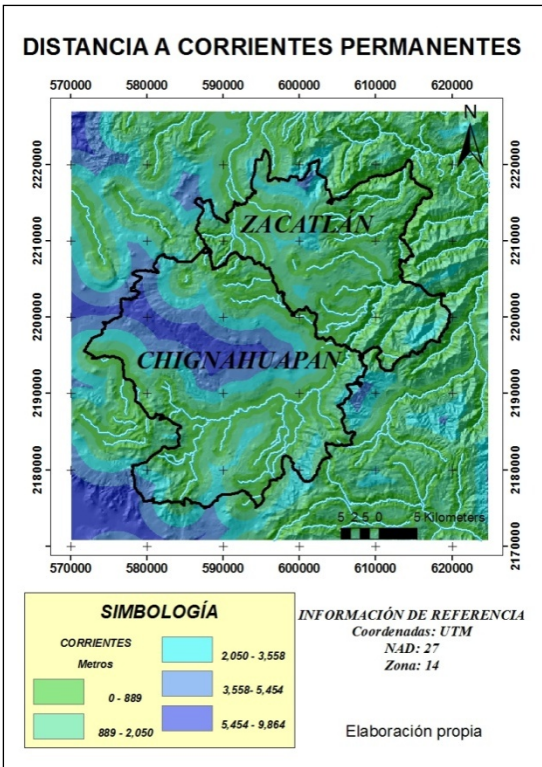
ANEXOS

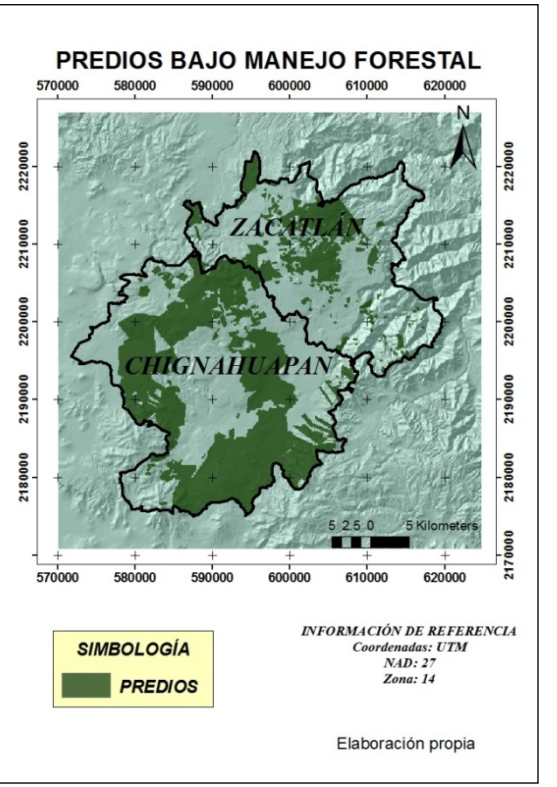
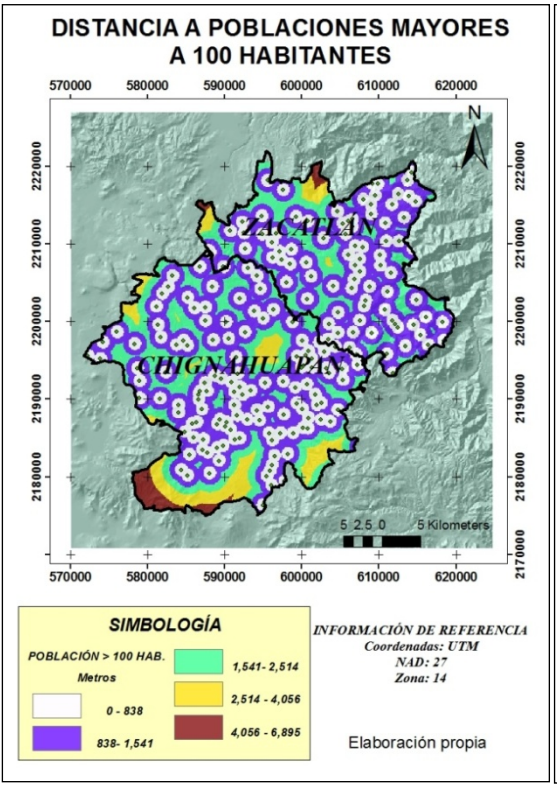
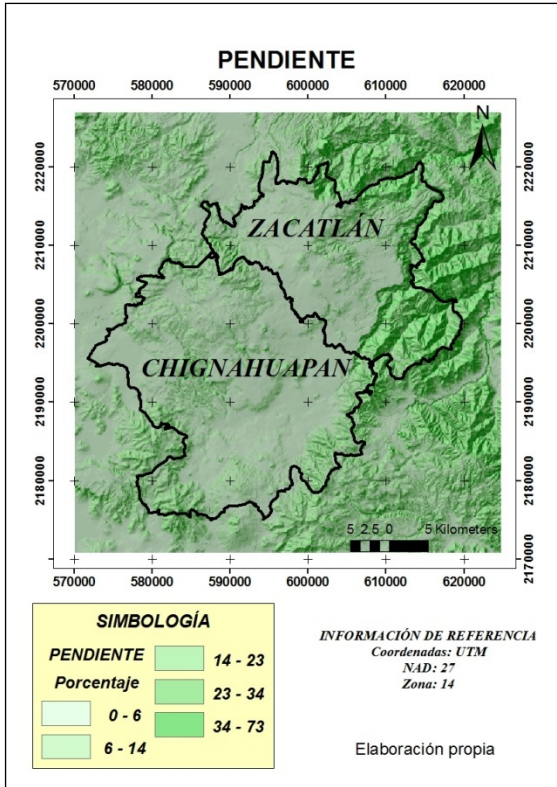
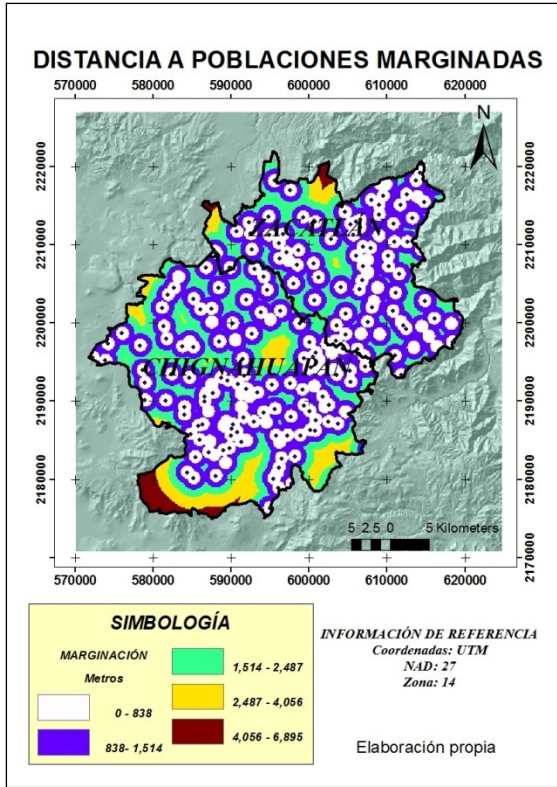
Anexo 2.1. Variable dependiente (cambio de uso del suelo de forestal a otros usos).

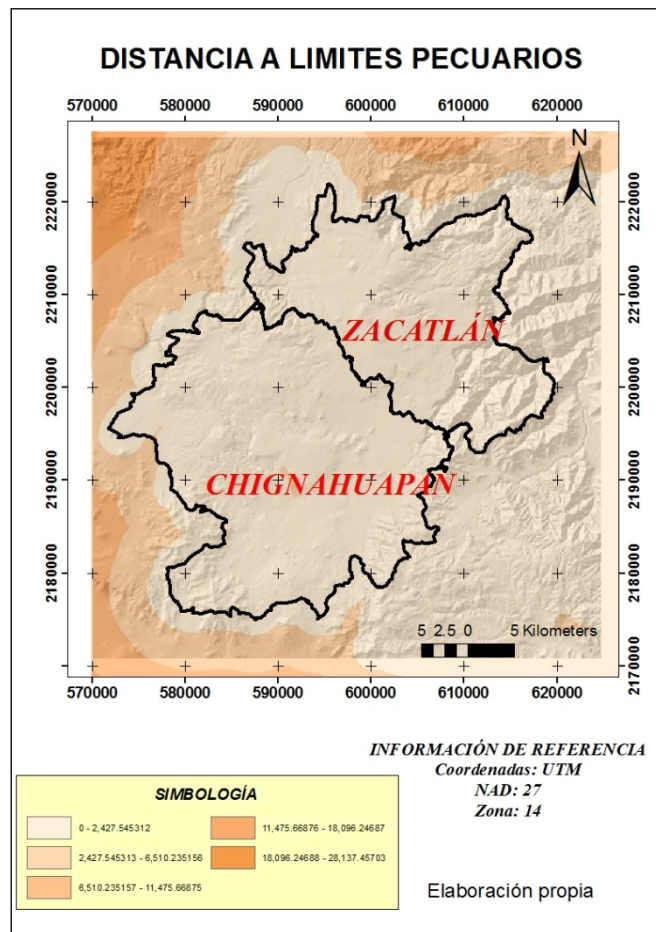
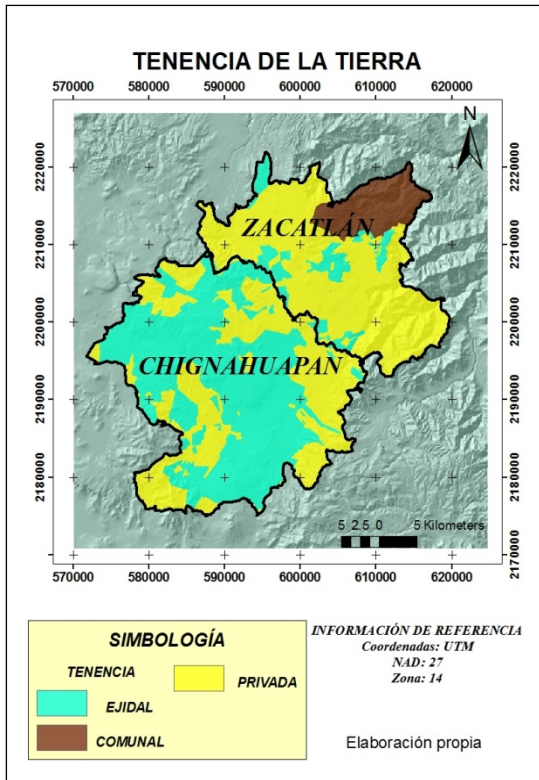


Anexo 2.2. Mapas de las variables independientes utilizadas en el estudio.









Anexos 2.3 Distribución de especies por predio analizada en Chignahuapan y Zacatlán, Puebla.

Municipio de Chignahuapan		
Predio	CO ₂ eq (ha ⁻¹ año ⁻¹)	Especies representativas
Quexnón	1	<i>P. patula</i> , <i>p. pseudostrobus</i> , <i>Quercus</i> spp y <i>P. teocote</i> .
Ejido Michac	22	<i>P. montezumae</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. teocote</i> , <i>Quercus</i> spp, Hojasas
Chichicaxtla	12	<i>P. patula</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>P. ayacahuite</i>
Ejido Villa Cuauhtémoc	26	<i>P. montezumae</i> , <i>P. greggii</i> , <i>P. ayacahuite</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. teocote</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp, Hojasas
Ejido Ocojala	6	<i>P. patula</i> , <i>P pseudostrubus</i> , <i>P teocote</i> , <i>A religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp
Ejido Ocojala predio	6	<i>P pseudotrobus</i> , <i>P teocote</i> , <i>A religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp
Ejido San José Corral Blanco	16	<i>Abies religiosa</i> , <i>Pinus</i> spp, <i>Quercus</i> spp
La Luz	8	<i>Pinus</i> spp, <i>Quercus</i> spp
Ejido Llano Grande	7	<i>P. patula</i> , <i>P. montezume</i> , <i>P. teocote</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp, <i>Alnus</i> sp, <i>P. ayacahite</i>
Piedra Ancha	22	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>P. rudis</i> , <i>Quercus</i> spp, Hojasas
La Gloria	6	<i>P. teocote</i> , <i>P. pseodostrobus</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. patula</i> , <i>Quercus</i> spp
Rancho de Cuautelolulco	10	<i>P. teocote</i> , <i>A religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp, <i>Alnus</i> sp.
Innominado	6	<i>P patula</i> , <i>P ayacahuite</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp
Ejido Acopinalco	13	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. ayacahite</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp
Ejido Cruz Colorada	19	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. ayacahite</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp, <i>P. leiophylla</i> , <i>P. pseodostrobus</i> , Hojasas
Tecoyuca	13	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. ayacahite</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp, <i>P. leiophylla</i> , <i>P. pseodostrobus</i> , Hojasas
Ejido Las Mesas	23	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>Abies religiosa</i> , <i>P. ayacahite</i> , <i>Quercus</i> spp
Ejido Chignahuapan	12	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. rudis</i> , <i>Quercus</i> spp
Ejido Acolihua	18	<i>P. patula</i> , <i>P ayacahuite</i> , <i>Abies religiosa</i>
Rancho Ayotla	5	<i>Pinus</i> spp, <i>Quercus</i> spp
ejido San Claudio	20	<i>Pinus</i> spp, <i>Quercus</i> spp, Hojasas
Ejido San Luis del Valle	10	<i>P. teocote</i> , <i>P. rudis</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P.patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>Quercus</i> spp, Hojasas

Ejido San José Atzintlimeya	30	<i>P. patula, P. teocote, P. rudis, P. ayacahite, Abies religiosa, Quercus spp, P. leiophylla, P. pseudostrobus</i>
-----------------------------	----	---

Municipio de Zacatlán		
Predio	CO ₂ eq (ha ⁻¹ año ⁻¹)	Especies representativas
El Monte	4.29	Hojosas, <i>Pinus</i> spp.
Metlaxixtla	4.29	<i>Quercus</i> spp., <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. teocote</i>
Milman	1.95	<i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i>
Rancho Milman 2 ^a Fracción	1.95	<i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i>
Milman 3 ^a Fracción	14.55	<i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i>
Milman Innominado	3.93	<i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i>
Yehuala	3.93	<i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp. <i>Pinus</i> spp
Xochitlmani	11.55	<i>Quercus</i> spp, <i>Abies religiosa</i> , Hojosas, <i>Pinus</i> spp
Martinajco y amanalco	11.55	<i>Pinus</i> spp.
Innominado en Atotonilco	11.55	<i>Quercus</i> spp. <i>Abies religiosa</i> . Hojosas, <i>Pinus</i> spp
Cerro Tezontle	18.98	<i>Quercus</i> spp. <i>Abies religiosa</i> , <i>Alnus</i> sp
Cerro del Tezontle	7.04	<i>Quercus</i> spp, <i>P. patula</i> , <i>Alnus</i> sp
Huehuetecaco	7.04	<i>Quercus</i> spp, <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i>
Gracianola	19.76	<i>Quercus</i> spp, <i>Pinus</i> spp
Ejido Poxcuatzingo	24.65	<i>Quercus</i> spp, <i>Pinus</i> spp
Santiago Tlalixtlipa	38.83	<i>P. patula</i>
Icatitla	19.84	<i>Quercus</i> spp, <i>Pinus</i> spp, Hojosas
Ejido Tuliman Fracción	15.28	<i>Quercus</i> spp, <i>Pinus</i> spp, Hojosas
Ahuazotepec	13.80	<i>Quercus</i> spp, <i>Pinus</i> spp, <i>Alnus</i> sp
Ejido Cuautlulco	2.98	<i>Quercus</i> spp, <i>Pinus</i> spp, Hojosas
El jaral	4.49	<i>Abies religiosa</i> , <i>Quercus</i> spp, <i>P. teocote</i> <i>Alnus</i> sp
El Rincón	6.86	<i>P. patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i>
Xalpancingo	4.08	<i>P. pseudostrobus</i> <i>P. patula</i> , <i>Quercus</i> spp
Ejido Ocojala	20.18	<i>Quercus</i> spp, <i>Abies religiosa</i> . Hojosas, <i>Pinus</i> spp <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. teocote</i> , <i>Quercus</i> spp, <i>Abies religiosa</i>
Nanacamila	5.78	<i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. rudis</i> , <i>Quercus</i> spp, Hojosas
San Antonio Buenavista	7.30	<i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. ayacahuite</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>Quercus</i> spp, Hojosas
Metepéc	15.89	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. leiophylla</i> , <i>P. rudis</i>
	23.12	

Anexo 2.4 Localización espacial de los predios anizados en los municipios de Chighanuapan y Zacatlán

