

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



**MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS GEOMÁTICAS EN
UNA PORCIÓN DE LA REGIÓN CENTRO-NORTE DE MÉXICO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

**DOCTOR EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

PRESENTA

M.C. LILIANA MIRANDA ARAGÓN

LINARES, N.L.

ENERO, 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS
GEOMÁTICAS EN UNA PORCIÓN DE LA REGIÓN
CENTRO-NORTE DE MÉXICO

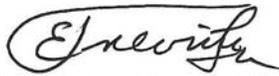
TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

PRESENTA

M.C. LILIANA MIRANDA ARAGÓN

COMITÉ DE TESIS



DR. EDUARDO JAVIER TREVIÑO GARZA
DIRECTOR



DR. JAVIER JIMÉNEZ PÉREZ
ASESOR



DR. OSCAR ALBERTO AGUIRRE CALDERÓN
ASESOR



DR. MARCO AURELIO GONZÁLEZ TAGLE
ASESOR



DR. MARÍN POMPA GARCÍA
DIRECTOR EXTERNO

Manifiesto que la presente investigación es original y fue desarrollada para obtener el grado de Doctor en Ciencias con Especialidad en Manejo de Recursos Naturales. Donde se utiliza información de otros autores se otorgan los créditos correspondientes.

Liliana Miranda Aragón
Enero de 2013

TABLA DE CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMEN	vii
SUMMARY	viii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	
1.1. Presentación.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Particulares.....	4
1.3. Hipótesis.....	5
1.4. Revisión de Literatura.....	6
1.4.1. Ciencia del Uso del Suelo.....	6
1.4.2. Cambios en el Uso del Suelo.....	7
1.4.3. Aspectos Generales de la Deforestación.....	8
1.4.4. Monitoreo del Cambio de Uso del Suelo.....	9
1.4.4.1. Mapeo de la Vegetación y Uso del Suelo.....	10
1.4.4.2. Detección y Mapeo del Cambio de Uso del Suelo.....	12
1.4.5. Determinación de la Aptitud del Uso del Suelo.....	13
1.4.5.1. Métodos Multicriterio.....	13
1.4.5.2. Métodos Multiobjetivo.....	15
1.4.5.3. Otros Métodos de Análisis Multicriterio.....	15
1.5. Conclusiones.....	16
1.6. Literatura Citada.....	17
CAPÍTULO II. ANÁLISIS DE LA DEFORESTACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE COMPARACIÓN CARTOGRÁFICA	
RESUMEN	24

ABSTRACT	25
2.1 Introducción.....	26
2.2 Materiales y Métodos.....	28
2.2.1. Área de Estudio.....	28
2.2.2. Materiales.....	29
2.2.3. Validación de las Series de Vegetación.....	29
2.2.4. Procesamiento de la Información.....	29
2.2.5. Análisis de Cambio.....	31
2.2.6. Mapa de Cambio.....	31
2.3. Resultados y Discusión.....	32
2.3.1. Validación de las Series.....	32
2.3.2. Tipos de Vegetación y Uso del Suelo.....	33
2.3.3. Análisis de Cambio.....	34
2.3.3.1. A Nivel Estatal.....	34
2.3.3.2. A Nivel Zona Biogeográfica.....	36
2.3.3.3. Degradación/Deforestación.....	38
2.4. Conclusiones.....	42
2.5. Literatura Citada.....	43

CAPÍTULO III. MONITOREO INTERANUAL DEL NDVI MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN SERIES DE TIEMPO Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN ANUAL: 2000-2010

RESUMEN	46
ABSTRACT	47
3.1. Introducción.....	48
3.2. Materiales y Métodos.....	49
3.2.1. Área de Estudio.....	49
3.2.2. Datos Espectrales.....	50
3.2.3. Métodos.....	51
3.3. Resultados y Discusión.....	54
3.3.1. Monitoreo Interanual del NDVI.....	54

3.3.2.	Análisis de Componentes Principales.....	56
3.3.3.	Relación Precipitación-NDVI.....	58
3.3.4.	Variación Intra-anual del NDVI.....	59
3.4.	Conclusiones.....	61
3.5.	Literatura Citada.....	62

CAPÍTULO IV. SUSCEPTIBILIDAD DE DEFORESTACIÓN EN ECOSISTEMAS ÁRIDOS, TEMPLADOS Y TROPICALES REMANENTES DEL CENTRO NORTE DE MÉXICO

RESUMEN	66
ABSTRACT	67
4.1.	Introducción.....	68
4.2.	Materiales y Métodos.....	70
4.2.1.	Área de Estudio.....	70
4.2.2.	Colección de Datos.....	71
4.2.3.	Análisis de la Información.....	73
4.3.	Resultados y Discusión.....	75
4.3.1.	Autocorrelación Espacial.....	75
4.3.2.	Selección de Variables.....	76
4.3.3.	Ajuste y Validación.....	80
4.3.4.	Estimación de la Susceptibilidad de Deforestación.....	82
4.3.5.	Alternativas de Acción.....	84
4.4.	Conclusiones.....	84
4.5.	Literatura Citada.....	86

CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN

90

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla 2.1.	Leyenda jerárquica de uso del suelo 1993 y 2007.....	30
Tabla 2.2.	Matriz de cambio de uso del suelo (ha) para la serie II (1993) y serie IV (2007) en San Luis Potosí.....	35
Tabla 2.3.	Áreas de cada clase temática por zona biogeográfica para cada fecha de análisis.....	37
Tabla 2.4.	Cambio total en vegetaciones arboladas y tasa de deforestación anual por zona biogeográfica.....	38

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1.	Variables independientes usadas.....	73
Tabla 4.2.	Coefficientes de los modelos de regresión logística.....	77

LISTA DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO II

Figura 2.1.	Ubicación del área de estudio.....	28
Figura 2.2.	Mapa de vegetación y uso anterior del suelo. A) Serie II (1993) y B) IV (2007).....	33
Figura 2.3.	Porcentaje de área por cada tipo de vegetación y uso del suelo para las fechas de análisis.....	35
Figura 2.4.	Mapa de cambio de uso del suelo. 1. Altiplano, 2. Centro, 3. Media y 4. Huasteca.....	40

CAPÍTULO III

Figura 3.1.	Ubicación del área de estudio. A) San Luis Potosí, México. B) Imagen de satélite MODIS MCD43A4.....	50
Figura 3.2.	Diagrama de flujo de la metodología empleada en el análisis de la serie de tiempo.....	53
Figura 3.3.	Imágenes de Máximo NDVI anual usando la técnica de Máximo Valor Compuesto para el área de estudio.....	55
Figura 3.4.	Primer y segundo componente principal de la serie de tiempo 2000-2010.....	57
Figura 3.5.	Cargas de los primeros dos componentes respecto a las imágenes anuales. A) Primer componente B) Segundo componente.....	57
Figura 3.6.	Relación entre NDVI máximo anual y precipitación.....	58
Figura 3.7.	Perfil de la precipitación promedio observada y NDVI promedio.....	59
Figura 3.8.	Perfil temporal del NDVI promedio de la serie de tiempo completa.....	60
Figura 3.9.	Perfil temporal del NDVI promedio de la serie de tiempo por año.....	61

CAPÍTULO IV

Página

Figura 4.1.	A) Localización del área de estudio y zonas biogeográficas y B) formaciones vegetales.....	71
Figura 4.2.	Coeficientes estandarizados que indican la importancia de cada variable en el modelo obtenido...	76
Figura 4.3.	Efectos parciales de las cuatro variables significativas más importantes del modelo General en la susceptibilidad de deforestación.....	78
Figura 4.4.	Curva ROC. A) y B) modelos construidos, C) Modelo ideal adaptado de Hamel (2008) y D) AUC obtenida para cada validación (10-fold cross validation).....	81
Figura 4.5.	Susceptibilidad de deforestación obtenida con el modelo General.....	83
Figura 4.6.	Susceptibilidad de deforestación uniendo las estimaciones de modelos obtenidos por zona biogeográfica.....	83
Figura 4.7.	Niveles de susceptibilidad de deforestación en el área de estudio.....	83

RESUMEN

Liliana Miranda Aragón

Fecha de graduación: Enero de 2013

**Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Forestales**

Título del estudio: Monitoreo de la deforestación en una porción del centro norte de México mediante técnicas geomáticas

Número de páginas: 92

**Candidata a Doctor en Ciencias con
Especialidad en Manejo de Recursos
Naturales**

Área de estudio: Geomática Aplicada al Manejo de Recursos Naturales

Propósitos y Métodos de Estudio: Se presenta un marco metodológico para el monitoreo espaciotemporal de la vegetación mediante información geoespacial para una porción del centro norte de México: San Luis Potosí, México. Se emplearon técnicas de análisis espacial, modelación estadística y procesamiento de imágenes de satélite.

Contribución y Conclusiones: El Capítulo 1 presenta un estado general de la ciencia del uso del suelo, los cambios en el uso del suelo, aspectos generales de deforestación y del monitoreo de los cambios en el uso del suelo así como las técnicas existentes para la determinación de la aptitud del suelo. El Capítulo 2 estudió el cambio de uso del suelo con énfasis en el proceso de deforestación ocurrido durante el periodo 1993-2007 mediante el uso de técnicas de comparación cartográfica. El Capítulo 3 estudió la respuesta de la vegetación a la precipitación con datos satelitales hipertemporales de resolución espacial media, en total 489 imágenes del producto MODIS MCD43A4 (500 m, resolución espacial) correspondientes a 11 años durante el periodo 2000 a 2010. En el Capítulo 4 se estudió la susceptibilidad de deforestación de los ecosistemas forestales remanentes del estado de San Luis Potosí, México mediante la regresión logística para relacionar variables explicatorias de tipo social, de inversión, producción forestal, biofísicas y de proximidad. Los métodos empleados en esta tesis representan un esfuerzo interesante para conocer la dinámica de los recursos forestales de San Luis Potosí en el pasado reciente.

Firma del asesor principal: Dr. Eduardo Javier Treviño Garza.

SUMMARY

Liliana Miranda Aragón

Graduation date: January, 2013

**Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ciencias Forestales**

Research Title: Deforestation monitoring in a portion of North Central Mexico using geomatics techniques

Number of Pages: 92

**Doctoral Candidate in Sciences
specialized in Natural Resources
Management**

Field of study: Geomatics applied to Natural Resources Management

Purposes and Study Method: A methodology is proposed for spatiotemporal modeling of vegetation and land use change for a portion of the North Central Mexico: San Luis Potosí. Spatial analysis, statistical modeling and satellite imagery processing were included as main methods.

Contribution and Conclusions: The Chapter 1 presents a general state of the art of land use science, general aspects of monitoring land use changes and existing techniques for determining the suitability of land. The Chapter 2 studied land use change with emphasis on the process of deforestation occurred during the period 1993-2007 using map matching techniques. The Chapter 3 examined the response of vegetation to precipitation with moderate spatial resolution hypertemporal remote sensing; a total of 489 images of the product MCD43A4 MODIS (500 m spatial resolution) for 11 years during the period 2000 to 2010 were used to build time-series. The Chapter 4 studied the susceptibility to deforestation of remaining forest ecosystems using logistic regression to relate social, investment, forest production, biophysical and proximity factors as explanatory variables. Methods used in this dissertation represent an interesting attempt to understand the dynamics of forest resources in San Luis Potosí, México in the recent past.

Major Advisor: Dr. Eduardo Javier Treviño Garza.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Presentación

Existe una considerable preocupación relacionada con el cambio climático global, la cual se ha incrementado durante las últimas dos décadas y particularmente durante los últimos cinco años, ya que cada día resultan más visibles las noticias relacionadas con el tema en los medios de comunicación. Los impactos de las actividades humanas en el clima causadas por el consumo extensivo de combustibles fósiles, son un factor importante para los tomadores de decisiones debido a sus implicaciones económicas y geopolíticas. Otros factores críticos, tales como deforestación, pérdida de la biodiversidad, contaminación del agua o la erosión del suelo son frecuentemente menos reportados, quizá porque tienen un menor impacto directo en el desarrollo de las economías. Sin embargo, son los signos más evidentes del cambio global (Chuvieco *et al.*, 2008).

Desde mediados de los 70s, se ha reconocido que los cambios en el uso del suelo modifican el albedo superficial y por consiguiente, el intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera, para alterar finalmente la temperatura en el clima global. Posteriormente a principios de los 80s, se reconocieron a los ecosistemas terrestres como fuentes y sumideros de carbono, saliendo a la luz el impacto que tiene la deforestación (Lambin *et al.*, 2001).

Una manera de monitorear dichos cambios ha sido aprovechando el avance considerable en los últimos 20 años en el desarrollo de herramientas

computacionales orientadas al estudio de los recursos naturales, desde técnicas estadísticas para el modelado de fenómenos, captación de imágenes de la superficie terrestre mediante sensores satelitales, e inclusive el desarrollo de software para el procesamiento de dichas imágenes en el estudio de la cobertura (Aspinall, 2008).

La investigación que se presenta en esta tesis tiene como propósito estimar la deforestación mediante técnicas geomáticas, analizar sus causas y determinar las zonas más susceptibles a sufrir este fenómeno con el fin de ser una herramienta en la toma de decisiones para el fomento forestal a nivel estatal. Este trabajo se presenta en cinco capítulos. Los capítulos 1 y 5 aportan el marco conceptual y las conclusiones relevantes a la investigación realizada, mientras que los capítulos 2, 3, y 4 se presentan en formato de artículos científicos.

El Capítulo 1, *“Introducción general”* aborda aspectos generales de la deforestación a nivel mundial y en México, los métodos y técnicas para la detección del cambio de uso del suelo enfocado en el proceso de deforestación, los análisis estadísticos que ayudan a comprender las causas probables de la deforestación, así como una revisión de las técnicas existentes de análisis espacial que incluye la evaluación multicriterio como base conceptual de la determinación de las áreas potenciales para plantaciones forestales comerciales, y finalmente los retos y perspectivas de la Geomática como una ciencia de apoyo en la evaluación y monitoreo de los recursos naturales.

El Capítulo 2, *“Análisis de la deforestación mediante técnicas de comparación cartográfica”* realizado con la serie II (1993) y IV (2007) de vegetación y uso del suelo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), ubica espacialmente y analiza cuantitativamente los casos de deforestación ocurridos en cada una de las zonas biogeográficas de San Luis Potosí.

El Capítulo 3, *“Monitoreo interanual del NDVI mediante imágenes satelitales en series de tiempo y su relación con la precipitación anual: 2000-2010”* donde se fusionaron aproximadamente 24 imágenes de satélite por año obtenidas del sensor MODIS para obtener una imagen de máximo valor compuesto (Lasaponara, 2006) para cada uno de los años de análisis (2000-2010: 11 años); el análisis de componentes principales se aplicó a las 11 imágenes obtenidas, donde el segundo componente representó los cambios anuales en el NDVI.

El Capítulo 4, *“Susceptibilidad de deforestación en ecosistemas áridos, templados y tropicales del centro norte de México”* que se enfocó en la explicación de la ocurrencia de la deforestación a través de la prueba estadística de variables cartográficas que describen distancias a diferentes rasgos geográficos como localidades, caminos, y otros factores de interés.

El Capítulo 5, *“Conclusión”* trata sobre las hipótesis planteadas en cada capítulo y los resultados obtenidos en cada fase de la tesis doctoral.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Analizar el cambio de uso del suelo con énfasis en el proceso de deforestación mediante el uso de herramientas geomáticas en las diferentes zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí, investigar sus principales causas espaciales y generar un mapa de alerta temprana sobre la susceptibilidad de deforestación en los ecosistemas forestales remanentes.

1.2.2. Objetivos Particulares

1. Estudiar los procesos de deforestación mediante la intersección espacial de mapas temáticos de la Serie II (1993) y IV (2007) de vegetación y uso del suelo, generados por el INEGI para cada una de las zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí: 1) Altiplano, 2) Centro, 3) Media y 4) Huasteca.

2. Analizar la tendencia de la precipitación vs NDVI durante el periodo 2000-2010 mediante el uso de imágenes satelitales en series de tiempo del sensor MODIS.

3. Determinar las probables causas de la deforestación detectada mediante el modelado de diferentes variables cartográficas como distancia a poblados, distancia a caminos, entre otros mediante el análisis de regresión logística y delinear las zonas forestales remanentes con base en los diferentes niveles de susceptibilidad a la deforestación.

1.3. Hipótesis

1. Durante los últimos 15 años han existido cambios en el uso del suelo principalmente representados por la deforestación en las diferentes zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí.

2. La dinámica de la vegetación está relacionada con la precipitación y puede ser modelada mediante imágenes anuales simulando una serie de tiempo.

3. La deforestación no es un fenómeno aleatorio sin causas aparentes y puede ser explicado con base en diferentes variables de índole espacial.

1.4. Revisión de Literatura

1.4.1. Ciencia del Uso del Suelo

La ciencia del uso del suelo puede ser definida como una materia interdisciplinaria e inclusiva enfocada al estudio de la vegetación y uso del suelo, sus cambios en el espacio y tiempo, y en las causas que los determinan, los cuales pueden ser de tipo ecológico, ambiental, socioeconómico, cultural, entre otros. Existe una gran variedad de teorías, metodologías y tecnologías que apoyan el estudio de esta ciencia y consecuentemente existen una variedad de temas básicos y aplicados que caracterizan su investigación. Esto refleja la interdisciplinariedad y el análisis integrado requerido para comprender la situación actual del uso del suelo, sus cambios, la política involucrada en la toma de decisiones, y su importancia para el logro de la sustentabilidad. El uso del suelo también es considerado una parte central del funcionamiento de la Tierra, de manera que refleja las interacciones humanas con el ambiente desde escalas locales hasta globales (Aspinall y Hill, 2008).

Las preguntas básicas en la ciencia del uso del suelo incluyen aquellas que se enfocan en a) la dinámica de cambio en espacio y tiempo; b) la integración y retroalimentación entre el paisaje, el clima y los sistemas ecológicos y socioeconómicos; c) la resiliencia, la vulnerabilidad y adaptabilidad de los sistemas naturales y humanos; d) los temas de escala; y e) la exactitud de las mediciones. La ciencia aplicada aborda preguntas de manejo y política en el uso del suelo que incluyen: a) temas y decisiones sobre la propiedad pública o privada; b) la interpretación y la comunicación del conocimiento científico para el manejo adaptativo del cambio en los sistemas del uso del suelo; c) y las respuestas ambientales y humanas al cambio (Aspinall, 2008).

1.4.2. Cambios en el Uso del Suelo

Los cambios en la vegetación y el uso del suelo son inherentemente espaciales y dinámicos. La magnitud y el impacto son tales que se reconocen globalmente, de manera que esta dinámica se reconoce también como uno de los grandes retos en la ciencia ambiental. Existe una variedad de investigaciones de cambio de uso del suelo realizados para periodos de análisis que abarcan los últimos 30 años con imágenes de satélite (Alcántara-Ayala *et al.*, 2006; Antonio-Némiga *et al.*, 2006; Echeverría *et al.*, 2008; Ellis y Potter-Bolland, 2008; Calvo-Alvarado *et al.*, 2009; Deng *et al.*, 2009) y también para periodos mayores (Sirén y Brondizio, 2009; Chen *et al.*, 2009; Kobayashi y Koike, 2010). Estos proyectos individuales no solamente han identificado las transiciones comunes en la vegetación y el uso del suelo, sino que también han estudiado las causas de dichos cambios (Chowdhury, 2006; Bhattarai *et al.*, 2009; Biggs *et al.*, 2010).

La necesidad de investigar temas sobre la dinámica del uso del suelo, especialmente si sus objetivos son el conocimiento mejorado de los procesos y los cambios producidos, ha sido abordada en diferentes investigaciones (Bhattarai *et al.*, 2009; Biggs *et al.*, 2010). Es común encontrar en la literatura formas novedosas de estudiar el uso del suelo y sus cambios mediante nuevos diseños observacionales y experimentales así como protocolos de investigación que apoyan análisis de cambio cualitativos y cuantitativos (Alcántara-Ayala *et al.*, 2006; Echeverría *et al.*, 2008; Ellis y Potter-Bolland, 2008; Deng *et al.*, 2009); para finalmente comparar mejor los resultados de diferentes estudios de caso. Esto ha sido posible, en parte por la disponibilidad de mediciones espacio temporalmente consistentes y exhaustivas que apoyan a desarrollar la historia espacial y temporal de la vegetación y el uso del suelo de diferentes lugares en todo el mundo, además de la rápida evolución de los algoritmos que se incluyen

en los diferentes programas computacionales relacionados con los Sistemas de Información Geográfica, Percepción Remota y Estadística.

1.4.3. Aspectos Generales de la Deforestación

La deforestación es uno de los problemas ambientales más serios de los últimos tiempos. Este tema se ha convertido de interés mundial debido a la importancia de los bosques y selvas por los diferentes servicios ambientales que proveen como a) producción de agua, b) almacenamiento y captura de carbono, c) conservación de la biodiversidad y d) belleza escénica. La deforestación también afecta las actividades económicas y amenaza el sustento de la vida y la integridad cultural de las personas que dependen de los bosques además de problemas como degradación de suelos, inundaciones y asolve de los cuerpos de agua e infraestructura hidráulica (Angelsen y Kaimowitz, 2001; Culas, 2007; Bhattarai *et al.*, 2009; Chowdhury, 2006).

La deforestación ocurre mayormente en países en vías de desarrollo donde el nivel de bienestar de los ciudadanos es un factor crucial en la determinación del tamaño de las áreas deforestadas. La pobreza, la sobrepoblación y la deuda externa acentúan la deforestación en muchos de los países tropicales con bajo producto interno bruto (FRA, 2005; Gane, 2007). Los requerimientos del crecimiento económico resultan en el incremento de la demanda de productos agrícolas y forestales. Esta tendencia no es tan común en países desarrollados y tienen una diferente lógica de crecimiento. Esta tendencia se caracteriza como una curva en forma de U invertida que relaciona el crecimiento del producto interno bruto y la calidad del ambiente. En la literatura reciente, este modelo es conocido como la curva ambiental de Kuznets (Kuznets curve) (Schreuder, 2009) o también es referida como la hipótesis de transición forestal (forest transition hypothesis) (Angelsen y Kaimowitz, 2001).

Los bosques y selvas poseen los ecosistemas más ricos y valiosos albergando entre un 50 % y un 90 % de todas las especies de la tierra. El área total de bosque en 2005-2010 fue de 4 mil millones de hectáreas, cubriendo el 31% del área total de la tierra. Durante los años 80s, se perdieron anualmente 16.3 millones de hectáreas de bosques y selvas (FAO, 1992), mientras que en el periodo de 1990 a 2000, fue de -8.9 millones de hectáreas anuales (FAO, 1997); para el periodo 2000-2005 -7.3 millones de hectáreas y la última evaluación de la FAO indicó una pérdida, enfocando el periodo para el año 2000-2010 de -5.2 millones de hectáreas por año a nivel mundial, lo que representa una reducción en la tasa de deforestación y el incremento en el área de nuevos bosques establecidos mediante plantación y la expansión natural de bosques ya existentes. A nivel regional, Sudamérica cuenta con el mayor porcentaje de cubierta forestal, seguida por Europa, Norteamérica y Centroamérica (FRA, 2005; FRA, 2010).

1.4.4. Monitoreo del Cambio de Uso del Suelo

La Tierra está cambiando a un ritmo nunca antes visto. Esta evolución requiere ser documentada mediante imágenes completas y repetibles. Las herramientas de observación terrestre juegan un papel clave en la generación de estimaciones reales sobre los cambios del paisaje. En este sentido se requieren mediciones consistentes, fiables y precisas de la dinámica de la vegetación y uso del suelo para mejorar nuestro entendimiento en la manera que funcionan los diferentes elementos del sistema (Mayaux *et al.*, 2008). El ámbito político también requiere dicha información, ya que los acuerdos ambientales internacionales como las convenciones de Río (Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, la Convención para el Combate de la Desertificación y la Convención para la Diversidad Biológica) entre otras, reportan obligaciones en torno al cambio de la vegetación y el uso del suelo y

condicionan las nuevas decisiones políticas asociadas a estas convenciones (Gane, 2007).

Los recursos de la Tierra tienen un alto valor económico, pero esto no durará si ellos son sobre explotados o manejados irracionalmente (Alcántara-Ayala *et al.*, 2006; Deng *et al.*, 2009). Los programas de apoyo requieren conocer la condición anterior, actual y probablemente futura del uso del suelo, para el desarrollo de políticas y estrategias operacionales y para dirigir el uso de los recursos; para llegar a una meta a largo plazo de alcanzar el manejo sustentable de los recursos forestales como parte de los esfuerzos para erradicar la pobreza en las regiones en desarrollo del mundo (Gane, 2007; Eakin y Bojórquez-Tapia, 2008; Ellis y Potter-Bolland, 2008; Fowler *et al.*, 2009).

Existen diferentes agencias espaciales que publican grandes conjuntos de datos representando un material base para una mejor caracterización de la vegetación y el uso del suelo (IPCC, 2006; Newton, 2007; Gomarasca, 2009). Mientras tanto, los científicos se encuentran desarrollando técnicas para refinar las mediciones y quienes hacen política comienzan a incluir tales diagnósticos en sus decisiones (Penman *et al.*, 2003).

1.4.4.1. Mapeo de la Vegetación y Uso del Suelo

Desde el comienzo de los años 70s, las técnicas de percepción remota han sido aplicadas exitosamente al mapeo local, nacional, continental e incluso global de la vegetación. En otras palabras, resulta evidente la utilidad de los mapas de uso del suelo para el manejo y la planeación de los recursos naturales desde escalas locales a nacionales. A escala global, la caracterización confiable de la vegetación es una importante variable de entrada para los modelos de circulación global, permitiendo mejorar nuestro entendimiento sobre la manera en que funciona la biosfera y para modelar escenarios climáticos futuros (Chen *et al.*, 2009).

La disponibilidad de colecciones globales de datos espaciales detallados *v.gr.* el caso de datos Landsat combinados con mejoras en el procesamiento y almacenamiento, ha diseminado su uso para el mapeo regional y nacional (Penman *et al.*, 2003; IPCC, 2006). Aunque, es muy difícil conseguir imágenes de alta resolución espacial de una misma fecha para regiones amplias de estudio.

El detalle temático de la leyenda para el mapeo específico de la vegetación resulta un compromiso entre los requerimientos del usuario del mapa y las propiedades intrínsecas de la fuente de datos. Las resoluciones espacial, temporal y espectral determinan qué es posible mapear; generalmente, cuando mayor es el área de estudio, la resolución espacial y la riqueza temática son menores (Aspinall, 2008; Chuvieco, 2008; Chuvieco *et al.*, 2010).

Las técnicas para convertir las imágenes de satélite en mapas categóricos se han sofisticado al paso del tiempo. En un inicio, los datos satelitales eran usados de forma similar a las fotografías aéreas, mediante la fotointerpretación de impresiones blanco y negro (Newton, 2007; Calvo-Alvarado *et al.*, 2009). En esta metodología, el buen conocimiento del área de estudio y material auxiliar para generar mapas a diferentes escalas, son básicos. No obstante, estas técnicas no aprovechan la ventaja de tomar la fidelidad espacial y la riqueza espectral de los datos.

Para aprovechar la capacidad numérica de los valores registrados en las imágenes satelitales, se han desarrollado diferentes métodos para examinar y clasificar estadísticamente los píxeles individuales, y a través de series de tiempo, caracterizar su comportamiento espectral (Macedo-Cruz *et al.*, 2010). Los clusters pueden ser entrenados mediante el uso de datos de campo (clasificación supervisada) o estadísticos (clasificación no supervisada). Si bien es cierto, este método emplea completamente las propiedades espectrales de

los píxeles, no utiliza la información contextual que sí usa la fotointerpretación; es por ello, que en años recientes surge un nuevo enfoque de clasificación más sofisticado llamado segmentación de imágenes y para el caso de imágenes de muy alta resolución espacial (tamaño del píxel menor a 5 m), se le conoce como clasificación orientada a objetos (Newton, 2007; Lang, 2008).

Una vez clasificada la imagen, resulta imperativo y fundamental estimar la confiabilidad del mapa lo cual se realiza mediante la elaboración de matrices de confusión, contingencia o error (Van Oort *et al.*, 2007). Sin embargo, el levantamiento de datos para la validación de estos mapas puede ser problemático por causas diversas como a) el tamaño del área de interés, b) la diversidad de ecosistemas, c) la falta de un sistema de clasificación (leyenda) homogéneo y no menos importante, d) los costos económicos de tales actividades. Aunque parece complicado, la validación de los mapas es de suma importancia para conocer los alcances y limitaciones de la información que se genera, la cual finalmente sirve para emitir opiniones o decidir políticas de manejo de los recursos naturales.

1.4.4.2. Detección y Mapeo del Cambio de Uso del Suelo

Durante los últimos 30 años se ha desarrollado una diversidad de técnicas para la detección espacial del cambio, los cuales pueden ser clasificados con base en diferentes criterios (Newton, 2007). Una manera interesante de ubicar las metodologías de cambio es la propuesta por Van Oort (2007) quien clasifica los métodos de cambio en dos tipos: 1) aquellos que primero detectan el cambio y posteriormente asignan clases (*v.gr.* diferencia de imágenes o análisis de componentes principales) y 2) aquellos que primero asignan clases y posteriormente detectan el cambio (comparación postclasificación). En los métodos de la categoría 1 podría ser suficiente simplemente con distinguir las áreas de cambio de las de no cambio, pero casi seguramente se estará interesado en la naturaleza del cambio y por lo tanto en

la asignación de clases al mismo. Las ventajas de tales métodos radica en que son muy sensibles al cambio numérico mínimo (Gao, 2009; Gomarasca, 2009).

Mientras que los métodos de la categoría 2 han alcanzado una alta popularidad probablemente por el hecho de que pueden ser aplicados a mapas temáticos (IPPC, 2006), disponibles en cartografía oficial o realizados por el investigador usando técnicas de interpretación de imágenes.

1.4.4. Determinación de la Aptitud de Uso del Suelo

1.4.4.1. Métodos Multicriterio

Sobre la última década se han desarrollado diversos algoritmos de tipo multicriterio entre los que se encuentran combinaciones lineales ponderadas (Fernández y Lutz, 2010), métodos de punto ideal (Santé-Rivieira *et al.*, 2008), análisis de concordancia (Beverly *et al.*, 2009) y procesos jerárquicos analíticos (Kangas y Kurtilla, 2008; Averna-Valente y Vettorazzi, 2008; Boroushaki y Malczewski, 2008; Bello-Dambatta *et al.*, 2009). De todos estos las combinaciones lineales ponderadas y las sobreposiciones booleanas son los más frecuentemente empleados. El tomador de decisiones asigna directamente las ponderaciones denotando la importancia para cada atributo posteriormente una calificación total se obtiene multiplicando la ponderación por el valor del atributo y se suman todos los productos, después la alternativa con el valor mas alto es la seleccionada. Esto se puede hacer con un Sistema de Información Geográfica (SIG) con capacidades de sobreposición o de álgebra de mapas. Estos procedimientos tienen limitaciones por que algunos autores sugieren un método llamado promedio ponderado ordenado (OWA) (Averna-Valente y Vettorazzi, 2008; Boroushaki y Malczewski, 2008, 2010).

Otra técnica multicriterio que ha sido incorporada a los SIG es el análisis jerárquico analítico (AHP) (Saaty, 1980; Fernández y Lutz, 2010;), que funciona ponderando las capas de datos y son combinados mediante una suma. Este

procedimiento tiene una particular importancia en problemas que tienen un gran número de alternativas. Algo importante de mencionar es que el principio de este método puede servir para agregar prioridades para todos los niveles en la estructura jerárquica. Éste método puede ser usado como una herramienta de consenso en situaciones donde existe un comité o grupo tomador de decisiones.

Una de las dificultades asociadas con los métodos multicriterio es la suposición de la independencia entre los atributos. Los métodos de punto ideal evitan algunas de estas dificultades (Santé-Rivieira *et al.*, 2008). Ellos ordenan un conjunto de alternativas con base en su separación del punto ideal. Este punto representa una alternativa hipotética que consiste en los niveles más deseables de cada criterio a través de las alternativas bajo consideración. La alternativa más cercana al punto ideal es la mejor alternativa. Dicha separación es medida en términos de una distancia métrica. Un amplio rango de reglas de decisión puede ser desarrollado mediante la combinación de diferentes definiciones de las medidas de separación. Estos métodos pueden ser implementados en ambos tipos de SIG vector y raster pero, se comportan mejor en el raster.

Entre los problemas asociados con la implementación de los métodos multicriterio en el SIG es que los datos de entrada usualmente tienen la propiedad de ser imprecisos, inexactos y ambiguos, por lo que esfuerzos como análisis de sensibilidad (Averna-Valente y Vettorazzi, 2008), análisis de propagación del error (Fernández y Lutz, 2010) y métodos de lógica difusa (Anagnostopoulos *et al.*, 2008; Bello-Dambatta *et al.*, 2009) han sido utilizados para evitar estas ambigüedades.

Después de la ambigüedad de los datos, el segundo problema encontrado es relacionado a la estandarización de los diferentes criterios donde

el más utilizado es el método de la transformación lineal (Zucca y Fabbri, 2008; Store y Antikainen, 2010).

Al final surge la pregunta sobre cuál es el mejor método de decisión multicriterio para una situación particular. Tal pregunta sigue quedando sin resolver y a lo cual se sugiere que se apliquen dos o más métodos en el mismo problema para minimizar el efecto del sesgo.

1.4.4.2. Métodos Multiobjetivo

Este método define las alternativas establecidas en términos de un modelo de decisión que consiste en dos o más funciones objetivo (optimización) y el establecimiento impuesto en las variables de decisión (Farahani *et al.*, 2010).

La programación lineal puede ser utilizada para el análisis espacial de aptitud del suelo. Con esta técnica se optimizan los patrones espaciales del uso del suelo generando diferentes escenarios. La programación lineal tiene sus restricciones como la dificultad de trabajar con problemas muy grandes, para lo cual se han desarrollado, como posible solución a este problema, algoritmos heurísticos. Mientras que el análisis heurístico no garantiza una solución óptima, en la mayoría de los casos la ubicación sugerida es cercana a la óptima, además de que problemas mucho más grandes pueden ser manejados más efectivamente que en el formato de la programación lineal (Farahani *et al.*, 2010; Store y Antikainen, 2010).

Uno de los problemas de las técnicas multicriterio tradicionales para evaluar la aptitud del suelo es que no aseguran contigüidad o compactación en el patrón espacial, a menos que se le indiquen restricciones en este sentido (Santé-Rivieira *et al.*, 2008; Sharifi *et al.*, 2009).

1.4.4.3. Otros Métodos de Análisis Multicriterio

Métodos inteligentes artificiales. Este tipo de métodos incluyen técnicas computacionales modernas para modelar y describir sistemas complejos para la inferencia y generación de decisiones. Estos métodos buscan desarrollar sistemas que imitan la inteligencia humana y son tolerantes a la imprecisión, ambigüedad, incertidumbre y verdades parciales de la información. Inteligencia artificial es un término general que abarca métodos como programación genética (Parolo *et al.*, 2009), autómata celular (Gong *et al.*, 2009) y sistemas difusos (Anagnostopoulos *et al.*, 2008; Eakin y Bojórquez-Tapia, 2008; Kahraman y Kaya, 2010).

1.5. Conclusiones

Es evidente el desarrollo de los métodos SIG para el análisis de uso de aptitud del suelo partir de los últimos 30 años, desde las clásicas técnicas de sobreposición booleana hasta un amplio rango de técnicas de inteligencia artificial, donde en varios casos usan una combinación de estos métodos.

Los principales problemas de los métodos multicriterio son relacionados a la elección del adecuado para la combinación de diferentes criterios de evaluación, criterios de estandarización y criterios de ponderación. Diferentes métodos pueden producir diferentes resultados. Es importante notar que algunos de los métodos revisados en este capítulo han sido implementados usando una variedad de tecnologías computacionales. La habilidad de analizar datos desde muchas perspectivas y escenarios sin duda llevará a una toma de decisiones mas integral.

Uno de los retos mas grandes en la modelación territorial es identificar las escalas a las que operan los diferentes procesos naturales e identificar los métodos de escalamiento apropiados para transferir la información de una

escala a otra (Marceau y Moreno, 2008). Mientras la resolución espacial y temporal incrementa, los modelos se vuelven más difíciles de construir, requieren de más poder computacional además de datos más sofisticados, y también se vuelven mucho más difíciles de interpretar y analizar. Es por ello que para alcanzar las metas planteadas en los objetivos de los trabajos de investigación es crucial determinar el grado de la complejidad (espacial, temporal y estructural) que sea justificado; en este sentido será siempre importante decidir cual será la unidad espacial más pequeña que se podrá modelar como una entidad espacialmente homogénea (Costanza y Voinov, 2004).

La flexibilidad de reescalar el modelo espacial, temporal y estructura permitirá construir un arreglo jerárquico de modelos que varíen en su resolución y complejidad para cumplir los requerimientos y retos de estudios particulares, desde locales a globales (Voinov *et al.*, 2004).

1.6. Literatura Citada

- Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., and Parrot, J.F. 2006. Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *Catena*. 65:152–165.
- Anagnostopoulos, K., Doukas, H. and Psarras, J. 2008. A linguistic multicriteria analysis system combining fuzzy sets theory, ideal and anti-ideal points for location site selection. *Expert Systems with Applications*. 35:2041–2048. and perspectives. *Habitat International*. 32:58–73.
- Angelsen, A. and Kaimowitz, D. 2001. Agricultural Technologies and Tropical Deforestation. In: Introduction: The Role of Agricultural Technologies in tropical Deforestation. Ed. CABI Publishing and Center for International Forestry Research. ISBN: 0-85199-451-2.422p.

- Antonio-Némiga, X., Treviño-Garza, E.J., Jiménez-Pérez, J., Villalón-Mendoza, H. y Navar-Chaidez, J.J. 2006. Cambios en la vegetación en la subcuenca del Río Pílon, Nuevo León, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12(1):5-11.
- Aspinall, R.J. 2008. Basic and applied land use science. *In: Aspinall, R.J. and Hill, M.J. Land use change. Science, Policy and Management*. CRC Press. Taylor y Francis Group. ISBN:978-1-4200-4296-2.
- Averna-Valente, R.O. and Vettorazzi, C.A. 2008. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. *Forest Ecology and Management*. 256:1408-1417.
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albasi, A. and Aghdasi, M. 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*. 200:198-215.
- Bello-Dambatta, A., Farmani, R., Javadi, A.A. and Evans, B.M. 2009. The Analytical Hierarchy Process for contaminated land management. *Advanced Engineering Informatics*. 23:433–441.
- Beverly, J.L., Herd, E.P.K. and Ross, C.J.C. 2009. Modeling fire susceptibility in west central Alberta, Canada. *Forest Ecology and Management*. 258:1465–1478.
- Bhattacharai, K., Conway, D. and Yousef, M. 2009. Determinants of deforestation in Nepal's Central Development Region. *Journal of Environmental Management*. 91:471–488.
- Biggs, T.W., Atkinson, E., Powell, R. and Ojeda-Revah, L. 2010. Land cover following rapid urbanization on the US–Mexico border: Implications for conceptual models of urban watershed processes. *Landscape and Urban Planning*. 96:78–87.
- Borouhaki, S. and Malczewski, J. 2008 Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Computers y Geosciences*. 34:399–410.

- Borouhaki, S. and Malczewski, J. 2010. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision-making. *Computers y Geosciences*. 36:302–312.
- Calvo-Alvarado, J., McLennan, B., Sánchez-Azofeita, A., and Garvin, T. 2009. Deforestation and forest restoration in Guanacaste, Costa Rica: Putting conservation policies in context. *Forest Ecology and Management*. 258:931–940.
- Chen, J., Avise, J., Guenther, A., Wiedinmyer, C., Salathe, E., Jackson, R.B. and Lamb, B. 2009. Future land use and land cover influences on regional biogenic emissions and air quality in the United States. *Atmospheric Environment*. 43:5771–5780.
- Chowdhury, R.R. 2006. Landscape change in the Calakmul Biosphere Reserve, Mexico: Modeling the driving forces of smallholder deforestation in land parcels. *Applied Geography*. 26:129–152.
- Chuvieco, E. 2008. *Earth Observation of Global Change. The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment*. Ed. Springer. 228p.
- Chuvieco, E., Li, J. and Yang, X. 2010. *Advances in Earth Observation of Global Change*. Springer. 283 p.
- Culas, R.J. 2007. Deforestation and the environmental Kuznets curve: An institutional perspective. *Ecological Economics*. 61:429-437.
- Deng, J.S., Wang, K., Hong, Y. and Qi, J.G. 2009. Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and Urban Planning*. 92:187–198.
- Eakin, H. and Bojórquez-Tapia, L.A. 2008. Insights into the composition of household vulnerability from multicriteria decision analysis. *Global Environmental Change*. 18:112–127.
- Echeverria, C., Coomes, D.A., Hall, M. and Newton, A.C. 2008. Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile. *Ecological Modelling*. 212:439-449.

- Ellis, E.A. and Poter-Bolland, L. 2008. Is community-based forest management more effective than protected areas? A comparison of land use/land cover change in two neighboring study areas of the Central Yucatan Peninsula, Mexico. *Forest Ecology and Management*. 256:1971–1983.
- FAO, 2005. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005. Hacia la ordenación forestal sostenible. Ed. Estudio FAO Montes, 147. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 320 p. Disponible en www.fao.org/forestry/site/fra2005/es.
- FAO, 2010. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010. Informe Principal. Ed. Estudio FAO Montes, 163. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 346 p. http://foris.fao.org/static/data/fra2010/FRA2010_Report_S.pdf.
- Fernández, D.S. and Lutz, M.A. 2010. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*. 111:90–98.
- Food and Agriculture Organization, 1992. Forest Resources Assessment, Tropical Countries, Forestry. Paper, vol. 112. FAO, Rome. XX P.
- Food and Agriculture Organization, 1997. State of the World's Forests. FAO, Rome. XX P.
- Food and Agriculture Organization, 2010. State of the World's Forests. FAO, Rome. XX P.
- Gane, M. 2007. Forest Strategy. Strategic Management and Sustainable Development for the Forest Sector. Ed. Springer. ISBN: 978-1-4020-5965-0. 414p.
- Gao, J. 2009. Digital Analysis of Remotely Sensed Imagery. Ed. Mc Graw Hill. The University of Auckland, New Zealand. ISBN: 978-0-07-160465-9.
- Gomarasca, M.A. 2009. Basics of Geomatics. Ed. Springer. ISBN: 978-1-4020-9013-4. pp. 257-340. 656 p.
- IPCC 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D.,

- Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. and Wagner. Ed. Institute for Global environmental strategies (IGES). Japan. ISBN:4-88788-003-0. 596 p.
- IPCC 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. Vol. 1-5:1998p.
- Irwin, E. G. and Geoghegan, J. 2001. Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 85:7–23.
- Kahraman, C. and Kaya, I. 2010. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications*. 37(9):6270-6281.
- Kobayashi, Y. and Koike, F. 2010. Separating the effects of land-use history and topography on the distribution of woody plant populations in a traditional
- Lambin, E. F., B. L. Turner, H. Geist, S. B. Agbola, A. Angelsen, J., W. Bruce, O. T. Coomes, V. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. F. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. F. Richards, H. Skanes, W. Steffen, G. D. Stone, U. Svedin, T. A. Veldkamp, C. Vogel, and J. Xu. 2001. The causes of land-use and landcover change: moving beyond the myths. *Global Environ. Change* 11: 261-269.
- Lang, S. 2008. Chapter:1.1. Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality – dealing with complexity. pp3-27. *In: Object-Based Image Analysis. Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*. Blaschke, T., Lang, S. and Hay, G.J. Ed. Springer. ISBN: 978-3-540-77057-2. 817p.
- Lasaponara, R. 2006. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation nomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. *Ecological Modelling* 194: 429–434.
- Macedo-Cruz, A., Pajares-Martinsanz, G. and Santos-Peñas, M. 2010. Clasificación no supervisada con imagenes a color de cobertura terrestre. *Agrociencia* 44:711-722.

- Mayaux, P., Eva, H., Brink, A., Achard, F. and Belward, A. 2008. Chapter 5: Remote Sensing of Land-cover and Land-Use Dynamics. In: Chuvieco, E. 2008. Earth Observation of Global Change. The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment. Ed. Springer. pp.85-108.
- Mayaux, P., Eva, H., Brink, A., Achard, F. and Belward, A. 2008. Remote sensing of land-cover and land-use dynamics. *In*: Chuvieco, E. Earth Observation of Global Change. The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment. Ed. Springer. pp. 85-108p.
- Newton, A.C. 2007. Forest Ecology and Conservation. A Handbook of Techniques. Ed. Oxford University Press. 454p.
- Parolo, G., Ferrarini, A. and Graziano, R. 2009. Optimization of tourism impacts within protected areas by means of genetic algorithms. *Ecological Modelling*. 220(8):1138-1147.
- Santé-Rivieira, I., Crecente-Maseda, R., Miranda-Barrós, D. 2008. GIS-based planning support system for rural land-use allocation. *Computers and Schreuder electronics in Agriculture*. 63:257-273.
- Schreuder, Y. 2009. The Corporate Greenhouse Climate Change Policy in a Globalizing World. In: Trade liberalization, economic development and the environment. ISBN:978 1-84277-958-3-PB. DONDE PONGO LA EDITORIAL. pp 92-96.
- Sharifi, M., Hadidi, M., Vessali, E., Mosstafakhani, P., Taheri, K., Shahoie, S. and Khodamoradpour. 2009. Integrating multi-criteria decision analysis for a GIS-based hazardous waste landfill sitting in Kurdistan Province, western Iran. *Waste Management*. 29:2740–2758.
- Sirén, A. H. and Brondizio, E.S. 2009. Detecting subtle land use change in tropical forests. *Applied Geography*, 29:201–211.
- Store, R. and Antikainen, H. 2010. Using GIS-based multicriteria evaluation and path optimization for effective forest field inventory. *Computers, Environment and Urban Systems*. 34(2):153-161.
- Van Oort, P.A.J. 2007 Interpreting the change detection error matrix. *Remote Sensing of Environment*. 108:1–8.

- Voinov, A., Costanza, R., Boumans, R., Maxwell, T. and Voinov, H. 2004. Patuxent landscape model: integrated modeling of a watershed. *In*: Costanza, R. and Voinov, A. Landscape simulation modeling. A spatially explicit, dynamic approach. Springer. ISBN:0-387-00835-7. pp.197-232.
- Zucca, A., Sharifi, A.M. and Fabbri, A.G. 2008. Application of spatial multi-criteria analysis to site selection for a local park: A case study in the Bergamo Province, Italy. *Journal of Environmental Management*. 88:752–769.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LA DEFORESTACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE COMPARACIÓN CARTOGRÁFICA¹

Resumen

Se realizó el análisis de cambio de uso del suelo con énfasis en el proceso de deforestación mediante técnicas de comparación cartográfica digital de las series II (1993) y IV (2007) del uso del suelo y vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en las cuatro zonas de San Luis Potosí: (1) Altiplano, (2) Centro, (3) Media y (4) Huasteca durante el periodo 1993-2007. Las matrices de cambio se construyeron comparando ambos mapas, los cuales fueron validados previamente mediante la construcción de matrices de confusión con sitios de campo del Inventario Forestal Nacional. Se calculó la tasa de deforestación anual para cada zona: Altiplano (0.11 %), Media (0.16 %), Centro (-0.13 %) y Huasteca (0.51 %). En las zonas áridas y semiáridas se detectó un cambio de matorral a pastizal; mientras que la selva fue la vegetación más afectada en la zona Huasteca. Las tasas de deforestación obtenidas fueron más bajas que las reportadas en la literatura.

Palabras clave: Cambio de uso del suelo, vegetación y uso del suelo, Sistema de Información Geográfica.

¹ Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E.J., Aguirre-Calderón, O.A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M.A., Pompa-García, M. y Aguirre-Salado, C.A. 2012a. Tasas de deforestación en San Luis Potosí, México (1993-2007). Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Aceptado para publicación.

Abstract

A landuse change analysis focused on the deforestation process was carried out by comparing both series I (1993) and IV (2007) of land use and land cover maps for four biogeographical zones of the state of San Luis Potosí: i) Altiplano, ii) Centro, iii) Media and iv) Huasteca. Maps used were compared by a change matrix and also successfully validated with National Forest Inventory plots using a confusion matrix. Annual deforestation rate was calculated by biogeographical zone: Altiplano (0.11 %), Media (0.16 %), Centro (-0.13 %) and Huasteca (0.51 %). A change from shrubland to grassland was more evident in arid and semiarid zones; while, rainforest was the most affected vegetation in the Huasteca zone. Obtained deforestation rates are lower than the national average by vegetation and land use class.

Key words: Land use change, Land use and land cover, Geographic Information Systems.

2.1. Introducción

El funcionamiento de la Tierra se regula mediante los ecosistemas naturales. Los bosques son esenciales para mantener los bienes y servicios ambientales a escala local y global. La presión humana sobre los bosques genera pérdidas en la densidad arbolada, la biodiversidad y la fertilidad de los suelos, provocando a mediano plazo la aparición de fenómenos extremos como deslaves, inundaciones y variaciones en la temperatura (sequías y heladas), etc. (Allen *et al.*, 2010).

La deforestación libera el carbono retenido en los tejidos de los árboles y el suelo, acumulándose al bióxido de carbono (CO₂) atmosférico, propiciando el calentamiento global (Ordoñez-Díaz, 2008; Apezteguía *et al.*, 2009). De acuerdo con estimaciones de la FAO, la deforestación a nivel mundial fue de 8.3 millones ha/año para el periodo 1990-2000 y de 5.5 millones ha/año para el periodo 2005-2010. En México, las estimaciones de las tasas de deforestación varían para el periodo 1990-2000 entre 0.5 % (354 mil ha/año) y 0.24 % (155 mil ha/año) en el periodo 2005-2010 (FAO, 2010).

San Luis Potosí, México es un estado que se localiza en el límite superior de la zona intertropical y cuenta con una variedad de climas y niveles de productividad que determinan la intensidad en el uso del suelo. Tal variación corresponde a matorrales propios de climas áridos, bosques en zonas templadas y conforme se avanza hacia el mar (Golfo de México), existen selvas adaptadas a condiciones tropicales. Los usos del suelo también son acorde a las condiciones climáticas. Para la zona árida es común la práctica de la ganadería extensiva (*v.gr.* caprinocultura). En la zona templada, la práctica de la agricultura de temporal ya sea en zonas planas o de relieve escarpado es frecuente. Mientras que en la zona tropical existe una mayor intensidad en el uso del suelo ocasionada por la mejora en las condiciones climáticas propiciando la agricultura y ganadería intensiva.

San Luis Potosí cuenta con un estudio de Ordenamiento Ecológico a nivel estatal realizado por la Agenda Ambiental de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Uno de los objetivos planteados de este ordenamiento fue comparar la cartografía de vegetación y uso del suelo de la serie I (1976 \pm 3) del INEGI con el Inventario Forestal Nacional (2000) (SEGAM y UASLP, 2008). A pesar de que realizaron una árdua labor cartográfica para cada una de las 35 subcuencas que conforman la entidad, el estudio carece de una metodología clara para la interpretación de los procesos de cambio de uso del suelo como degradación-deforestación, recuperación-reforestación o crecimiento urbano. Si bien es cierto, este estudio plantea ideas valiosas para entender la biogeografía de las comunidades vegetales, no resulta una fuente válida para la documentación de los procesos de cambio propios de un estudio de la dinámica de uso del suelo *v.gr.* tasa de cambio por cobertura, tasa de deforestación o crecimiento urbano.

Actualmente, no existen trabajos reportados que analicen los cambios en el uso del suelo, que permitan comprender la dinámica de las ganancias/pérdidas de la cobertura vegetal en el área de estudio. Este trabajo tiene como objetivos a) detectar y analizar los procesos de deforestación mediante la intersección espacial de mapas de uso anterior del suelo (serie II, 1993) contra la cartografía más actual disponible a la fecha (serie IV, 2007), para cada una de las zonas biogeográficas que comprenden el estado de San Luis Potosí: 1. Altiplano, 2. Centro, 3. Media y 4. Huasteca y b) realizar un mapa de los cambios detectados durante el periodo de análisis.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Área de Estudio

Se enmarca entre las coordenadas geográficas $24^{\circ} 29' 27''$ y $21^{\circ} 09' 33''$ de Latitud Norte y $98^{\circ} 19' 48''$ y $102^{\circ} 18' 10''$ de Longitud Oeste y cuenta con una superficie de 6 millones 116 mil hectáreas, representando el 3.1 % de la superficie de México. SLP se divide en cuatro zonas biogeográficas (Figura 2.1): Altiplano, Media, Centro y Huasteca; están distribuidas en 58 municipios y tienen diversas características fisiográficas por el gradiente altitudinal propiciado por la Sierra Madre Oriental en la parte Oeste. El fenómeno de barlovento-sotavento hace que la precipitación escurra hacia el Golfo de México favoreciendo a la zona de la Huasteca determinando en gran medida la vegetación tropical que ahí se desarrolla. Por su parte en la zona del Altiplano, los vientos llegan sin la humedad suficiente para que exista una precipitación regular, limitando al desarrollo de matorrales y vegetación arbustiva. La zona Centro es una transición entre la zona Altiplano y Media, mientras que la zona Media resulta como la transición entre el Altiplano y la Huasteca.

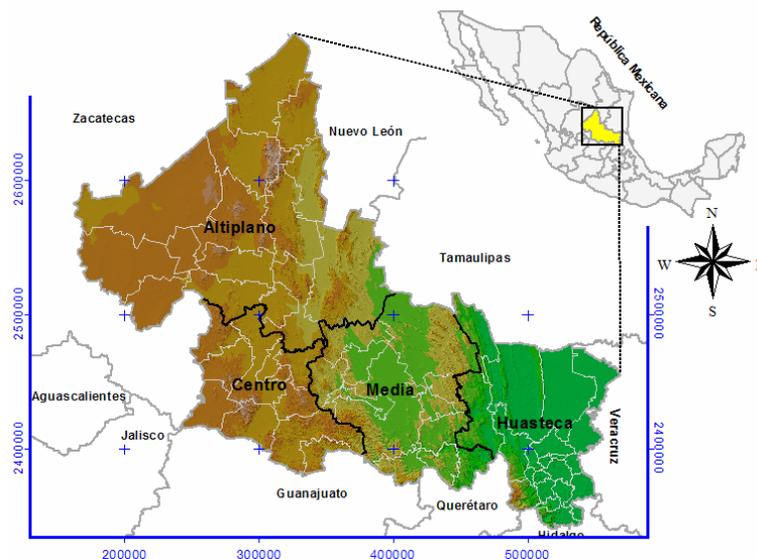


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio.

2.2.2. Materiales

Se utilizaron los conjuntos de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación de la serie II (1993) y IV (2007) escala 1:250,000. Las cartas y sus claves son como sigue: Fresnillo (F13-3), Zacatecas (F13-6), Matehuala (F14-1), San Luis Potosí (F14-4), Ciudad Mante (F14-5), Guanajuato (F14-7), Ciudad Valle (F14-8) y Concepción del Oro (G14-10). Dicha información fue generada por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) mediante la fotointerpretación de imágenes de satélite Landsat y SPOT para todo el territorio nacional y fue validada mediante visitas de campo. También se empleó el Marco Geoestadístico Municipal del INEGI versión 4.1 como referencia de los límites políticos de la zona de estudio. Toda la información se manejó en la proyección UTM, zona 14, datum WGS84.

2.2.3. Validación de las Series de Vegetación

Se construyeron dos matrices de confusión mediante los datos de las series II (1993) y IV (2007) con los datos correspondientes a 330 sitios de muestreo obtenidos del Inventario Forestal Nacional (2004-06). Se calculó la precisión de la cartografía para cada una de los tipos de vegetación y uso del suelo, a nivel global y el índice de Kappa (García-Mora y Mas, 2008; Couturier y Mas, 2009).

2.2.4. Procesamiento de la Información

Dado que ambas series presentaban un desfase espacial aproximadamente consistente ($X:-30\text{ m}$ $Y:+60\text{ m}$) que no obedecía a la posible diferencia entre datum (NAD27 e ITRF92), se ajustaron con el procedimiento de georreferenciación de vectores en AutoCAD Map donde se emplearon once puntos de control ($X_{\text{origen}}, Y_{\text{origen}}$ y $X_{\text{destino}}, Y_{\text{destino}}$) distribuidos en todo el estado, y se obtuvo un error aceptable para la escala del trabajo (0.33

m). Por otra parte, se estandarizó la leyenda de ambas series de vegetación con la tabla presentada por Velázquez *et al.* (2002) (Tabla 2.1), quienes presentan tres niveles de clasificación: (i) formación, (ii) tipo de vegetación y (iii) uso del suelo y comunidad y otras coberturas. Para este trabajo se empleó el nivel de clasificación ii. Lo anterior se realizó generando un nuevo campo dentro de la base de datos del shapefile y asignando las clases encontradas a las nuevas categorías.

Tabla 2.1. Leyenda jerárquica de uso del suelo 1993 y 2007.

Clave	Descripción	Clases que abarca
BC	Bosque de coníferas	Bosque de pino y bosque de táscate
PF	Plantaciones forestales	Bosque cultivado
BMM	Bosque mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña
BL	Bosque de latifoliadas	Bosque de encino
BM	Bosque mixto	Bosque de pino-encino y bosque de encino-pino
SPS	Selva perennifolia y subperennifolia	Selva alta y mediana perennifolia, selva baja perennifolia, selva alta y mediana subperennifolia, selva baja supererenifolia
SCS	Selva caducifolia y subcaducifolia	Selva mediana caducifolia y subcaducifolia, selva baja caducifolia y subcaducifolia
MX	Matorral xerófilo	Matorral crasicaule, matorral desértico micrófilo, matorral desértico rosetófilo, matorral submontano y chaparral
P	Pastizal	Pastizal gipsófilo, pastizal halófilo, pastizal inducido, pastizal natural, pastizal cultivado
MZ	Mezquital	Mezquital y huizachal
OTV	Otros tipos de vegetación	Palmar y vegetación halófila
CA	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua, H ₂ O
AH	Asentamiento humano	Zona urbana y asentamiento humano
ASV	Área sin vegetación aparente	Área sin vegetación
AT	Agricultura de temporal	Agricultura de temporal
AR	Agricultura de riego	Agricultura de riego y humedad
VH	Vegetación hidrófila	Tular, selva de galería

2.2.5. Análisis de cambio

Las matrices de cambio, general y por zona biogeográfica, fueron generadas en Idrisi Kilimanjaro (Franco-Maass, 2006; Pineda-Jaimes *et al.*, 2008) con máscaras booleanas para cada zona. Para esto se rasterizaron los tipos de vegetación y uso del suelo de cada fecha de análisis. Pineda-Jaimes *et al.* (2008) en su estudio de cambio de uso del suelo para el estado de México usando las series II (1993) y III (2002) a escala 1:250,000 indican tomar el tamaño del píxel como la mitad de la unidad más pequeña. Ellos utilizaron 125 m. Dado que la serie IV (2007) estaba a un nivel superior de detalle encontrándose polígonos más pequeños, se decidió escoger un píxel de 50 m x 50 m como unidad de análisis.

Un indicador que estima la dinámica temporal de una categoría temática es la tasa de cambio, misma que indica el porcentaje anual de cambio de un tipo de vegetación o uso del suelo. Se calculó la tasa de cambio para cada tipo de vegetación y uso del suelo con la fórmula $TC = ((S_2/S_1)^{(1/n)} - 1) \times 100$, donde TC: Tasa de cambio, S_1 = Superficie en el año inicial, S_2 = Superficie en el año final, n: número de años en el periodo de análisis (FAO, 1996). El valor positivo indica ganancia de superficie, mientras que un valor negativo indica pérdida. Se calculó el cambio total de cada clase temática referido al área estatal con la fórmula $CTE = (S_2/A) \times 100$, donde A=Área total del estado de San Luis Potosí. Para el caso de la tasa de deforestación (TD) se empleó la fórmula empleada por la FAO (1996), con la diferencia de que los valores fueron tomados de la suma del área de todos los tipos de bosques, selvas y matorrales.

2.2.6. Mapa de cambio

Se realizó un mapa mediante (i) la intersección espacial de los vectores, (ii) la generación de dos nuevas columnas en la base de datos del shapefile: a) cambio detectado en los tipos de vegetación y uso del suelo resultado de

concatenar los campos del tipo de vegetación e b) indicador de cambio y su etiquetado con base en la siguiente lógica: CON: Conservación, vegetación natural que permaneció en los dos periodos, REC: Recuperación, vegetación que aumentó su densidad forestal o uso del suelo que migró a una vegetación natural, DEF: Deforestación, pérdida de territorio arbolado como bosques, selvas y matorral, DEG: Degradación, cambio de una cobertura degradada a una más degradada como pastizal a áreas sin vegetación, SC: Sin cambio, clases temáticas antrópicas que permanecieron intactas en el periodo de análisis, y FC: Falso cambio, cambios ilógicos en el uso del suelo, ocasionados por un error de etiquetado en las fuentes de información.

2.3. Resultados y Discusión

2.3.1. Validación de las Series

Las series de vegetación de INEGI fueron validadas satisfactoriamente con la construcción de una matriz de confusión y 330 sitios del Inventario Forestal Nacional para el estado de San Luis Potosí. La serie II (1993) tuvo una confiabilidad general del 89.7 % y un Kappa de 86.4 %, mientras que la serie IV (2007) mostró un 85.7 % y 81.3 %, respectivamente. Los tipos de vegetación mejor validados en la serie II fueron el bosque de latifoliadas con 112 de 113 aciertos, el matorral con 86 de 89 aciertos, la selva alta perenifolia con 49 de 49 aciertos, el bosque de coníferas con 19 de 19 aciertos y el bosque mixto con 13 de 15. Para la serie IV (2007) los tipos de vegetación mejor validados fueron el bosque de coníferas con 19 de 20 aciertos, el matorral con 78 de 81 aciertos, la selva alta perenifolia con 45 de 46 aciertos y en menor grado desde el punto de vista absoluto la selva caducifolia con 12 de 19.

2.3.2. Tipos de Vegetación y Uso del Suelo

San Luis Potosí se conforma de una vasta diversidad de ecosistemas que varían desde el matorral hasta la selva perennifolia y subperennifolia. En la Figura 2.2. se puede observar que la biodiversidad de ecosistemas obedece a un gradiente de posición geográfica (longitudinal) y altitudinal. La vegetación de la parte occidental del estado de San Luis Potosí es de clima árido. Mientras se avanza hacia el Golfo de México, la humedad ambiental propicia condiciones para que se desarrollen especies de rápido crecimiento, como en la zona Huasteca. Existe también el factor antrópico determinando que grandes extensiones de tierra en la zona Huasteca sean la base de actividades primarias como la agricultura o el pastoreo.

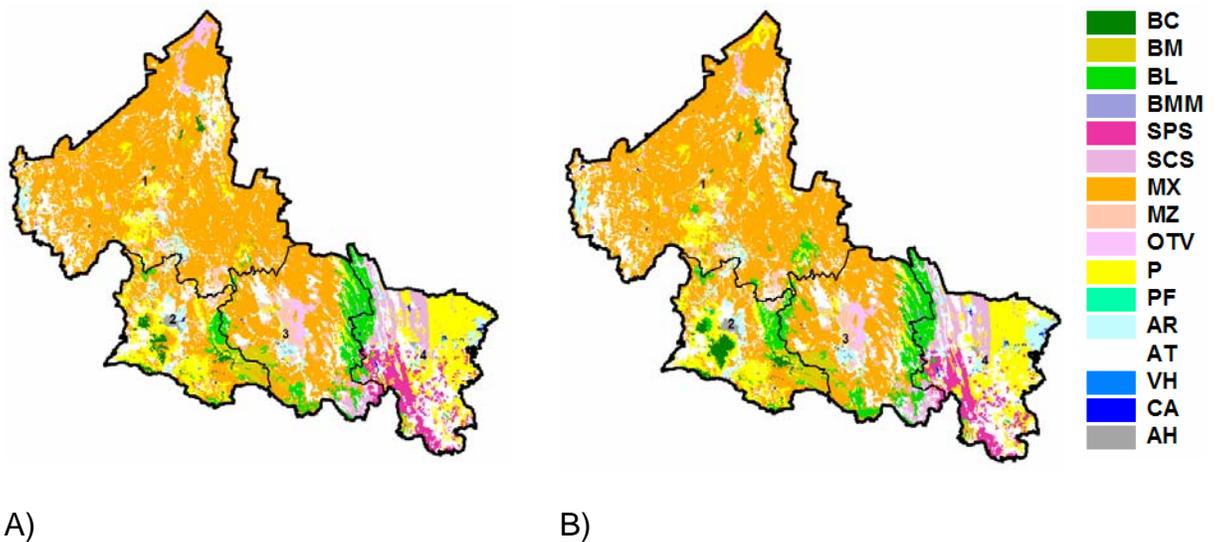


Figura 2.2. Mapa de vegetación y uso anterior del suelo. A) Serie II (1993) y B) IV (2007).

2.3.3. Análisis de Cambio

2.3.3.1. A Nivel Estatal

El análisis realizado para la detección del cambio de uso del suelo en el estado de San Luis Potosí encontró que el 88.3 % del territorio permaneció sin cambio, mientras que el 11.7 % de la superficie presentó algún tipo de cambio. Los porcentajes que se indican en seguida fueron calculados con base en la superficie estatal para propiciar su comparación entre sí y pudieran ser apreciados en la Figura 2.3. La disminución fue especialmente marcada en el matorral donde la pérdida alcanza un 2.3 %; a nivel nacional Velázquez *et al.*, (2002) reportan -0.33 %. La selva perenifolia y caducifolia redujeron su tamaño en un -0.5 % y -0.2 %, respectivamente, siendo ligeramente menores con la tasa nacional que fue de -0.76 %; el pastizal también presentó un decremento considerable de -0.4 %; y en menor grado, el mezquital con un -0.1 % de disminución. Las selvas han sido uno de los tipos de vegetación más afectados por el cambio de uso del suelo ocasionado principalmente por las actividades agrícolas nómadas *v.gr.* roza-tumba-quema (Salazar-Conde *et al.*, 2004).

La deforestación ocurrida durante el periodo 1993-2007 fue de 77,017.3 ha (1.9 %) que implica la pérdida del bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mixto, selva perennifolia y subperennifolia, selva caducifolia y subcaducifolia, matorral y mezquital. Las clases temáticas que incrementaron su área proveniente de la vegetación arbolada fueron principalmente la agricultura de temporal (2.6 %), el pastizal (0.4 %) y la agricultura de riego (0.3 %) del área estatal. La tasa de deforestación anual para el estado de San Luis Potosí fue de 0.14%. La matriz de cambio descrita en la Tabla 2.2. indica el detalle de los cambios ocurridos durante el periodo 1993 a nivel estatal de cada uno de los tipos de vegetación y usos del suelo en hectáreas.

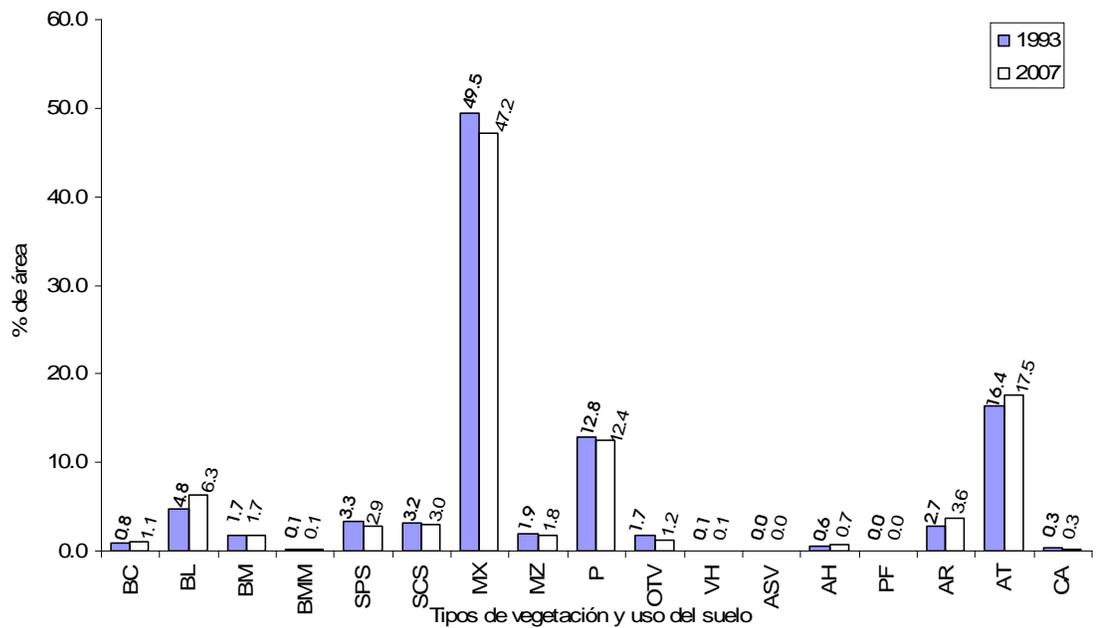


Figura 2.3. Porcentaje de área por cada tipo de vegetación y uso del suelo para las fechas de análisis.

Tabla 2.2. Matriz de cambio de uso del suelo (ha) para la serie II (1993) y serie IV (2007) en San Luis Potosí.

		2007									
		BC	BL	BM	BMM	SPS	SCS	MX	MZ	P	
1993	BC	48812.6	12.0	23.0	0.0	0.0	0.0	355.0	0.0	1212.0	
	BL	4.0	283218.6	259.0	60.0	12.0	232.0	1241.0	3.0	4070.0	
	BM	6.0	342.0	104242.1	3.0	2.0	0.0	222.0	0.0	1142.0	
	BMM	0.0	54.0	3.0	7474.9	2.0	0.0	0.0	0.0	7.0	
	SPS	0.0	44.0	2.0	3.0	159062.6	3480.0	0.0	0.0	19023.8	
	SCS	0.0	959.0	1.0	0.0	86.0	169342.6	1845.0	0.0	5339.0	
	MX	18119.8	84663.3	224.0	0.0	0.0	106.0	2776923.4	1417.0	8327.9	
	MZ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1618.0	100426.1	4746.0	
	P	2451.0	7164.9	1395.0	125.0	7075.9	4789.0	6926.9	543.0	653918.4	
	OTV	0.0	3.0	0.0	0.0	144.0	119.0	1644.0	508.0	26101.8	
	VH	0.0	0.0	0.0	0.0	76.0	0.0	0.0	0.0	79.0	
	ASV	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	141.0	0.0	0.0	
	AH	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	5.0	476.0	1.0	21.0	
	PF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	46.0	
	AR	0.0	278.0	0.0	0.0	1264.0	1258.0	8865.9	1493.0	2514.0	
	AT	59.0	6755.9	470.0	47.0	7978.9	6998.9	85272.3	5116.0	34311.7	
	CA	0.0	1.0	0.0	0.0	2.0	3.0	98.0	0.0	50.0	
Total	69452.4	383496.7	106619.1	7712.9	175706.5	186333.4	2885628.4	109507.1	760909.5		

Tabla 2.2. Continuación de la matriz de cambio de uso del suelo para la serie II (1993) y serie IV (2007) en San Luis Potosí.

	10	11	12	13	14	15	16	17	
	OTV	VH	ASV	AH	PF	AR	AT	CA	Total
BC	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	457.0	0.0	50872.6
BL	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	179.0	5573.0	1.0	294853.5
BM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	192.0	0.0	106151.1
BMM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	87.0	0.0	7627.9
SPS	17.0	127.0	0.0	4.0	0.0	3845.0	17628.8	1.0	203238.3
SCS	63.0	0.0	0.0	412.0	0.0	2545.0	15240.9	6.0	195839.3
MX	2380.0	0.0	98.0	1067.0	0.0	17244.9	114196.0	56.0	3024823.2
MZ	992.0	0.0	0.0	50.0	0.0	2881.0	7352.9	2.0	118068.0
P	362.0	265.0	0.0	1848.0	5.0	38628.7	56990.5	96.0	782584.3
OTV	71317.4	1.0	0.0	51.0	0.0	1473.0	3139.0	438.0	104939.1
VH	15.0	2108.0	0.0	0.0	0.0	373.0	481.0	1.0	3133.0
ASV	0.0	0.0	62.0	0.0	0.0	0.0	2.0	777.0	982.0
AH	2.0	0.0	11.0	32945.7	52.0	149.0	1059.0	17.0	34740.7
PF	0.0	0.0	0.0	41.0	82.0	0.0	20.0	0.0	189.0
AR	289.0	0.0	0.0	2026.0	0.0	137695.8	12108.9	133.0	167925.6
AT	391.0	100.0	11.0	1873.0	0.0	16999.9	837138.9	45.0	1003568.5
CA	6.0	1126.0	0.0	140.0	0.0	393.0	490.0	14515.9	16824.9
Total	75834.4	3727.0	182.0	40459.7	139.0	222407.1	1072156.9	16088.9	6116360.9

2.3.3.2. A Nivel Zona Biogeográfica

Los mayores incrementos registrados corresponden al bosque de latifoliadas en las zonas Centro (0.54 %), Altiplano (0.48 %) y Media (0.41 %); le sigue la agricultura de temporal en las zonas Huasteca (0.66 %), Altiplano (0.48 %) y Media (0.23 %); la agricultura de riego en las zonas Huasteca (0.63 %) y Altiplano (0.13 %); y finalmente el pastizal en el Altiplano (0.41 %). Las mayores pérdidas de territorio fueron para el matorral en el Altiplano (-1.02%), Centro (-0.70 %) y Media (-0.53 %); para la selva perennifolia y subperennifolia en la Huasteca (-0.38 %) y Media (0.07 %); para la selva caducifolia y subcaducifolia en la Huasteca (-0.10 %) y Media (-0.05 %); y para el pastizal en la Huasteca (-0.80%).

La tasa de cambio anual (%) por clase temática para cada zona biogeográfica está influida por la superficie de cada clase temática para cada fecha, por lo que debe tomarse con reserva; no obstante, para entender mejor

los siguientes porcentajes se recomienda apoyarse en la Tabla 2.3. Los mayores incrementos registrados corresponden al bosque de latifoliadas en las zonas Altiplano (17.2 %), Centro (4.1 %) y Media (1.0 %); le sigue la agricultura de riego en las zonas Huasteca (4.8 %), Altiplano (1.1 %), Centro (1.0 %) y Media (0.4 %); posteriormente, el asentamiento humano en las zonas Huasteca (3.0 %), Centro (1.4 %) y Media (1.2 %). Los mayores decrementos fueron registrados en las áreas sin vegetación en las zonas Altiplano (-11.6 %) y Media (-2.9 %); le siguen otros tipos de vegetación en las zonas Altiplano (-5.2 %), Huasteca (-1.5 %), Centro (-0.6 %) y Media (-0.3 %); el matorral en la Huasteca (-4.4 %), Centro (-1.0 %), Media (-0.4 %) y Altiplano (-0.2 %); y el bosque de coníferas en la zona Centro (2.7 %).

Tabla 2.3. Áreas de cada clase temática por zona biogeográfica para cada fecha de análisis.

N.Clase	Clase	Altiplano		Centro		Media		Huasteca	
		1993	2007	1993	2007	1993	2007	1993	2007
1	BC	7518.9	7758.9	41913.5	60697.2	1312.0	867.0	128.0	129.0
2	BL	3580.0	32942.7	43884.5	77163.0	163956.3	189057.4	83433.6	84334.5
3	BM	6945.9	6999.9	47881.4	48318.4	39987.1	39886.1	11336.8	11414.8
4	BMM					3750.0	3828.0	3877.9	3884.9
5	SPS					15783.0	11450.0	187453.8	164255.2
6	SCS					44958.1	41706.1	150880.4	144626.5
7	MX	2111175.3	2048901.8	314855.1	272278.6	594617.1	562225.1	4180.9	2228.0
8	MZ	29384.8	28784.8	12008.9	9772.9	76675.1	70950.1		
9	P	135775.9	161151.6	223208.2	221747.2	40888.1	44473.1	382708.4	333534.2
10	OTV	56132.5	26628.8	263.0	287.0	41411.1	43153.1	7132.9	5765.9
11	VH							3132.9	3726.9
12	ASV	967.0	172.0			15.0	10.0		
13	AH	10067.9	9208.9	13538.8	16390.8	5965.0	7060.0	5168.9	7799.9
14	PF			189.0	139.0				
15	AR	51602.6	59826.5	39268.5	44878.4	36091.1	38373.1	40963.3	79328.6
16	AT	427090.4	456718.2	149781.1	135814.3	186377.4	198799.4	240318.8	280824.1
17	CA	3802.0	4949.0	3196.0	2501.0	1357.0	1305.0	8469.9	7333.9
	Total	2844043.2	2844043.2	889988.0	889988.0	1253143.4	1253143.4	1129186.5	1129186.5

La tasa de deforestación anual por zona biogeográfica de San Luis Potosí se puede observar en la Tabla 2.4, donde se indica la superficie arbolada inicial (1993) y la superficie arbolada final (2007). En términos absolutos, el

Altiplano potosino fue quien presentó la mayor cantidad de territorio deforestado (-33,216.7 ha), siguiéndole la Huasteca (-30,418.5 ha), la zona Media (-21,069.1 ha) y finalmente la zona Centro (7,686 ha). No obstante, respecto al área inicial de cada clase temática, quien está perdiendo a un mayor ritmo la superficie arbolada se encuentra la Huasteca, siguiendo las zonas Media, Centro y por último el Altiplano.

Tabla 2.4. Cambio total en vegetaciones arboladas y tasa de deforestación anual por zona biogeográfica.

Zona	S₁	S₂	DIF	CTE %	TD %
Altiplano	2,158,604.9	2,125,388.2	-33,216.7	-0.54	0.11
Centro	460,543.3	468,230.2	7,686.9	0.13	-0.12
Media	941,038.8	919,969.7	-21,069.1	-0.34	0.16
Huasteca	441,291.4	410,872.9	-30,418.5	-0.5	0.51

2.3.3.3. Degradación/Deforestación

La degradación y la deforestación que existen en la zona Huasteca son evidentes en la Figura 2.4. y se explican por el cambio de uso del suelo, de selva a agricultura de temporal, a agricultura de riego y pastizal; esto se confirma con los resultados de Reyes-Hernández *et al.* (2006) en los municipios de Tamuín, Ebanó y San Vicente Tancuayalab, propiciado por las condiciones topográficas planas, la considerable humedad disponible en el ambiente y los apoyos asignados a la reactivación del agro en esa región. En el municipio de Xilitla se presentó la deforestación de bosque mesófilo de montaña a agricultura de temporal. En los municipios de Tamasopo, Naranjo y Tampacán la deforestación observada fue del bosque de latifoliadas a agricultura de temporal y pastizal. Mientras que la degradación en todos los municipios se presentó en el pastizal cambiando a agricultura de temporal y riego.

La zona Media presentó considerables superficies deforestadas donde el mezquital dió paso a pastizal, asentamiento humano, agricultura de riego, de temporal, otros tipos de vegetación en los municipios de Villa Juárez, Ciudad del Maíz, Río Verde, Alaquines y Cárdenas. Por otro lado, los bosques cambiaron a pastizal, agricultura de temporal, en los municipios de Ciudad del

Maíz, Río Verde, San Nicolás Tolentino, Alaquines, Cardenas, Rayón, Lagunillas, Santa Catarina y San Ciro de Acosta. Las selvas cambiaron a agricultura de temporal, riego y pastizal en los municipios de Río Verde, Ciudad Fernández, Rayón, Lagunillas y Santa Catarina. El matorral xerófilo cambió a asentamiento humano, pastizal y agricultura de temporal en los once municipios que corresponden a la zona centro. La degradación se presenta principalmente en el matorral xerófilo.

En la zona Centro con la ausencia de humedad la deforestación fue en menor cantidad con respecto a la zona de la Huasteca y Media. Se evidencía el cambio principalmente de matorral xerófilo a pastizal, asentamiento humano y agricultura de temporal en los once municipios que conforman esta zona. Los bosques cambiaron a pastizal y agricultura de temporal en la mayoría de los municipios excepto en los conurbados a la zona metropolitana de San Luis Potosí como Soledad de Graciano Sánchez y Cerro de San Pedro. Y la presencia de deforestación del mezquital a agricultura de riego y temporal fue en menor cantidad para los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Armadillo de los Infante, Cerro de San Pedro, Villa de Reyes y Santa María del Río.

Finalmente en la zona del Altiplano la deforestación fue mínima siendo el más afectado el mezquital que cambió a pastizal y agricultura de riego, en los municipios de Charcas, Guadalcázar, Villa de Ramos, Venado, Villa Hidalgo y Moctezuma. El matorral xerófilo cambió a pastizal, asentamiento humano en los municipios de Santo Domingo, Villa de la Paz, Guadalcázar, Salinas, Villa de Ramos, Venado y Moctezuma. La degradación del matorral xerófilo estuvo presente en todos los municipios de la zona Altiplano y del mezquital solamente en el municipio de Villa de Ramos.

Como dato interesante, los municipios de Alaquines, Villa Juárez, Rayón, San Ciro de Acosta, San Nicolás Tolentino, Mexquitic de Carmona, Tierra Nueva y Santo Domingo, la CONAPO reporta un muy alto grado de intensidad migratoria de la población, coincidiendo con los municipios que presentan

grandes extensiones de áreas sin cambio (CONAPO, 2002). Esto resulta interesante en la búsqueda de las causas de la conservación de los tipos de vegetación en las diferentes zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí.

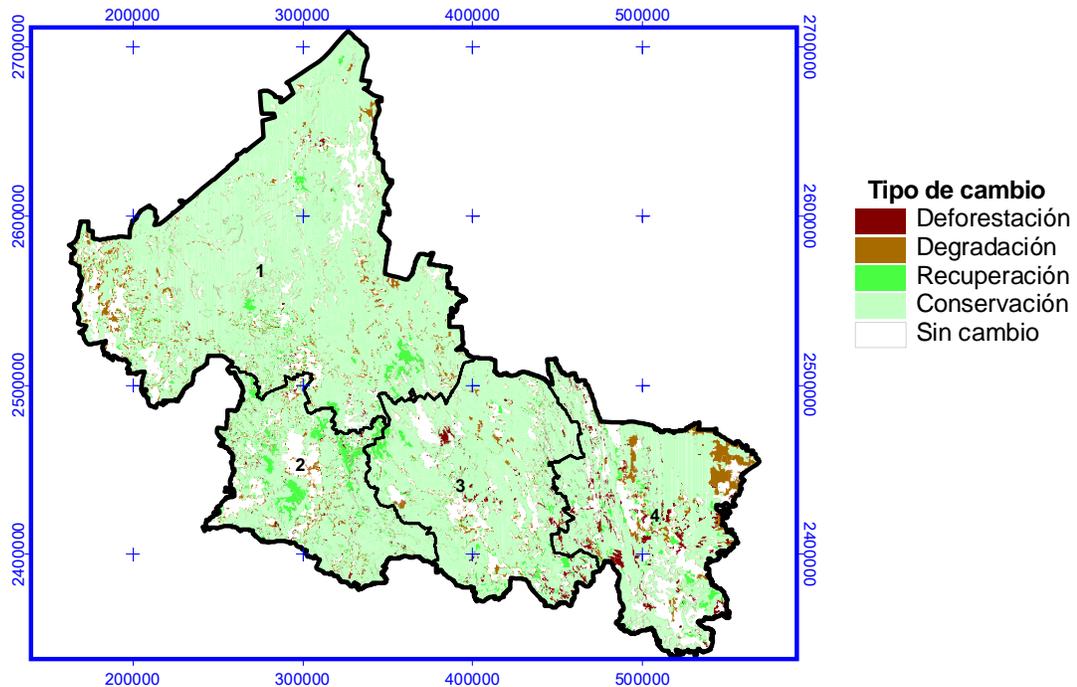


Figura 2.4. Mapa de cambio de uso del suelo. 1. Altiplano, 2. Centro, 3. Media y 4. Huasteca.

En las zonas áridas y semiáridas del país para el caso de matorrales, el escenario no ha sido diferente. Este tipo de ecosistemas también ha sido afectado fuertemente por procesos de degradación/deforestación. Márquez-Linares *et al.* (2005) reportan una tasa de deforestación anual de -2.4 % de las áreas arboladas en una microcuenca que abastece de agua a amplias regiones agrícolas del valle del Guadiana en Durango. Las causas de dicha deforestación fueron el cambio hacia pastizal (ganadería extensiva), a agricultura de temporal, por la extracción de leña y por la presencia de incendios forestales. Antonio-Némiga *et al.* (2006) analizaron el cambio de uso del suelo en la subcuenca del Río Pílon en el estado de Nuevo León desde dos perspectivas: Llanura Costera y Sierra Madre. Ellos concluyen que ambas provincias difieren notablemente, ya que mientras la frontera agrícola tiende a

avanzar sobre los matorrales en la Llanura Costera, en la Sierra Madre, los matorrales y los bosques tienden a permanecer. Esto puede ser explicado por la creciente población y la expansión de la agricultura propias de la llanura, siendo el agente de cambio de la vegetación. Rosete-Verges *et al.* (2009) reportan un fuerte proceso de desmonte sucedido durante 22 años en donde dichas áreas son reemplazadas por pastizales, agricultura de temporal y asentamientos humanos. Evidencias de recuperación del ecosistema también existen, aunque hay muy pocos estudios que lo justifiquen. Chapa-Bezanilla *et al.* (2008) señalan que los matorrales de pingüica *Arctostaphylos pungens* se han mantenido al paso del tiempo sugiriendo un equilibrio en las tasas de aprovechamiento y la recuperación del ecosistema.

En las zonas templadas, los bosques de coníferas, latifoliadas y mixtos han cedido superficie a las áreas agrícolas de temporal y pastizales (Pinedo-Álvarez *et al.* 2007). Diversos autores han encontrado diferentes tasas de deforestación en sus trabajos. Por ejemplo, Pineda-Jaimes *et al.* (2008) reportan para el estado de México una deforestación de 13,691 ha de los bosques de coníferas, latifoliadas, mixto y mesófilo de montaña; Franco-Maass *et al.* (2006) estimaron una tasa de deforestación de 8.4 % de bosques de coníferas y latifoliadas en el parque Nacional Nevado de Toluca para el periodo 1972-2000. Gómez-Mendoza *et al.* (2006) exploraron las tendencias de la deforestación en la Sierra Norte de Oaxaca durante el periodo 1980-2000 encontrando que la tasa de deforestación anual para los bosques templados fue de 3 % con un cambio marcado a agricultura de temporal.

Reyes-Hernández *et al.* (2006) presentaron resultados indicando que más de 73,000 ha de selva baja espinosa, selva baja caducifolia y selva mediana subperennifolia fueron deforestadas a una tasa anual del 11 % durante 1973-2000 principalmente por la reconversión de terrenos forestales a actividades ganaderas en la zona Huasteca potosina. Castelán *et al.* (2007) en su estudio sobre la deforestación de la región de la subcuenca del río San

Marcos, Puebla encontraron que las selvas fueron afectadas en gran medida por la reconversión de terrenos forestales a actividades ganaderas a una tasa del 17.52 % anual. Flamenco-Sandoval *et al.* (2007) analizaron las tendencias de la deforestación dentro y fuera de la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote ubicada en el Estado de Chiapas, siendo de 5.94 % y 1.05 % respectivamente.

2.4. Conclusiones

La dinámica de uso del suelo fue similar en las zonas biogeográficas Altiplano y Media de San Luis Potosí. La agricultura de temporal y el pastizal desplazaron al matorral principalmente en los municipios de Villa Hidalgo, Moctezuma y Vanegas. La zona Centro donde se encuentra la zona metropolitana de San Luis Potosí registró una tasa de deforestación positiva (0.13 %), es decir, recuperación. El matorral mejoró su densidad forestal y en la cartografía se mapeó como bosques de coníferas con vegetación secundaria interpretándolo como una recuperación en los municipios de San Luis Potosí y Villa de Reyes en la Sierra de San Miguelito y Armadillo de los Infante en la Sierra de Álvarez. Mientras que para el caso de la zona Media los municipios que registraron una recuperación fueron San Nicolás Tolentino y Santa Catarina. La zona Huasteca fue la más afectada por la deforestación explicada en el cambio de selva perennifolia y subperennifolia a agricultura de temporal en los municipios de Aquismón, Tamasopo, Tamuín y Cd. Valles, entre otros. Aunque se registraron altos valores absolutos en deforestación, las tasas fueron relativamente bajas y probablemente tuvieron una influencia de los valores involucrados en su cálculo. Es por ello que en estudios de este tipo se deben considerar diferentes índices de cambio para generar una idea más precisa de la dinámica de cambio en la zona de estudio. Esta investigación representa la línea base a nivel estatal y plantea ser una fuente interesante de información sobre el monitoreo del cambio en los recursos forestales de la entidad durante 1993-2007.

2.5. Literatura Citada

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H. (Ted), González, P., Fensham, R. Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., and Cobb, N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. 259: 660–684.
- Antonio-Némiga, X., Treviño-Garza, E.J., Jiménez-Pérez, J., Villalón-Mendoza, H. y Návar-Chaidez, J.J. 2006. Cambios en la vegetación en la subcuenca del Río Pílon, Nuevo León, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12(1):5-11.
- Apezteguía, H.P., Izaurrealde, R.C. and Sereno, R. 2009. Simulation study of soil organic matter dynamics as affected by land use and agricultural practices in semiarid Cordoba, Argentina. *Soil & Tillage Research*. 102:101–108.
- Castelán-Vega, R., Ruíz-Careaga, J., Linares-Fleites, G., Pérez-Avilés., R. y Tamariz-Flores, Victor. 2007. Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 64:75-89.
- Chapa-Bezanilla, D., Sosa-Ramírez, J. y de Alba-Ávila, A. 2008. Estudio multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques*. 14(1):37-51.
- Consejo Nacional de Población CONAPO. (2002). Índices de intensidad migratoria México-Estados Unidos 2000. México, D.F.: Consejo Nacional de Población.
http://www.conapo.gob.mx/publicaciones/migracion/intensidadmig/CUA_AB_IIM2000.XLS.

- Couturier, S. y Jean-Francois, M. 2009. ¿Qué tan confiable es una tasa de deforestación? ¿Cómo evaluar nuestros mapas con rigor estadístico?. *Investigación ambiental*. 2:117-135.
- FAO. 1996. *Forest Resources Assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. No. 130. 152 p.
- FAO. 2010. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal. Estudio FAO Montes*. No. 163. p. 23.
- Flamenco-Sandoval, A., Martínez-Ramos, M. and Masera, O.M. 2007. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological Conservation*. 138:131-145.
- Franco-Mass, S., Regil-García, H.H. y Ordóñez-Díaz, J.A.B. 2006. Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques*. 12(1):17-28.
- García-Mora, T.J. y Mas, J. 2008. Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*. 67:7-19.
- Gómez-Mendoza, L., Vega-Peña, E., Ramírez, M.I. Palacio-Prieto, J.L. and Galicia, L. 2006. Projecting land-use change processes in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico. *Applied Geography*. 26:276–290.
- Márquez-Linares, M.A., Treviño-Garza, E.J. and Jurado, E. 2005. Reemplazo de áreas arboladas por chaparrales y comunidades herbáceas en el periodo 1970-2000 en una microcuenca de Durango, México. *Investigaciones Geográficas*. 58:54-65.
- Ordoñez-Díaz, J.B. 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias*. (90):37-42.
- Pineda-Jaimes, N.B., Bosque-Sendra, J., Gómez-Delgado, M. y Plata-Rocha, W. 2008. 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-Alvarez, C., Pinedo-Alvarez, A., Quintana-Martínez, A. y Martínez-Salvador, M. 2007. Análisis de áreas deforestadas en la región centro-norte de la Sierra Madre Occidental, Chihuahua, México. *Tecnociencia*. 1(1):36-43.
- Reyes-Hernández, H., Aguilar-Robledo, M., Aguirre-Rivera, J.R. y Trejo-Vázquez, I. 2006. Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 59:26-42.
- Rosete-Vergés, F., Pérez-Damián, J.L. y Bocco, G. 2009. Contribución al análisis de cambios de uso del suelo y vegetación (1978-2000) en la Península de Baja California, México. *Investigación ambiental*. 1:70-82.
- Salazar-Conde, E.C., Zavala-Cruz, J., Castillo-Acosta, O., Cámara-Artigas, R. 2004. Evaluación espacial y temporal de la vegetación de la Sierra Madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*. 54:7-23.
- SEGAM. y UASLP. 2008. Ordenamiento Ecológico del Estado de San Luis Potosí. Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental del Estado de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Agenda Ambiental. 404 p. Disponible en línea en: <http://www.segam.gob.mx/descargas.htm>. Consultado: 18 de septiembre de 2010.
- Velázquez, A., Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P.C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., y Palacio, J.L. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica, Instituto Nacional de Ecología*. 62:21-37.

CAPÍTULO 3

MONITOREO INTERANUAL DEL NDVI MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN SERIES DE TIEMPO Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN ANUAL: 2000-2010¹

Resumen

Actualmente, la disponibilidad de datos satelitales en series de tiempo ofrece diferentes opciones para el estudio del ambiente de formas casi imposibles de replicar con métodos de medición tradicionales. Este trabajo monitorea los cambios interanuales en la vegetación usando datos satelitales hipertemporales de resolución media en el estado de San Luis Potosí, México y datos de precipitación. Se emplearon 489 imágenes del producto combinado MODIS MCD43A4 (500 m, resolución espacial) correspondientes al periodo 2000-2010 (11 años). Se realizaron compuestos temporales anuales de índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) usando la técnica de máximo valor compuesto (MVC, por sus siglas en inglés); el análisis de la serie de tiempo anual se realizó mediante la técnica estadística multivariada de Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés), donde la interpretación del segundo componente principal (PC, por sus siglas en inglés) fue quien recogió el detalle de los cambios observados. Se observó una relación altamente significativa ($p = 0.01$) entre el NDVI máximo anual y la precipitación anual; además de una tendencia ligeramente a la alza.

Palabras clave: Análisis de componentes principales, máximo valor compuesto, MODIS, MCD43A4.

¹ Publicado: Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E.J., Aguirre-Calderón, O.A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M.A., Pompa-García, M. and Aguirre-Salado, C.A. 2012b. NDVI-rainfall relationship using hyper-temporal satellite data in a portion of North Central Mexico (2000-2010). African Journal of Agricultural Research. 7(6):1023-1033. DOI: 10.5897/AJAR11.1674.

Abstract

Nowadays, availability of time-series satellite data offers several options to study natural environment in ways almost unattainable to repeat by traditional measurement approaches. This work was focused in monitoring vegetation using moderate spatial resolution imagery and rainfall data in the San Luis Potosí state, Mexico. A hipertemporal dataset comprising 489 MODIS MCD43A4 imagery (500 m spatial resolution) taken over the last 10 years (2000-2010) were used. 10 temporal yearly composites were constructed by fusing Normalized Difference Vegetation Indices (NDVI) data along each year using the Maximum Composite Value approach. The time series dataset was also fused using the Principal Component Analysis technique where the interpretation of the second principal component captured the main anomalies in maximum yearly NDVI values. It was observed a highly significant relationship between maximum yearly NDVI and annual precipitation; finally a slightly upward NDVI trend was observed.

Keywords: Principal component analysis, maximum value composite, MODIS, MCD43A4.

3.1. Introducción

El estudio sobre la tendencia temporal de la vegetación y precipitación para grandes regiones ha sido fundamental para analizar los efectos de las variaciones del clima en diferentes escalas espaciales y temporales (Vicente-Serrano *et al.*, 2009). Esto ha sido posible con el lanzamiento de sensores satelitales de cobertura espacial amplia y un gran detalle temporal.

Uno de los índices ampliamente utilizados para el monitoreo cuantitativo de la vegetación es el NDVI. La actividad fotosintética y consecuentemente la densidad de la vegetación está correlacionada positivamente con este índice propuesto inicialmente por Rouse *et al.* (1973) y probado en una serie de trabajos que le confieren un alto grado de popularidad. Entre los trabajos que emplean datos de NDVI en series de tiempo se destacan la caracterización de los cambios en la vegetación asociados a la fenología y el clima (Anyamba y Tucker, 2005; Vicente-Serrano *et al.*, 2006; Verbesselt *et al.*, 2010), al monitoreo interanual del cambio (Lasaponara, 2006), a la fenología de combustibles forestales (Bajocco *et al.*, 2010), al cambio en el uso del suelo (Lunetta *et al.*, 2006), al monitoreo de la precipitación (Immerzeel *et al.*, 2009; Kileshye *et al.*, 2009), entre otros.

Los sensores satelitales usados en investigaciones de series de tiempo para el monitoreo del NDVI son de baja resolución espacial pero con una alta densidad temporal en la información. Entre los sensores más utilizados han sido el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) con resolución espacial nominal en dos modos: 8 km (Global) y 1 km (Local); y el SPOT VEGETATION (1-2) generado y administrado por un equipo de países europeos. A partir del año 1999, con el lanzamiento de los satélites EOS-AM1 y EOS-PM1, Aqua y Terra respectivamente, la NASA en un esfuerzo colaborativo multinacional amplió los horizontes de monitoreo espaciotemporal para grandes regiones ya que se les instaló el sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) (36 bandas) que incorporó una resolución espacial mejorada de 1000 m (29

bandas), 500 m (5 bandas) y 250 m (2 bandas). El sensor MODIS ofrece una diversidad de productos satelitales dirigidos a diferentes usos y aptos para ser empleados en aplicaciones científicas, entre los que destacan la reflectancia de diferentes bandas del espectro visible y el infrarrojo, la emisividad (temperatura y puntos de calor) así como productos procesados como índice de área foliar, productividad primaria neta, tipo de cobertura, entre otros (NASA, 2009).

Uno de los productos de mayor calidad radiométrica es la reflectancia ajustada al nadir mediante una función de distribución bidireccional (NBAR, por sus siglas en inglés) obtenida para siete canales del espectro visible e infrarrojo y se codifica con la clave MCD43A4 (Opazo y Chuvieco, 2007; Gallaun *et al.*, 2009; Bhadury *et al.*, 2010). En este sentido, el objetivo principal de este trabajo fue analizar la tendencia interanual de la vegetación usando todo el archivo disponible a la fecha (2000-2010) de imágenes del producto MODIS combinado MCD43A4 (500 m de resolución espacial mejorada) y su relación con la precipitación total anual de la última década en San Luis Potosí, México.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Área de Estudio

San Luis Potosí se localiza en la porción centro norte de México y tiene una superficie de 6'116,360.91 ha. Se ubica entre los paralelos 21° 07' y 24° 22' de latitud norte y los meridianos 98° 20' y 102° 17' de longitud oeste. El estado se encuentra en el límite norte (23° 27' N, Figura 3.1) de la zona intertropical y cuenta con una riqueza de paisajes y condiciones de vegetación que puede ser comprendida analizando las zonas geográficas que lo componen: (1) Altiplano, (2) Centro, (3) Media y (4) Huasteca (INEGI, 2002). Esta distribución de ecosistemas obedece a la conformación orográfica, al patrón de distribución de precipitación que proviene del Golfo de México y a la relación inversa existente entre la temperatura y la altitud propia de estas latitudes. Los vientos cargados de humedad que precipitan en la Sierra Madre Oriental (Zona Media y Huasteca) y aunado al gradiente altitudinal, propician formaciones vegetales de clima tropical (selva) y templado (bosques); mientras que los vientos avanzan

continente adentro, la vegetación va cambiando progresivamente hasta observar vegetación árida como matorral.

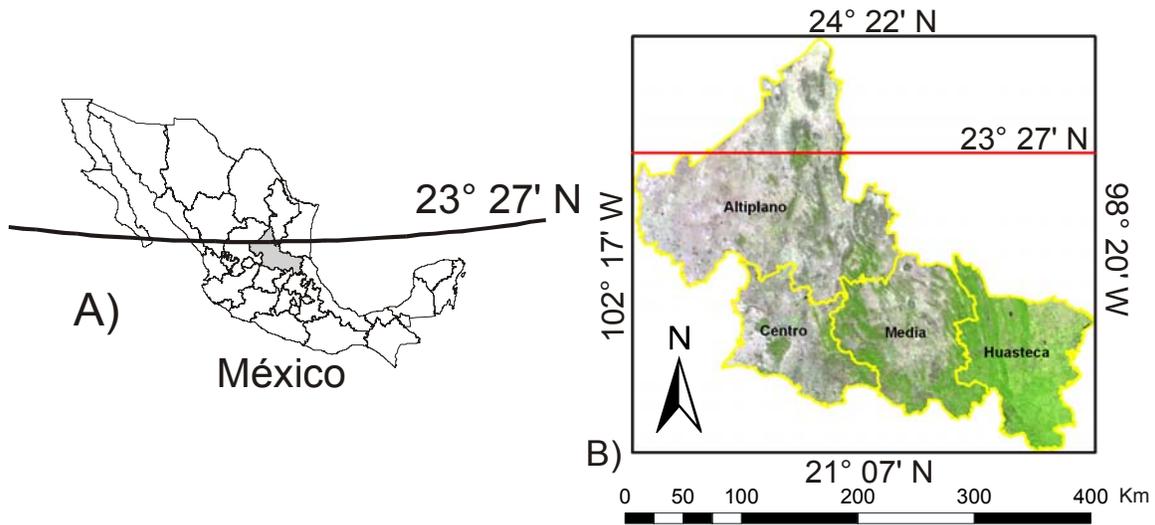


Figura 3.1. Ubicación del área de estudio. A) San Luis Potosí, México. B) Imagen de satélite MODIS MCD43A4.

3.2.2. Datos Espectrales

Se seleccionó el producto MCD43A4 que se obtiene combinadamente del sensor MODIS instalado en los satélites Aqua y Terra; contiene valores de reflectancia (ρ) ajustada al nadir (NBAR, por sus siglas en inglés) mediante una función de distribución de reflectancia bidireccional. MCD43A4 integra datos multifecha tomados durante periodos de 16 días para minimizar la presencia de nubes y además se encuentra corregido atmosféricamente. Tiene una resolución espacial de 500 m y una resolución espectral de siete bandas distribuidas en las siguientes longitudes de onda: 1. Rojo (620 - 670 nm), 2. Infrarrojo cercano (841 - 876 nm), 3. Azul (459 - 479 nm), 4. Verde (545 - 565 nm), 5. Infrarrojo medio₁ (1230 - 1250 nm), 6. Infrarrojo medio₂ (1628 - 1652 nm), 7. Infrarrojo medio₃ (2105 - 2155 nm) (Bhaduri *et al.*, 2010). Para este trabajo se emplearon datos espectrales correspondientes a once años desde el año 2000 (39 imágenes por año) hasta el año 2010 (45 imágenes por año en 10 años, en periodos de cada 16 días), obtenidos de la interface denominada MODIS Reprojection Tool

(MRTWeb) (Daucsavage *et al.*, 2010). Estos datos fueron obtenidos para las coordenadas extremas del área de interés y fueron reproyectados al sistema UTM-14N.

3.2.3. Métodos

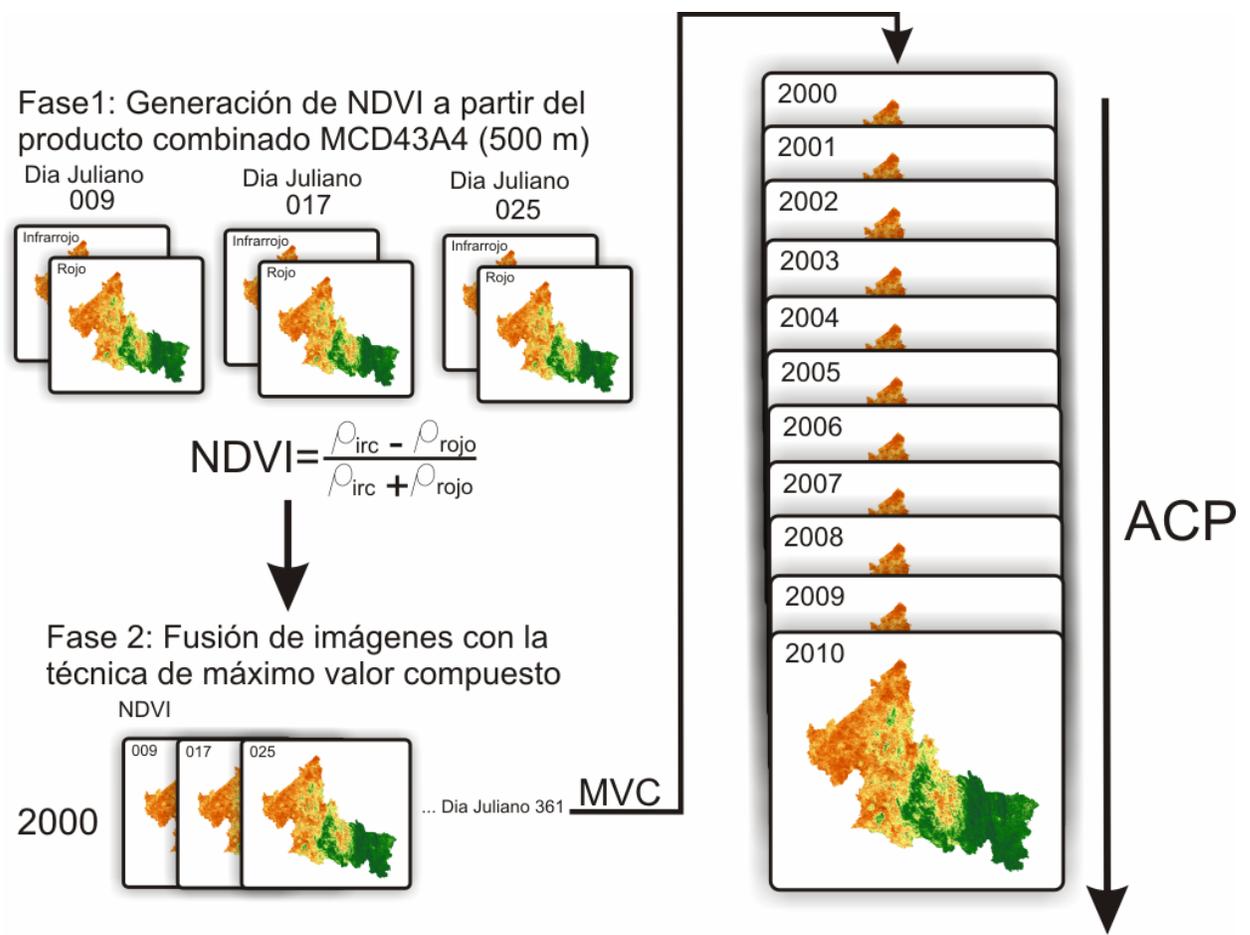
La metodología para el monitoreo de la variación interanual de la vegetación se dividió en tres fases (Figura 3.2). En la Fase 1, se calculó para cada imagen de cada fecha el índice de vegetación de diferencias normalizadas $NDVI = (\rho_{irc} - \rho_{rojo}) / (\rho_{irc} + \rho_{rojo})$, donde ρ_{irc} = reflectancia en el infrarrojo cercano y ρ_{rojo} = reflectancia en el rojo (Rouse *et al.*, 1973). En la Fase 2, se fusionaron las imágenes de NDVI correspondientes para cada uno de los años mediante el algoritmo del máximo valor compuesto (MVC) en una sola imagen de NDVI anual (Holben, 1986; Hernández-Leal, 2005). Este método captura la variabilidad temporal intra-anual de la vegetación en una sola imagen y minimiza la presencia residual de nubes o bruma bajo el supuesto que un alto valor de NDVI corresponde a un píxel cubierto por vegetación.

Para detectar la variación interanual se aplicó el ACP a la serie de tiempo. Este método fusiona las imágenes en un conjunto de nuevas variables (imágenes) que capturan la variabilidad temporal de la serie de tiempo. El razonamiento matemático del ACP puede ser revisado a detalle en Lasaponara *et al.* (2006). La primera variable generada o componente principal (PC_1) recoge lo que es común en los años de análisis, mientras que el segundo componente (PC_2) captura las anomalías o diferencias detectadas en la serie de tiempo. Un indicador de la fecha de los cambios detectados es la correlación o carga de cada componente con las imágenes anuales originales. La correcta interpretación de los componentes depende entonces de la correlación mencionada con la fecha de análisis y su signo (\pm). Si el signo de la carga es positivo, el valor del segundo componente se interpreta directamente es decir, los valores positivos corresponden a ganancias en la vegetación mientras que en valores negativos se interpretan como pérdidas en la vegetación (deforestación). Si el signo de la carga es negativo, el valor del segundo componente se

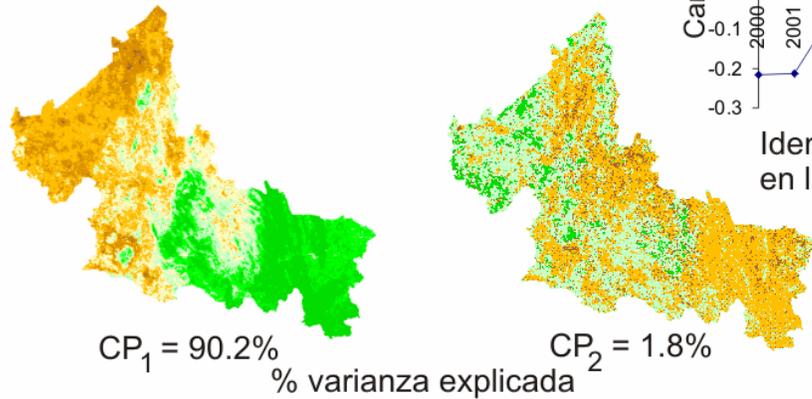
interpreta de manera inversa; valores positivos corresponden a pérdidas de vegetación mientras que valores negativos corresponden a ganancias en la vegetación.

En la Fase 3 se fusionaron las once imágenes de máximo NDVI anual (2000-2010) mediante ACP que recoge la variabilidad espacio-temporal de la radiometría de cada píxel. Para determinar los cambios se clasificó el PC₂ usando la desviación estándar de la media (Maldonado *et al.*, 2000). Para este trabajo el PC₂ se dividió en cinco clases: 1. Degradación altamente probable (-3σ a 4σ), 2. Degradación poco probable (-1σ a 2σ), 3. Sin cambio (μ), 4. Recuperación poco probable (1σ a 2σ) y 5. Recuperación altamente probable (3σ a 4σ).

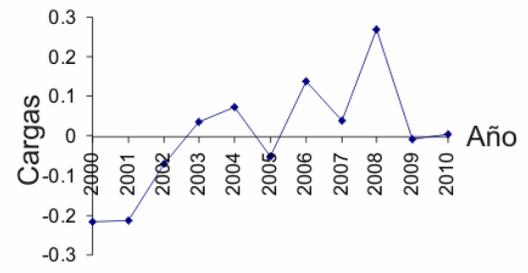
Para analizar la tendencia del NDVI con la precipitación anual se emplearon datos de precipitación para un periodo de 10 años (2000-2009) obtenidos de 54 estaciones seleccionadas que forman parte de la Red de Observatorios Meteorológicos distribuidos en el estado de San Luis Potosí, México y son administrados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) en México. Los datos de precipitación del año 2010 no se incluyeron debido a que aún se encontraban en etapa de procesamiento por la CNA. La correlación se llevó a cabo de dos maneras: 1) relación de la precipitación total anual y el máximo NDVI registrado en la imagen de satélite como un indicador de la dinámica de la vegetación y 2) comparación de los promedios anuales de precipitación y promedios anuales de NDVI. Para visualizar la serie de tiempo completa y analizar la tendencia temporal del NDVI, se graficaron los valores promedio de NDVI (2000-2010) de los píxeles que no presentaron ninguna nube durante el periodo de análisis usando una máscara booleana construida con las 489 imágenes. El procesamiento de imágenes se realizó en el software IDRISI (Eastman, 2006).



Fase 3: Detección del cambio en la serie de tiempo aplicando el análisis de componentes principales.



11 Compuestos anuales MVC



Identificación de cambios en la serie 2000-2010: CP₂

Figura 3.2. Diagrama de flujo de la metodología empleada en el análisis de la serie de tiempo.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Monitoreo Interanual del NDVI

En la Figura 3.3 se observa la tendencia espacio temporal del NDVI máximo anual promedio para el área de estudio; particularmente en el perfil temporal que se muestra en la gráfica inferior de la misma Figura se detectan tres años en los que el NDVI difiere considerablemente de la media general (0.57). El año 2008 presenta un valor arriba de la media (NDVI = 0.62) mientras que los años 2000 (NDVI = 0.52), 2001 (NDVI = 0.53) y 2005 (NDVI = 0.54) muestran valores por debajo de la media.

Esta información puede ser complementada cuando se observa la variabilidad espacial del NDVI en las imágenes correspondientes a los años indicados. En la imagen del año 2008, es evidente un aumento del NDVI intensificado en la parte central del área de estudio conocida como zona media; esta región representa una transición bioclimática entre las zonas áridas del Altiplano y Centro con la zona cálida y húmeda de la Huasteca. Mientras que los años 2000, 2001 y 2005 muestran valores más bajos de la media sugiriendo la existencia de años con una precipitación menor; esto se puede corroborar espacialmente cuando se observa la intensificación del comportamiento cuantitativo de la tonalidad amarillo-naranja en la zona árida para los años 2000, 2001 y 2005.

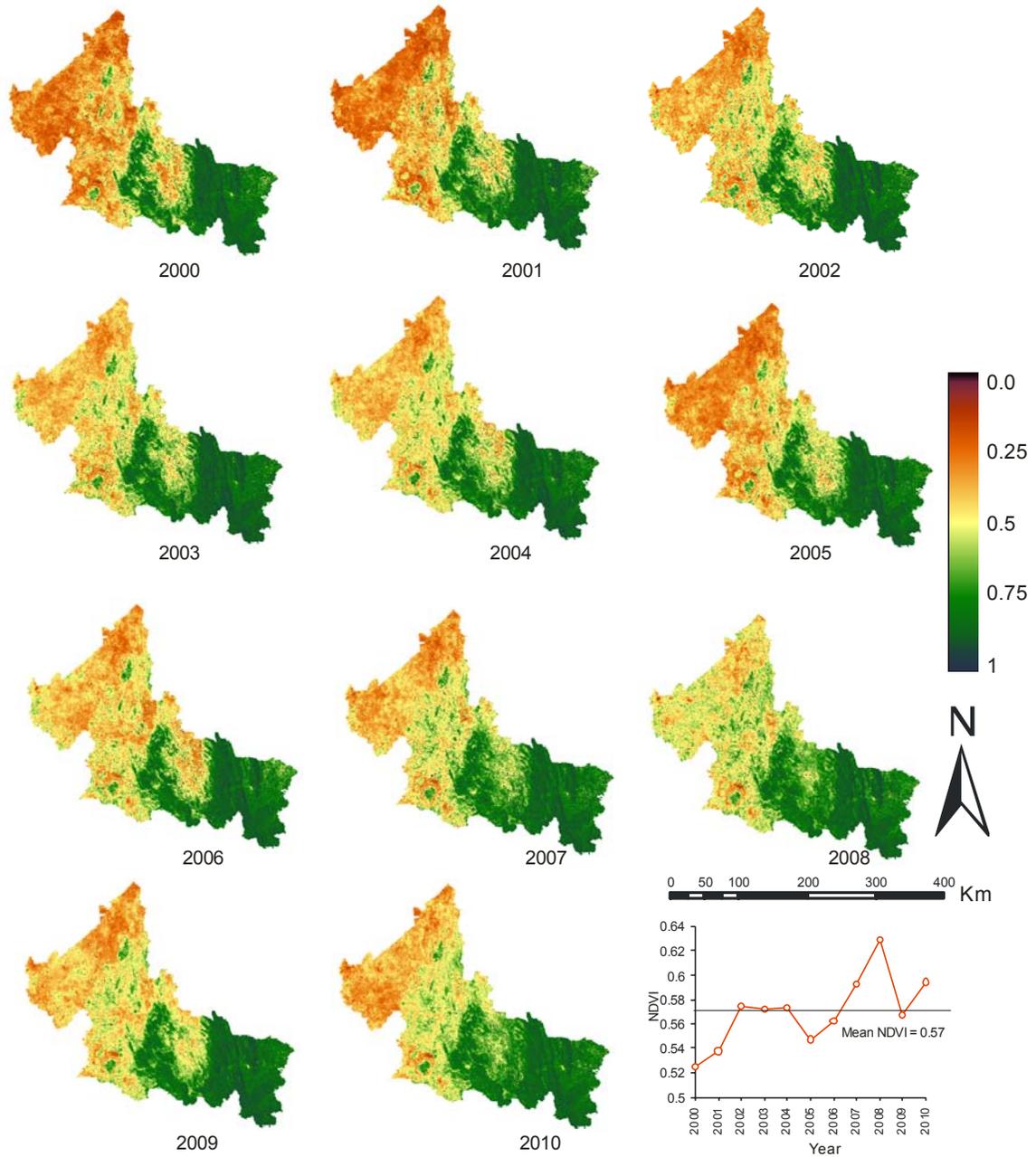


Figura 3.3. Imágenes de Máximo NDVI anual usando la técnica de Máximo Valor Compuesto para el área de estudio.

3.3.2. Análisis de Componentes Principales

En la Figura 3.4 se observa el PC_1 que captura un 90.2% de la varianza total del conjunto de datos y describe los valores comunes de NDVI en todos los años de análisis. Esto se corrobora al observar altas cargas positivas que representan las correlaciones (mayores a 0.92) entre las imágenes anuales compuestas con el máximo NDVI contra el CP_1 ; las tonalidades claras o valores más altos están directamente ligados a la densidad de la vegetación forestal y se encuentran en las zonas boscosas del área de estudio, mientras que los valores con tonalidad más baja corresponden a lugares de clima árido donde la vegetación predominante es matorral. En la misma Figura se muestra el segundo componente principal (PC_2) que recoge el 1.8% de la varianza total de la serie temporal y es atribuible al cambio. Se observó un comportamiento similar en las cargas anuales de PC_2 (Figura 3.5B) con el perfil anual del NDVI de la Figura 3.2, lo cual se corroboró mediante una correlación de Pearson significativa ($r = 0.83$). En ambas gráficas se observa el año donde ocurrieron los cambios de la serie de tiempo; durante el año 2008 (PC_2 loading = 0.27) y el 2000-2001 (PC_2 loading = -0.21). Es interesante notar, la correlación negativa existente entre el PC_2 y el año 2001, se interpreta de manera inversa.

Lasaponara *et al.* (2006) analizaron los cambios en una serie de tiempo de 4 años (1 km de resolución espacial) construida con datos NDVI del sensor SPOT VGT. El segundo componente principal se correlacionó con el cambio en el NDVI en la serie de tiempo, y lo asociaron directamente a cambios en la vegetación tanto naturales o inducidos por el hombre como degradación y recuperación de la vegetación. Los cambios detectados en el tercer y cuarto componente principal, lo asociaron a la respuesta de la vegetación a variables climatológicas como precipitación. Para el caso de este trabajo y dada la amplitud de la serie de tiempo (11 años, 500 m de resolución espacial), se pensó que sería arriesgado el asociar las variaciones en el NDVI anual al cambio de uso del suelo como degradación-recuperación. Esto es posible, pero para ello se

debe aplicar un algoritmo como el de Lunetta *et al.* (2006) que filtra la serie de tiempo, deja solo las variaciones abruptas que se consideran como cambio de uso del suelo; por lo que en este trabajo se interpretó el cambio como la respuesta interanual de la vegetación a la precipitación.

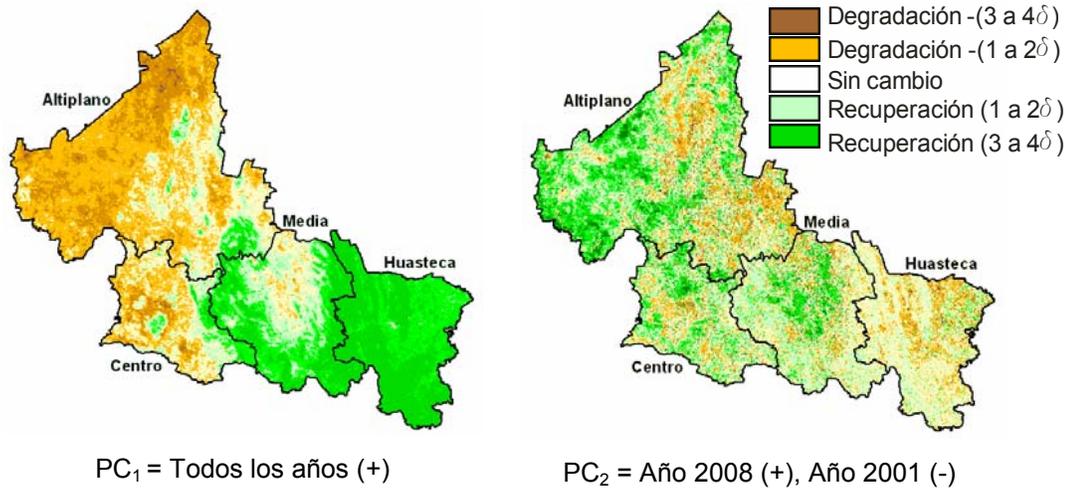


Figura 3.4. Primer y segundo componente principal de la serie de tiempo 2000-2010.

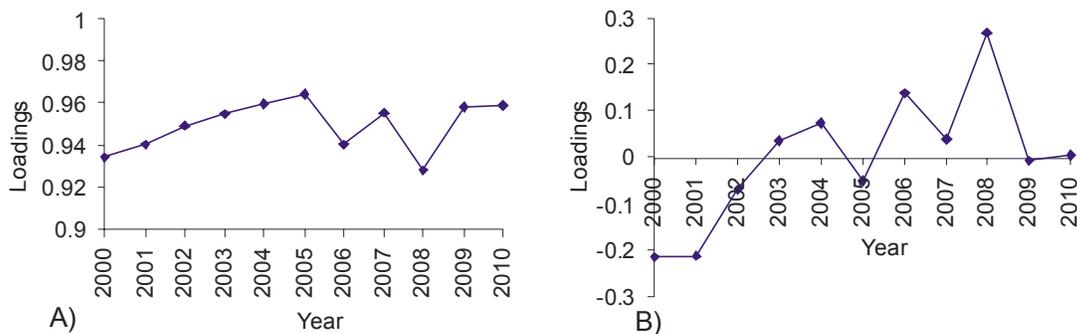


Figura 3.5. Cargas de los primeros dos componentes respecto a las imágenes anuales. A) Primer componente B) Segundo componente.

3.3.3. Relación Precipitación – NDVI

Las variaciones interanuales del NDVI pueden ser correctamente relacionadas con la precipitación total, ya que la humedad determina la producción de biomasa para una temporada de crecimiento (Anyamba y Tucker, 2005; Kileshye y Taigbenu, 2009). En la Figura 3.6 se puede observar una clara tendencia positiva de tipo exponencial entre la precipitación total anual registrada para cada año, desde el año 2000 hasta el año 2009 con el máximo NDVI anual (Immerzeel *et al.*, 2009); los datos 2010 no se incluyeron por encontrarse aun en procesamiento por la CNA. Los valores mas bajos corresponden a las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona árida con precipitaciones que varían entre los 0 y 500 mm; mientras que la precipitación por arriba de 2500 mm proveniente del Golfo de México cae en las partes altas de la zona Huasteca. Mientras que en la Figura 3.7, se aprecia una relación más cercana entre la precipitación y el NDVI ambos promediados para cada año de análisis. En esta gráfica, se observa que el 2008 sobresale como año húmedo y coincide con las imágenes obtenidas de máximo NDVI anual que se muestran en la Figura 3.3.

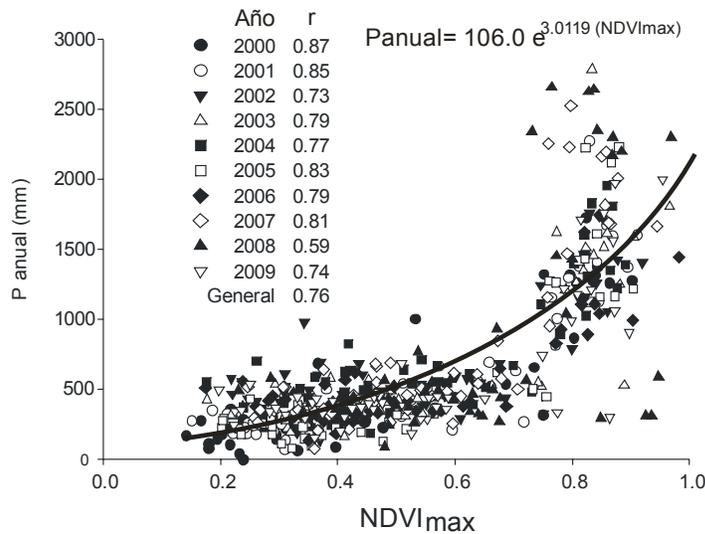


Figura 3.6. Relación entre NDVI máximo anual y precipitación.

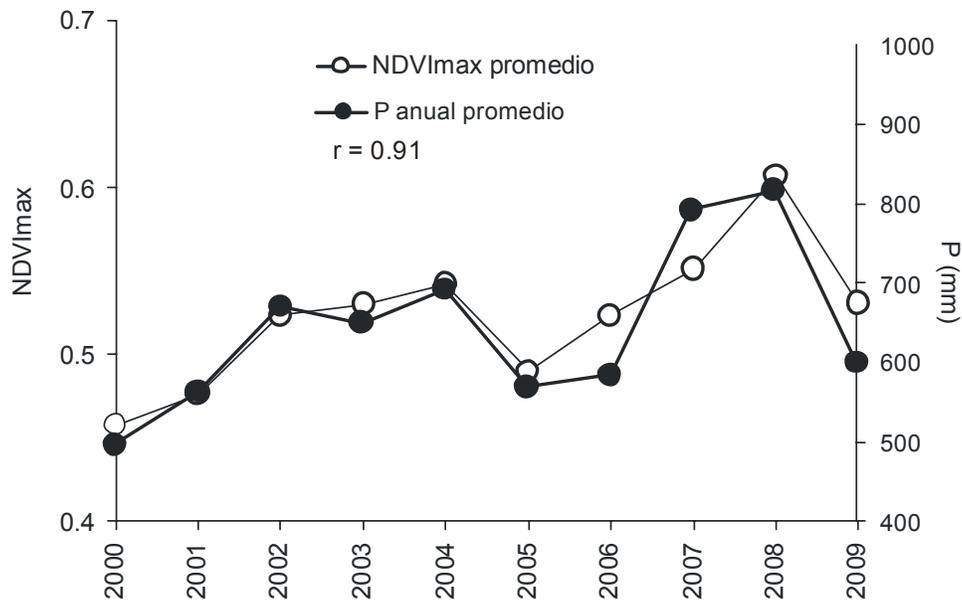


Figura 3.7. Perfil de la precipitación promedio observada y NDVI promedio.

3.3.4. Variación Intra-anual del NDVI

En la Figura 3.8, se puede observar el comportamiento temporal del NDVI promedio para cada una de las 489 imágenes empleadas para el área de estudio. Cada sección en el eje X representa un año de análisis. A lo largo de toda la serie se aprecia una pequeña tendencia temporal significativa ($p = 0.01$) que incrementa el NDVI durante el periodo 2000-2010, y se demuestra en la ecuación de regresión lineal basada en el tiempo. Los resultados de este trabajo coinciden con los publicados por SEMARNAT (2009) donde se asegura que, con base en estudios meteorológicos realizados en la República Mexicana analizando datos de precipitación provenientes de la Base de Datos ERIC III e información de la CNA, la precipitación promedio del año 2020 para San Luis Potosí, México incrementará en un 21.6 y 33.5% respecto al año 2008. Esto traerá consecuencias sociales potencialmente graves en zonas montañosas de difícil acceso e inundaciones en la planicie costera.

En la Figura 3.9 se muestra un acercamiento a las series de tiempo anuales de NDVI, donde es posible detectar la fenología de la vegetación. Aquí se aprecia una disminución consistente del NDVI durante la época de sequía

que se vuelve más intensa a finales de mayo (día juliano 150). Una vez iniciado el periodo de lluvias (aproximadamente en Junio-Julio) se dispara el valor del NDVI con algunas bajas explicadas por el periodo de la sequía intra estival (canícula) donde sus efectos son más evidentes en el follaje de la vegetación. El NDVI alcanza su máximo generalmente en el mes de septiembre (día juliano 270) y disminuye continuamente hasta la época de sequía del siguiente año.

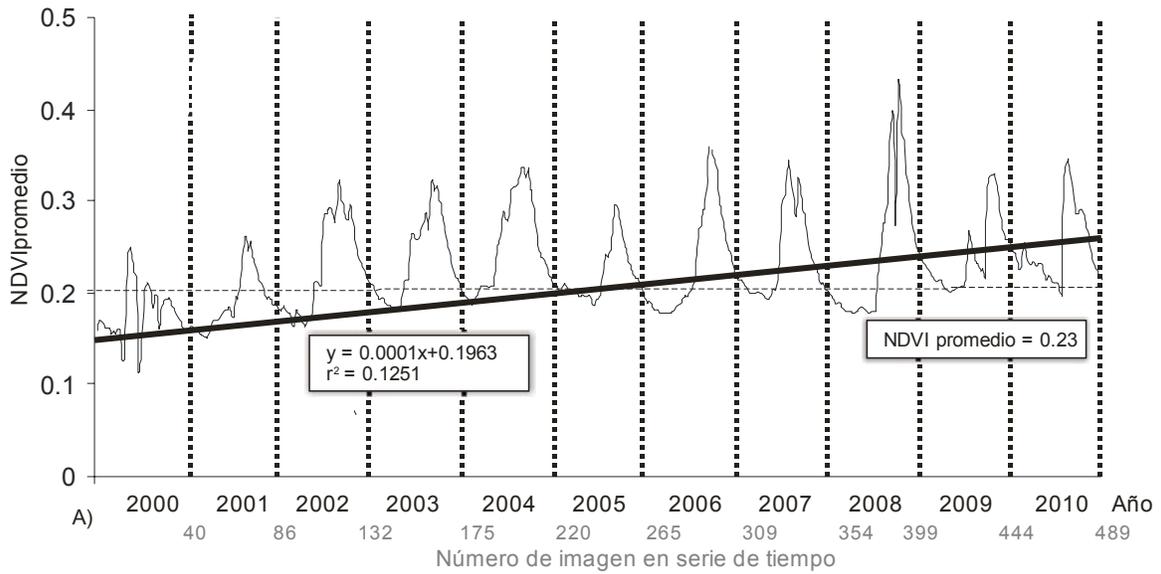


Figura 3.8. Perfil temporal del NDVI promedio de la serie de tiempo completa.

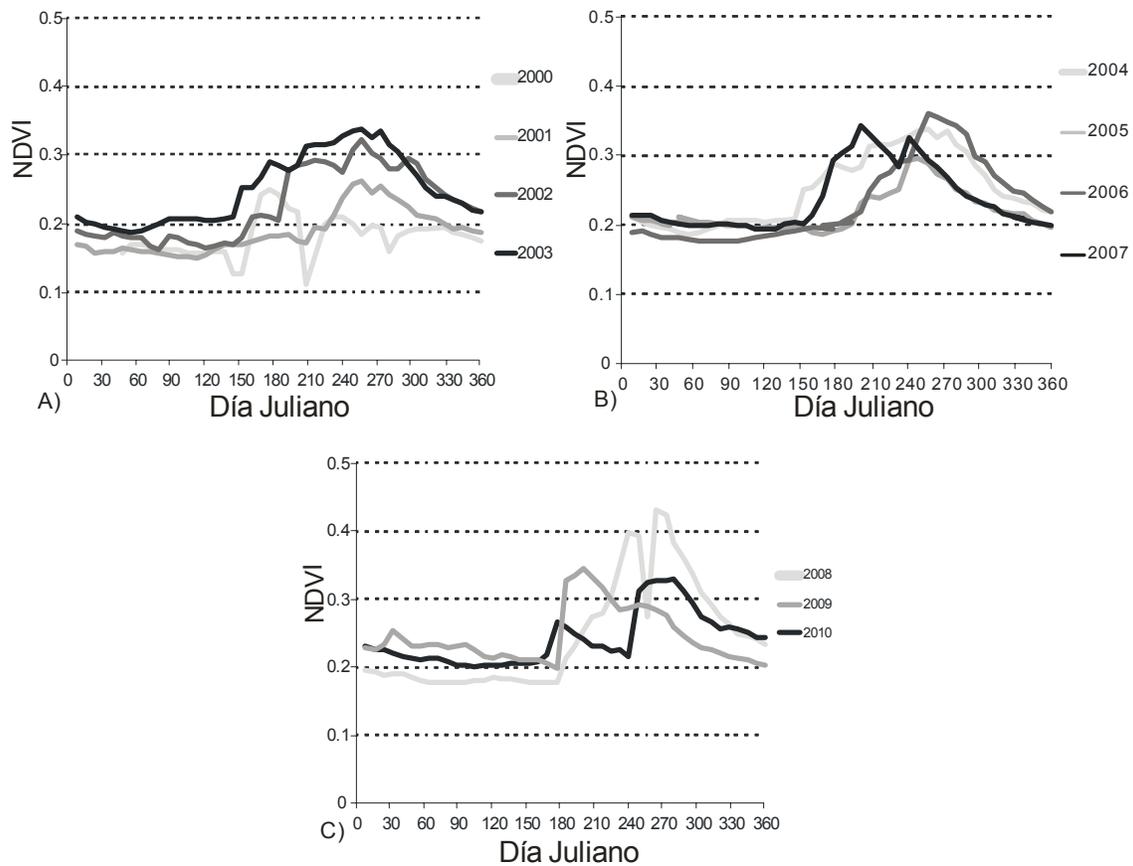


Figura 3.9. Perfil temporal del NDVI promedio de la serie de tiempo por año.

3.4. Conclusiones

La variación inter-anual de la vegetación asociada a los cambios en la precipitación fue monitoreada exitosamente mediante la serie de tiempo del NDVI obtenido del producto combinado sensor MODIS MCD43A4 para el periodo 2000-2010. La coherencia espacial de las condiciones de humedad para los años de análisis se puede observar claramente en los patrones de NDVI obtenidos para cada año. Los cambios en la serie de tiempo fueron capturados adecuadamente por el segundo componente principal. Se detectaron tanto los años secos como los años húmedos. El año más seco en la serie de tiempo fue el año 2000 con un NDVI máximo promedio de 0.45 y una precipitación total promedio de 497 mm. Mientras que el año más húmedo fue el año 2008 con un NDVI máximo promedio de 0.60 y una precipitación total promedio de 817 mm.

Investigaciones posteriores permitirán averiguar los detalles de los cambios encontrados a una mayor escala espacial. Los resultados obtenidos confirman el potencial de los datos espectrales MCD43A4 para estudios de monitoreo inter-anual e intra-anual de la vegetación a partir del año 2000 (lanzado a finales de 1999) a una escala espacial mejorada de 500 m. El NDVI obtenido del procesamiento del producto MODIS combinado MCD43A4 puede ser empleado como método indirectamente para el monitoreo histórico de la precipitación, como información fuente para modelación hidrológica e incluso en estudios de vulnerabilidad a incendios forestales especialmente en aquellas regiones del mundo que no cuenten con una red de observatorios meteorológicos.

3.5. Literatura Citada

- Althausen, J.D. 2002. What remote sensing system should be used to collect the data?. In: Bosler, J.D., Jensen, J.R., McMaster, R.B. 2002. Manual of geospatial science and technology. Taylor and Francis. pp. 276-298. ISBN 0-203-30592-2.
- Anyamba, A. and Tucker, C.J. 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments*: 63:596–614.
- Bajocco, S., Rosati, L. and Ricotta. 2010. Knowing fire incidence through fuel phenology: A remotely sensed approach. *Ecological Modelling*. 221:59–66.
- Bhaduri, K., Das, K. and Votava, P. 2010. Distributed anomaly detection using satellite data from multiple modalities. *Proceedings of The 2010 Conference on Intelligent Data Understanding (CIDU-NASA)*. San Francisco Bay Area. Oct 5-7. pp.109-123.
- Bontemps, S., Bogaert, P., Titeux, N. and Defourny. 2008. An object-based change detection method accounting for temporal dependences in time series with medium to coarse spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*. 112:3181–3191.

- Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Jarlan, L., Chaponniere, A., Maisongrande, P., Boulet, G. and Chehbouni, A. 2010. Long-term analysis of snow-covered area in the Moroccan High-Atlas through remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12S:S109–S115.
- Brown, M.E. and De Beurs, K.M. 2008. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. *Remote Sensing of Environment*. 112:2261–2271.
- Daucsavage, J. Kaminski, M., Ramachandran, B., Jenkerson, C., Sprenger, K., Faust, R. and Rockvam, T. 2010. ASTER and MODIS Land Data Management at the Land Processes, and National Snow and Ice Data Centers. In: Ramachandran, B., Justice, C.O., and Abrams, M.J. *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. NASA Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS*. Springer. pp. 167-182.
- Eastman, J.R., 2003. *IDRISI Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing*. Idrisi Production, Clark University, Worcester, MA.
- Friedl, M.A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A. and Huang, X. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*. 114:168–182.
- Gallaun, H., Zanchi, G., Nabuurs, G.J., Hengeveld, G., Schardt, M. and Verkerk, P. 2009. EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements. *Forest Ecology and Management*. 260(3):252-261.
- Hernández-Leal, P.A. Arbelo, M. and González-Calvo, A. 2005. Fire risk assessment using satellite data. *Advances in space research* 37(4):741-746.
- Holben, B.N., 1986. Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 7, 1417–1434.

- Immerzeel, W.W., Rutten, M.M. and Droogers. 2009. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*. 113:362–370.
- Jiang, B., Liang, S., Wang, J. and Xiao, Z. 2010. Modeling MODIS LAI time series using three statistical methods. *Remote Sensing of Environment*. 114:1432–1444.
- Khan, M.R., De Bie, C.A.J.M., Van, K.H., Smaling, E.M.A. and Real, R. 2010. Disaggregating and mapping crop statistics using hypertemporal remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12:36–46.
- Kileshye, O.J.M. and Taigbenu, A. 2009. NDVI–rainfall relationship in the Semliki watershed of the equatorial Nile. *Physics and Chemistry of the Earth*. 34:711–721.
- Lasaponara, R. 2006. On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from SPOT/VEGETATION NDVI temporal series. *Ecological Modelling* 194: 429–434.
- Lunetta, R.S., Knight, J.F., Ediriwickrema, J., Lyon, J.G., and Worthy, L.D. 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment*. 105: 142–154.
- NASA. 2009. MODIS Product Table. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). Sioux Falls, South Dakota. Available at: https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table.
- Maldonado, F.D., Dos Santos, J.R. y De Carvalho, V.C. 2000. Caracterización de cambios e influencia climática sobre la cobertura vegetal en el semiárido brasileño mediante Análisis de Componentes Principales (ACP). *Revista de Teledetección*. 13:1-9.
- Matheron, P.M. 2004 *Computer processing of remotely sensed images*. 3rd Ed. John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 0-470-84919-3. p. 243.
- Opazo, S. y Chuvieco, E. 2007. Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas. *Revista de Teledetección*. 27:27-43.

- Ramachandran, B., Justice, C.O., Abrams, M.J. (Eds). 2010. Land Remote Sensing and Global Environmental Change. NASA's Earth Observin System and the Science of ASTER and MODIS. Springer. ISBN 978-1-4419-6748-0. 894 p.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Goddard Space Flight Center, MD, 10–14 December, pp. 309–317, NASA SP-351 (Washington, DC: NASA Science and Technical Information Office).
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G. and Culvenor, D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*. 114:106–115.
- Vicente-Serrano, S.M., Cuadrat-Prats, J.M. and Romo, A. 2006. Aridity influence on vegetation patterns in the middle Ebro Valley (Spain): Evaluation by means of AVHRR images and climate interpolation techniques. *Journal of Arid Environments*. 66:353–375.
- SEMARNAT. 2009. Consecuencias sociales del cambio climático en México. Análisis y propuestas. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Mexico ISBN:978-968-817-933-8.

CAPÍTULO 4

SUSCEPTIBILIDAD DE DEFORESTACIÓN EN ECOSISTEMAS ÁRIDOS, TEMPLADOS Y TROPICALES DEL CENTRO NORTE DE MÉXICO¹

Resumen

En este capítulo se estudió la susceptibilidad de deforestación de los ecosistemas forestales remanentes del estado de San Luis Potosí, México (matorral, bosque y selva). Se emplearon técnicas de análisis espacial para ubicar las zonas deforestadas que ocurrieron en el área de estudio durante el 1993-2007. Se empleó la regresión logística para relacionar variables explicatorias de tipo social, de inversión, producción forestal, biofísicas y de proximidad para construir modelos predictivos de la susceptibilidad de deforestación en dos modos: global y por zona biogeográfica. En todos los modelos la deforestación se correlacionó directamente con la distancia a la agricultura de temporal, e inversamente con la pendiente, la distancia a carreteras y la distancia a localidades. Las demás variables fueron significativas en algunos casos y en otros presentaron relaciones duales que varían respecto a cada zona biogeográfica. Los resultados confirman que la selva remanente de la zona Huasteca es la más susceptible a la deforestación; los dos modelos obtenidos estiman que poco más del 70% de las selvas se encuentra en un nivel de susceptibilidad alto y muy alto.

Palabras clave: Regresión logística, factores de proximidad, ROC, validación cruzada k-fold.

¹ Publicado: Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E.J., Aguirre-Calderón, O.A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M.A., Pompa-García, M. and Aguirre-Salado, C.A. 2012c. Modeling susceptibility to deforestation of remaining ecosystems in North Central Mexico with logistic regression. *Journal of Forestry Research*. DOI: 10.1007/s11676-012-0230-z. <http://www.springerlink.com/content/005q780312vp8158/>.

Abstract

This chapter studied the deforestation susceptibility of the remaining forest ecosystems (shrubland, temperate and rainforest) of San Luis Potosí, Mexico. Spatial analysis techniques were used to locate deforested areas occurred during 1993-2007. Logistic regression was applied to relate social, investment, forestry, biophysical and proximity variables with deforestation in two folds: global and by biogeographical zone. In all models, susceptibility to deforestation was positively correlated to distance to agriculture lands and inversely correlated with terrain slope, distance to roads and distance to towns. Other covariates presented dual relationships and change respect to each biogeographical zone. The results confirm that Huasteca zone is the more susceptible to deforestation. Both modeling approaches reveal that 70% of the rainforest has high and very high levels of susceptibility to deforestation.

Key words: Logistic regression, proximity factor, ROC, k-fold cross validation.

4.1. Introducción

México es el tercero, de los cinco países (Brasil, Gabón, México, Papua Nueva Guinea e Indonesia) que registraron la mayor disminución de área de bosques primarios en los últimos 20 años. No obstante, también se encuentra entre los países con más de 10 millones de ha de bosque que designaron más del 70% de su superficie de bosque para usos múltiples; entre los 10 países (6to lugar) con mayor aumento anual en área de bosques plantados (1990-2010) y el 7mo lugar entre los países con mayor área de reforestación (2005) (FAO, 2010). Tales estadísticas revelan la voluntad gubernamental para minimizar los efectos de la degradación forestal; ya que se ha comprendido que cuando un ecosistema ha sido eliminado, su restauración es muy complicada. Lo menos difícil sería la recuperación de los servicios hidrológicos mientras que el suelo no se haya perdido totalmente, porque recobrar la diversidad biológica será imposible por tratarse del banco genético que representaban las especies originales (Martínez *et al.*, 2009; Fuller *et al.*, 2010).

Los cambios en el uso del suelo se han estudiado en varios lugares del mundo, bajo circunstancias y propósitos diferentes y por ende, con metodologías y enfoques diversos. Estas investigaciones tratan de responder las preguntas básicas sobre el qué y cómo ha pasado, mediante la generación de matrices de cambio comparando cartografía obtenida con fotointerpretación (Chapa-Bezanilla *et al.*, 2008) o imágenes de satélite clasificadas con algoritmos estadísticos (Márquez-Linares *et al.*, 2005; Antonio-Némiga *et al.*, 2006; Solís-Moreno *et al.*, 2006). Más a fondo, las causas de dichos cambios es la siguiente pregunta. La aplicación de modelos estadísticos ha sido de utilidad para determinar las variables estadísticamente significativas y su importancia relativa que respondan dicha interrogante (Pineda-Jaimes *et al.*, 2008, 2010). Estos trabajos son fundamentales para diseñar programas enfocados en la restauración del ecosistema y para proponer áreas prioritarias de conservación de recursos forestales (Averna-Valente y Vetorazzi, 2008).

Existen diferentes modelos estadísticos para examinar las causas de la deforestación. Algunos autores emplean la regresión lineal múltiple con variables sociales y económicas para explicar las tasas de deforestación (Culas, 2007; Arcand *et al.*, 2008; Freitas *et al.*, 2010); otros emplean modelos de regresión logística donde la deforestación se codifica binariamente y se puede determinar la susceptibilidad de un sitio a ser deforestado (Chowdhury *et al.*, 2006; Echeverria *et al.*, 2008; Pineda-Jaimes *et al.*, 2008). Otros autores emplean modelos autorregresivos que toman en cuenta la autocorrelación espacial en el análisis (Dendoncker *et al.*, 2007) mientras que otros han usado la regresión geográficamente ponderada como evidencia de que los factores que influyen en los procesos de deforestación son espacialmente variables (Pineda-Jaimes *et al.*, 2010).

San Luis Potosí es un estado biodiverso que cuenta con ecosistemas áridos, templados y tropicales, los cuales presentan diferentes grados de susceptibilidad a la deforestación. La vegetación tropical de la zona biogeográfica de la Huasteca fue afectada considerablemente por deforestación promovida en proyectos del pasado reciente para el establecimiento de agricultura intensiva y en la actualidad son áreas de ganadería extensiva (Reyes-Hernández *et al.*, 2006). La estimación oportuna de la susceptibilidad de deforestación de la vegetación remanente recae en la posibilidad de tomar decisiones que modifiquen el destino de los recursos forestales. En este sentido, los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar estadísticamente el efecto de variables de tipo social, de inversión, biofísicas y de proximidad (globalmente y por zona biogeográfica) en los procesos de deforestación que fueron detectados en la cartografía oficial de vegetación y uso del suelo (1993-2007) en el estado de San Luis Potosí mediante el modelo de regresión logística; 2) determinar la susceptibilidad de deforestación de las zonas forestales remanentes con el propósito de ser una herramienta de planeación forestal regional; y 3) evaluar el desempeño de cada modelo con la curva ROC (Relative Operating Characteristic) y validación cruzada 10-fold.

4.2. Materiales y Métodos

4.2.1. Área de Estudio

San Luis Potosí es un estado mexicano ($24^{\circ} 29' 27''$ y $21^{\circ} 09' 33''$ de Latitud Norte y $98^{\circ} 19' 48''$ y $102^{\circ} 18' 10''$ de Longitud Oeste) que cuenta con una superficie de 6'116,360.9 ha distribuida en 58 municipios. Se localiza en el límite superior de la zona intertropical y se divide en cuatro zonas biogeográficas: Altiplano, Media, Centro y Huasteca (Figura 4.1). La Sierra Madre Oriental (norte a sur) y los vientos cargados de humedad provenientes del Golfo de México son factores que moldean las condiciones ambientales y ecológicas de las zonas biogeográficas. Las laderas reciben los vientos húmedos (>1400 mm) de barlovento (zona Media y Huasteca), y la vegetación permanece verde la mayor parte del año. Conforme los vientos avanzan (zona Altiplano y Centro), la humedad se reduce hasta <600 mm, limitando al crecimiento de vegetación arbustiva. La zona Huasteca cuenta con condiciones climáticas que contribuyen al desarrollo de una gran variedad de plantas tropicales y cuyos cultivos anuales llegan a obtener hasta tres cosechas al año en algunos sitios (Rzedowski, 1963), lo que origina un especial interés en la conversión de terrenos forestales a agrícolas y ganaderos.

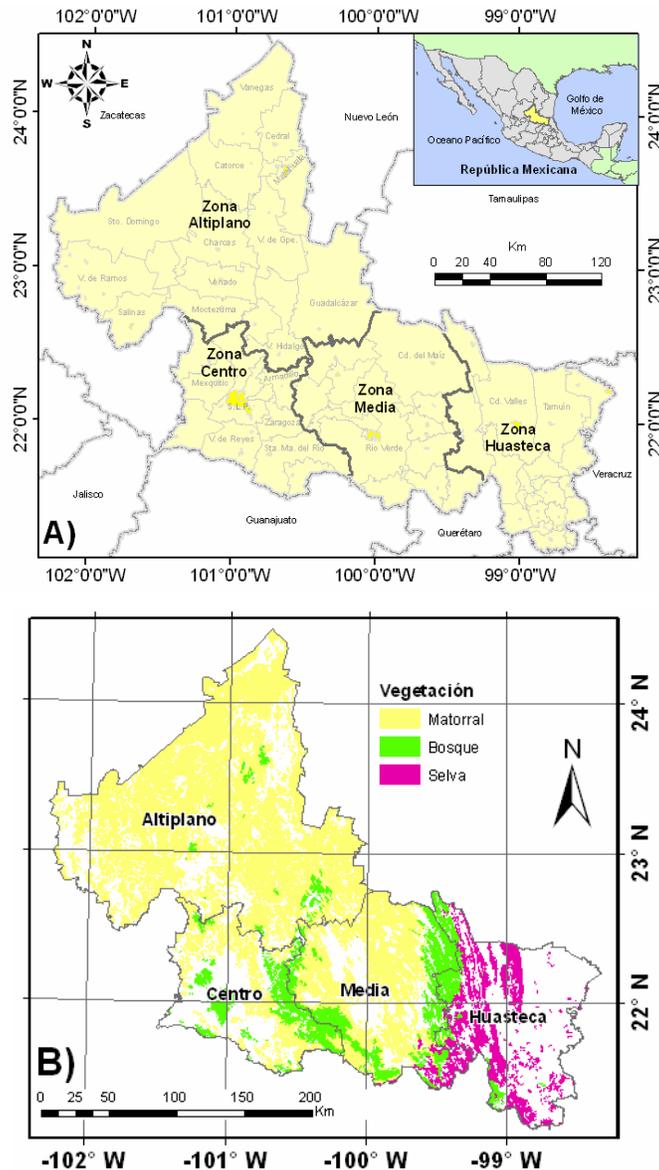


Figura 4.1. A) Localización del área de estudio y zonas biogeográficas y B) formaciones vegetales.

4.2.2. Colección de Datos

Se utilizaron los mapas de uso del suelo y vegetación de la serie II (1993) y IV (2007) escala 1:250,000 para el área de estudio generados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Se ajustó geoméricamente el primer mapa respecto al segundo asumiéndolo como correctamente georeferido. Se estandarizó la leyenda a nivel de tipo de vegetación (Velázquez *et al.*, 2002),

para aumentar la confiabilidad temática de la información cartográfica. Los mapas fueron validados con 330 sitios de muestreo obtenidos del Inventario Forestal Nacional (2004-2006) usando matrices de confusión; la serie II (1993) tuvo una confiabilidad general del 89.7% y un Kappa de 86.4%, mientras que la serie IV (2007) mostró un 85.7% y 81.3%, respectivamente. Se generó un mapa de deforestación mediante intersección de los mapas y determinando los polígonos que cambiaron de bosque, selva y matorral a algún uso del suelo sin árboles.

Como variables explicatorias (Tabla 4.1) se incluyeron cinco grupos de variables: 1) poblacionales, 2) de inversión, 3) forestales, 4) biofísicas y 5) de proximidad. Las variables de los grupos 1, 2 y 3 fueron obtenidas del Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos (SIMBAD) del INEGI. Las variables biofísicas se obtuvieron del modelo digital de elevación de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con un tamaño de píxel de 90 m. Mientras que las variables de proximidad se generaron de la cartografía escala 1:250,000 de INEGI. Las variables explicatorias fueron normalizadas mediante una transformación logarítmica de la forma $\ln(X_k + 1)$ (Pineda-Jaimes *et al.*, 2010) para evitar la influencia de las unidades de medida en la selección de las variables (Deng *et al.*, 2010). Las variables se rasterizaron usando como referencia los límites municipales de la zona de estudio obtenidos del Marco Geoestadístico Nacional versión 4.1 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); y se asumieron dos supuestos: 1) son los pobladores propios del municipio quienes actúan dentro del territorio municipal y no aquellos que vienen de fuera y 2) las variables socioeconómicas son promedios que suponen que todo el municipio es homogéneo (Pineda-Jaimes *et al.*, 2008). Toda la información se manejó en la proyección UTM, zona 14, datum ITRF92, y 90 m de resolución espacial.

Tabla 4.1. Variables independientes usadas.

Gpo	No	Variable	Descripción	Fuente
1	1	DPOB	Densidad poblacional (hab/km ²)1995	INEGI
	2	DIFDPOB	Diferencia en la densidad poblacional (%) (1995-2005)	INEGI
	3	IDH	Índice de desarrollo humano (%) (2000)	INEGI
	4	PLEÑA	Población que usa leña para cocinar (%) (2000)	INEGI
	5	ESC	Escolaridad promedio (Años) (2005)	INEGI
2	6	CRED	Número de créditos otorgados a vivienda (1994-2007)	INEGI
	7	PCAMPO	Número de créditos otorgados por PROCAMPO (1994-2007)	INEGI
3	8	MAD	Producción de maderables (m ³ rollo) (1994-2007)	INEGI
	9	NOMAD	Producción de no maderables (ton) (1994-2007)	INEGI
4	10	ELEV	Elevación sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)	MDE
	11	PEND	Pendiente del terreno (%)	MDE
5	12	DAT	Distancia a la agricultura de temporal (m) (1993)	INEGI
	13	DPAS	Distancia a pastizales (m)	INEGI
	14	DRIOS	Distancia a los escurrimientos (m)	INEGI
	15	DCARR	Distancia a las carreteras estatales y federales (m)	INEGI
	16	DLOC	Distancia a localidades con menos de 2500 habitantes (m)	INEGI

4.2.3. Análisis de la Información

Se empleó el modelo de regresión logística para 1) examinar la relación existente entre la deforestación y factores sociales, económicos, biofísicos y de proximidad, y 2) determinar la susceptibilidad de deforestación en cada una de

las zonas biogeográficas del área de estudio. Este tipo de regresión se emplea para modelar variables binarias y no requiere de supuestos como el de normalidad o homoscedasticidad (Alderete, 2006). Este modelo emplea la función logit $\ln\left(\frac{p}{q}\right)$, donde p = susceptibilidad de ocurrencia y q = susceptibilidad de no ocurrencia $(1-p)$. La función logit se emplea para transformar la combinación lineal de las variables explicatorias a una escala de medición apta para datos binomiales (forestado = 0 vs deforestado = 1). La susceptibilidad de deforestación se expresa mediante el modelo:

$$p(x) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k)}}$$
 donde X_k = variable explicatoria y β_k = parámetro estimado de la variable X_k .

Dado que las evidencias de deforestación provienen de la rasterización a formato binario de polígonos obtenidos del cruce de mapas vectoriales de vegetación, se seleccionaron muestras separadas cada 500 m para minimizar el efecto de la autocorrelación espacial en la construcción del modelo (Legendre, 1993; Echeverría *et al.*, 2008). Los sitios de muestreo se evaluaron con el índice de Moran que toma valores entre -1 a +1, y donde 1 indica agrupamiento, -1 denota dispersión y el 0 es señal que el patrón espacial es completamente aleatorio. Mientras que la significancia se evaluó con el estadístico Z, donde lo deseado es encontrar un valor no significativo $(-1.96 \leq Z \leq 1.96)$ para deducir que el muestreo ha sido eficaz para minimizar la autocorrelación espacial en la variable dependiente (Pompa-García, 2008; Fuller *et al.*, 2010).

Los parámetros del modelo fueron estimados mediante máxima verosimilitud en el software SAS (SAS Institute Inc., 2004). Para seleccionar las variables explicatorias del modelo final se emplearon dos criterios: 1) minimización de la multicolinealidad entre las variables explicatorias (Sifuentes y Ramírez, 2010), eliminando aquellas variables con un factor de inflación de la varianza (VIF, por sus siglas en inglés) superior a 5 aunque existen autores que recomiendan un valor máximo de 10 (García *et al.*, 2010) y 2) la significancia de las variables ($p \leq 0.05$). La susceptibilidad de deforestación estimada se

multiplicó por una máscara booleana de áreas forestales obtenida con el mapa actual de vegetación (serie IV, 2007).

La bondad de ajuste de los modelos se realizó empleando la gráfica de la característica de operación relativa (ROC, por sus siglas en inglés). La gráfica ROC o curva ROC, compara datos binarios sobre el rango completo de susceptibilidades predichas e indica la habilidad del modelo para determinar la susceptibilidad de deforestación en varias ubicaciones espaciales (Braumoh *et al.*, 2007). Una curva ROC grafica el porcentaje de valores positivos verdaderos (sensibilidad) contra el porcentaje de valores negativos verdaderos (especificidad), y reúne la misma información que una matriz de confusión, pero de forma más intuitiva y robusta (Hamel, 2008). El área bajo la curva ROC (AUC, por sus siglas en inglés) es un indicador que cuantifica la bondad de ajuste de los modelos y típicamente varía de 0.5 a 1; un valor arriba de 0.5 es estadísticamente mejor que aleatorio, un valor arriba de 0.7 se considera normalmente aceptable, arriba de 0.8 es excelente y mayor a 0.9 es excepcional (Beguería, 2006; Hu y Lo, 2007). Para validar las estimaciones de AUC, se empleó el método de validación cruzada (10-fold cross validation) descrita por Gönen (2007).

4.3. Resultados y Discusión

4.3.1. Autocorrelación Espacial

Es reconocido que la autocorrelación espacial en las variables dependientes puede violar el supuesto de que las observaciones medidas deben ser independientes, lo que impacta directamente en la significancia y afecta el desempeño del modelo estadístico. El índice de Moran obtenido para la variable dependiente en todos los modelos fue cercano a cero y un valor de Z no significativo (-1.96 a 1.96). Esto corrobora que la autocorrelación espacial se minimizó eficazmente después de realizar el muestreo (Bhattarai *et al.*, 2009).

4.3.2. Selección de Variables

Se mantuvieron en cada modelo solamente aquellas variables que fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$) y sin efectos de colinealidad entre sí ($vif < 5$). Para analizar la importancia relativa de cada variable se muestran los coeficientes estandarizados en la Figura 4.2; y el sentido de la relación se observa en los coeficientes de las ecuaciones obtenidas (Tabla 4.2). Para la correcta interpretación de las variables seleccionadas, en la Figura 4.3 se observan los efectos parciales de las variables significativas en la susceptibilidad de la deforestación para el modelo general. La vegetación que se encuentre en una elevación sobre el nivel del mar menor a 50 m, en municipios con densidad poblacional mayor a 110.9 hab/km, a mas de 106.9 km de distancia de la agricultura tendrán mayor susceptibilidad de deforestación. La variable distancia a pastizales aunque fue estadísticamente significativa tuvo un efecto parcial muy pequeño en los valores de susceptibilidad (Figura 4.3C) los cuales ni siquiera sobrepasan de 0.2; el caso es el mismo para las variables restantes, con alta significancia pero con valores de importancia muy pequeños.

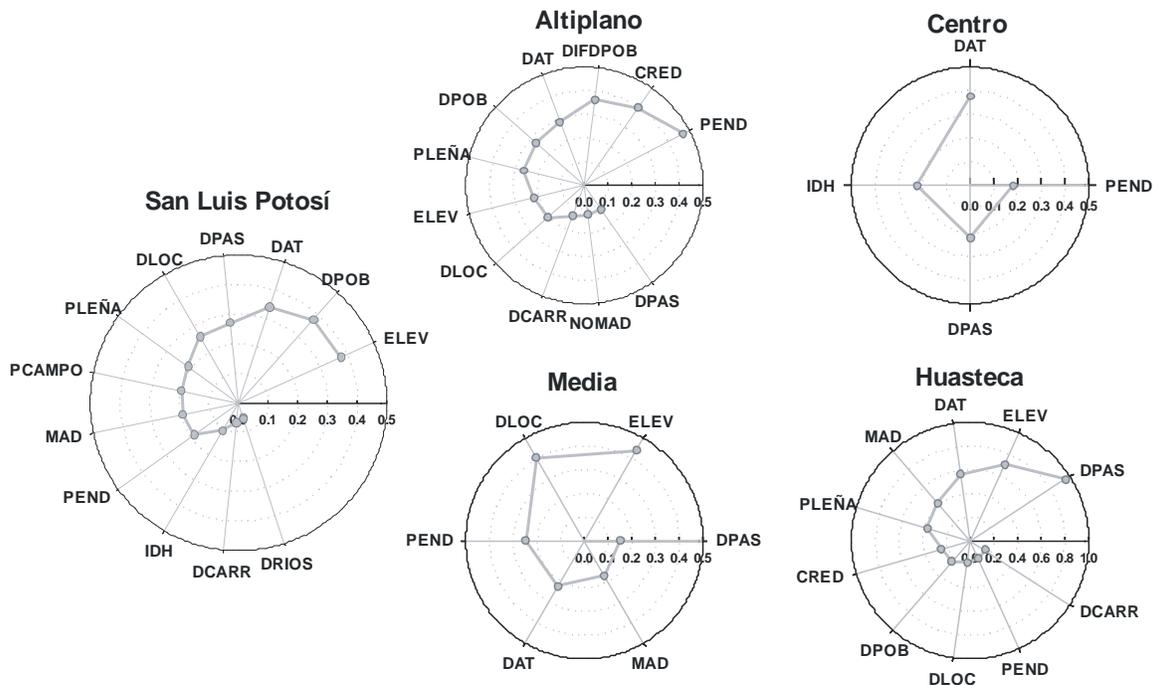


Figura 4.2. Coeficientes estandarizados que indican la importancia de cada variable en el modelo obtenido.

Tabla 4.2. Coeficientes de los modelos de regresión logística.

No	Variable	Modelo				
		General	Altiplano	Centro	Media	Huasteca
	Interceptada	14.7746****	-10.6060 ns	21.0795****	25.0443****	-2.5018**
1	DPOB	0.7448****	0.7605***	ns	ns	-0.7278****
2	DIFDPOB	ns	7.1829***	ns	ns	ns
3	IDH	-2.4547****	ns	-5.4982****	ns	ns
4	PLEÑA	0.6541****	1.0342**	ns	ns	1.3505****
5	ESC	v = 12.48	v = 55.37	ns	ns	v = 10.45
6	CRED	ns	-0.9422****	ns	ns	0.3673****
7	PCAMPO	-0.5172****	ns	ns	ns	ns
8	MAD	0.0900****	ns	ns	-0.0822****	0.2014****
9	NOMAD	ns	0.0710**	ns	ns	ns
10	ELEV	-0.5086****	-2.3981***	ns	-2.4724****	-1.1309****
11	PEND	-0.3750****	-1.1142****	-0.3577***	-0.4923****	-0.3531***
12	DAT	0.2715****	0.2005****	0.2821****	0.1975****	0.4991****
13	DPAS	0.2012****	-0.1070**	0.1397****	-0.1640****	0.7473****
14	DRIOS	0.0719**	ns	ns	ns	ns
15	DCARR	-0.0906***	-0.1885**	ns	ns	-0.1856***
16	DLOC	-0.5070****	-0.4543****	ns	-0.8410****	-0.4117****

* = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$, **** = $p < 0.0001$, v = $vif > 5$, ns = no significativa.

Antonio-Némiga *et al.* (2006) concluyeron que la llanura costera se encuentra más expuesta a la deforestación comparado con las zonas montañosas por sus condiciones topográficas; esto se interpreta que la pendiente y la elevación presentan una relación inversa al cambio de uso del suelo, igual que en este trabajo. Freitas *et al.* (2010) encontraron una relación directa entre la deforestación de selvas y la densidad de caminos en sureste de Brasil, evidenciando el factor humano como agente de cambio. En este trabajo, las zonas más cercanas a las carreteras y localidades menores de 2500 ha fueron más propensas a la deforestación.

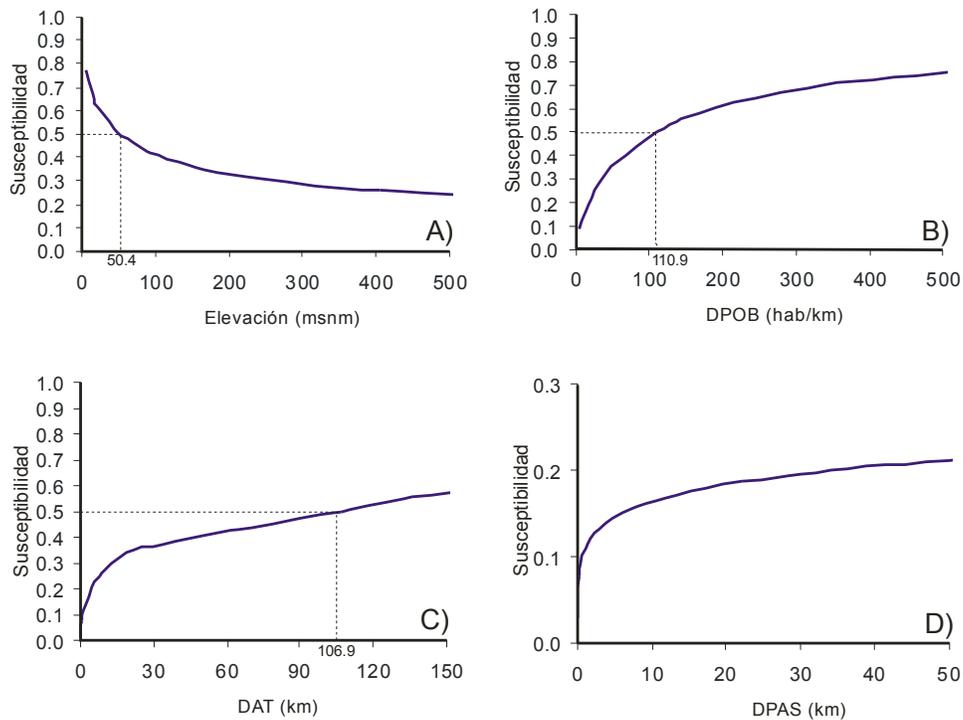


Figura 4.3. Efectos parciales de las cuatro variables significativas más importantes del modelo General en la susceptibilidad de deforestación.

El hecho de que una variable resulte significativa no indica causalidad. Los municipios con mayor producción maderable que tengan mayor deforestación (modelo general y Huasteca) seguramente no es por causa del manejo forestal, sino simplemente porque esos municipios son los que sí tienen vegetación que puede ser eliminada (matorral, bosque o selva). Los predios eminentemente forestales que no están sujetos a la regulación y control propios de un programa de manejo forestal presentan mayor riesgo de degradación forestal, consecuentemente deforestación (Rincón-Ramírez, 2003). De hecho, Pineda-Jaimes *et al.* (2008) encontraron que la deforestación fue menos probable en ejidos con actividades forestales en el estado de México.

El porcentaje de hogares que usan leña para cocinar también fue una variable significativa pero con valor de importancia relativo bajo. El uso de estufas ahorradoras de leña por familias que viven en zonas forestales podría ser una alternativa para disminuir la presión al bosque (Bailis *et al.*, 2007) y

disminuir los riesgos de cáncer de pulmón en la población femenina (Romieu *et al.*, 2009).

En el modelo para la zona Altiplano, caracterizada por clima árido y vegetación de matorral, se observó que las zonas deforestadas ocurrieron en los lugares de menor pendiente, con menos créditos a la vivienda, con mayor incremento poblacional, en los lugares mas alejados de las tierras agrícolas y más cercanos a localidades pequeñas, con una mayor producción de no maderables y un mayor uso de leña para cocinar. Es interesante notar que en esta zona, el índice de desarrollo humano y los apoyos de PROCAMPO no fueron variables estadísticamente significativas.

En la zona Centro, donde se localiza la ciudad capital del Estado de San Luis Potosí, el modelo logístico presentó variaciones interesantes. La deforestación fue más probable en las zonas más lejanas a la agricultura de temporal y los pastizales, en municipios con un índice de desarrollo humano menor y en sitios con relieve menos escarpado. En la zona media la deforestación fue más propensa en altitudes menores influyendo la cercanía con la zona Huasteca, en las zonas más planas y mas cercanas a las localidades por mejor accesibilidad, en las zonas más distantes de la agricultura de temporal interpretándose como las zonas más boscosas, en municipios con menor producción maderable posiblemente por carencia de programas de manejo forestal en predios fomentando tala clandestina que no es contabilizada en las estadísticas, y en los lugares más cercanos a los pastizales. Finalmente en la zona Huasteca, las zonas mas propensas a deforestarse fueron aquellas que estuvieron más alejadas de los pastizales y la agricultura de temporal, con altitudes bajas, en municipios con mayor producción maderable y mayor consumo de leña para cocinar y, con mayores créditos a la vivienda pero con menor densidad poblacional, en sitios mas cercanos a localidades pequeñas, a carreteras y con pendientes planas.

El estudio de la deforestación bajo diferentes enfoques, en este caso, general y por zona biogeográfica ayuda a comprender la dualidad de las relaciones que pueden existir como causas de deforestación. Bhattarai *et al.*

(2009) estudiaron la deforestación en Nepal considerando provincias fisiográficas basadas en la elevación sobre el nivel del mar. Ellos también encontraron relaciones duales en elevación, distancia a carreteras, tierras agrícolas. Un ejemplo en este trabajo es la variable densidad poblacional y créditos a la vivienda: 1) en el modelo Altiplano mostró una correlación positiva, 2) mientras que en la Huasteca fue negativa, y ambas relaciones son ciertas. En el primer caso, los municipios con mayor densidad poblacional y mayores créditos a la vivienda ejercen una presión más fuerte sobre el recurso forestal fomentando deforestación, mientras que en el segundo caso los bosques y selvas se encuentran más expuestos en aquellos municipios con menos población y créditos a la vivienda. Esto demuestra que la variable explicatoria población, no siempre resultará en una correlación directamente proporcional. Otro ejemplo de dualidad es la distancia a pastizales; en los modelos general, Centro y Huasteca la deforestación ocurrió en las zonas más alejadas a los pastizales, mientras que en las zonas Altiplano y Media ocurrió lo contrario.

4.3.3. Ajuste y Validación

Dado que todos los modelos fueron estadísticamente significativos, también las curvas ROC se comportaron consistentemente (Figura 4.4). Ambos modelos, el general y el de la zona Huasteca presentaron un desempeño balanceado lo que indica un equilibrio entre clasificaciones positivas y negativas verdaderas, lo cual se puede comprobar por la simetría de la curva ROC. Los demás modelos tuvieron una ligera tendencia al desempeño liberal, es decir, con mayor propensión a estimar valores positivos. El modelo logístico para la zona Centro fue el que presentó el AUC más pequeña (0.67) y coincide con el menor número de variables explicativas que resultaron estadísticamente significativas (4 variables). Los modelos restantes tuvieron un desempeño aceptable, el modelo General (AUC = 0.83), Altiplano (AUC = 0.84), Media (AUC = 0.78), Huasteca (AUC = 0.86) y coinciden con los reportados por diferentes autores (Beguería, 2006; Hu y Lo, 2007; Rutherford *et al.*, 2008; Dendoncker *et al.*, 2007). En la Figura 4.4C, se muestran el AUC obtenida con la validación cruzada

k fold (10-fold cross validation). Los valores más altos se obtuvieron para la zona Huasteca (0.82 a 0.89), mientras que los más pequeños fueron para la zona Centro (0.58 a 0.70). La zona Huasteca, rica en recursos forestales y la marcada variación en las variables explicativas permitió lograr una bondad de ajuste mayor en el modelo. Mientras que en la zona Centro, donde la deforestación es poco frecuente y con menor variación en las variables explicatorias se obtuvo un ajuste casi nulo, aunque estadísticamente significativo.

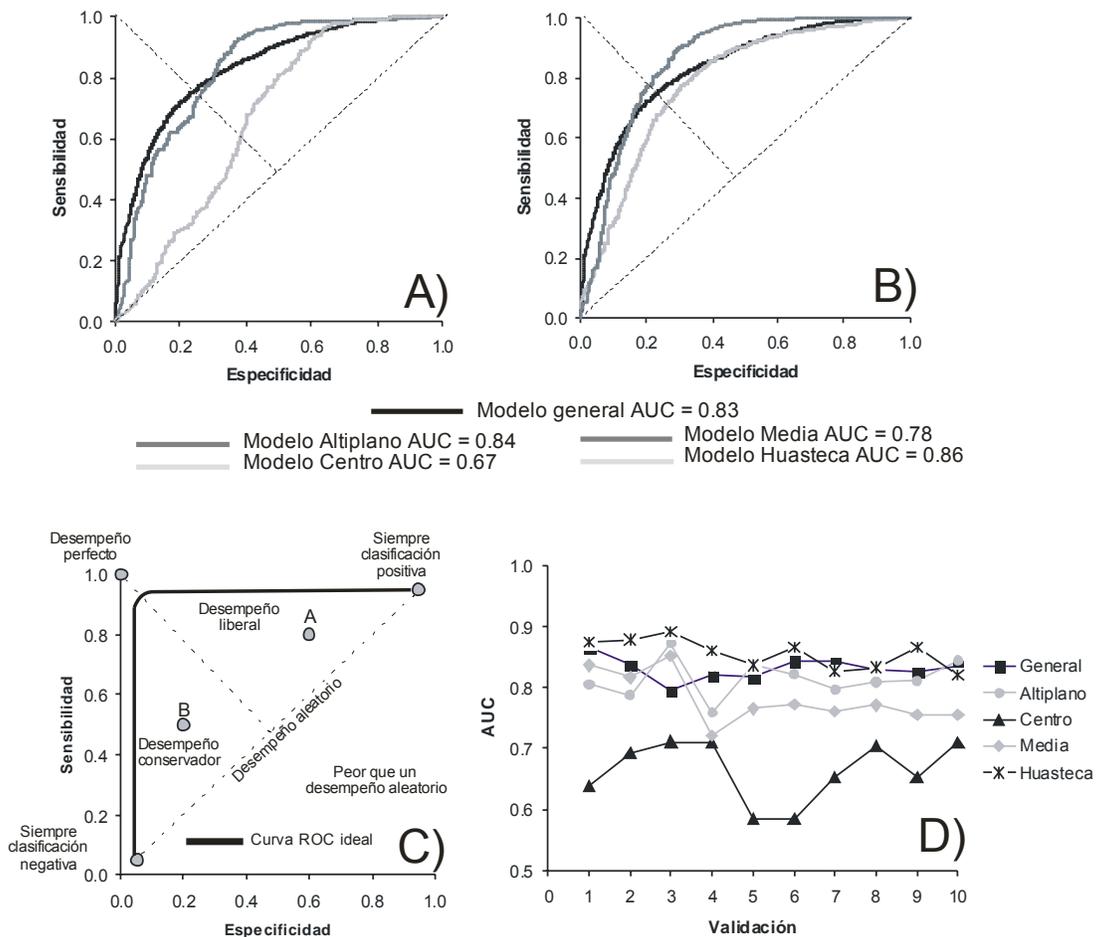


Figura 4.4. Curva ROC. A) y B) modelos construidos, C) Modelo ideal adaptado de Hamel (2008) y D) AUC obtenida para cada validación (10-fold cross validation).

4.3.4. Estimación de la Susceptibilidad de Deforestación

Todos los modelos resultaron estadísticamente significativos. El modelo general realiza una estimación más balanceada (Figura 4.5), comparado con los modelos parciales obtenidos para las zonas biogeográficas (Figura 4.6). En ambos modelos, los matorrales en la zona Altiplano mostraron los niveles más bajos de susceptibilidad, siguiéndole los bosques de la zona Media y Centro con un nivel medio-alto. También ambos modelos coincidieron en que más del 70% (71% -modelo general y 79.7% -modelo por zona) de las selvas remanentes (361,880 ha) se encuentran con susceptibilidad alta y muy alta (Figura 4.7). En estos ecosistemas se encuentran las mayores reservas de biomasa forestal (>150 Mg/ha) (Návar, 2011) y representan una seria amenaza a la liberación de CO₂ vegetal a la atmósfera. Alrededor del 20% de los bosques remanentes (567,243 ha) del área de estudio se encuentran con susceptibilidad alta y muy alta (19.7% -modelo general y 21.2% -modelo por zona). Mientras que aproximadamente el 4% de los matorrales remanentes (2,938,332 ha) se encuentran con susceptibilidad alta y muy alta (3.8% -modelo general y 5.2% -modelo por zona). Estos resultados revelan el peligro que corren los ecosistemas tropicales remanentes del área de estudio. Flamenco-Sandoval *et al.* (2007) encontraron tasas de deforestación más elevadas para la selva (3.2% anual) que para los bosques templados (1.0%) en una zona forestal del sur de México.

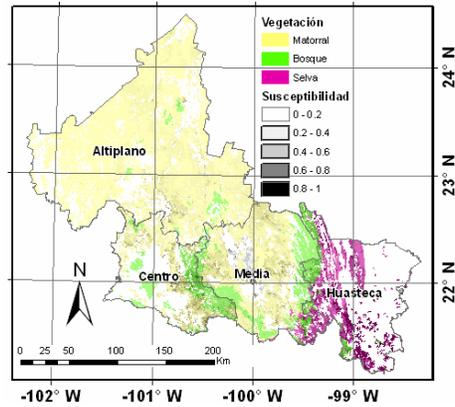


Figura 4.5. Susceptibilidad de deforestación obtenida con el modelo General.

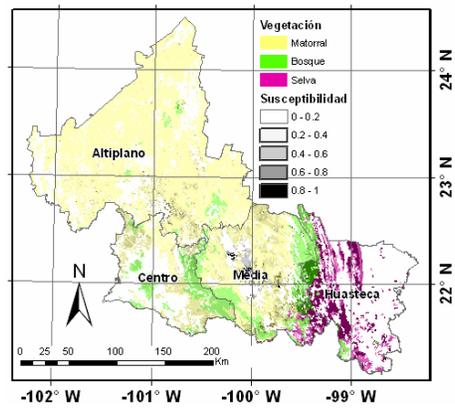


Figura 4.6. Susceptibilidad de deforestación uniendo las estimaciones de modelos obtenidos por zona biogeográfica.

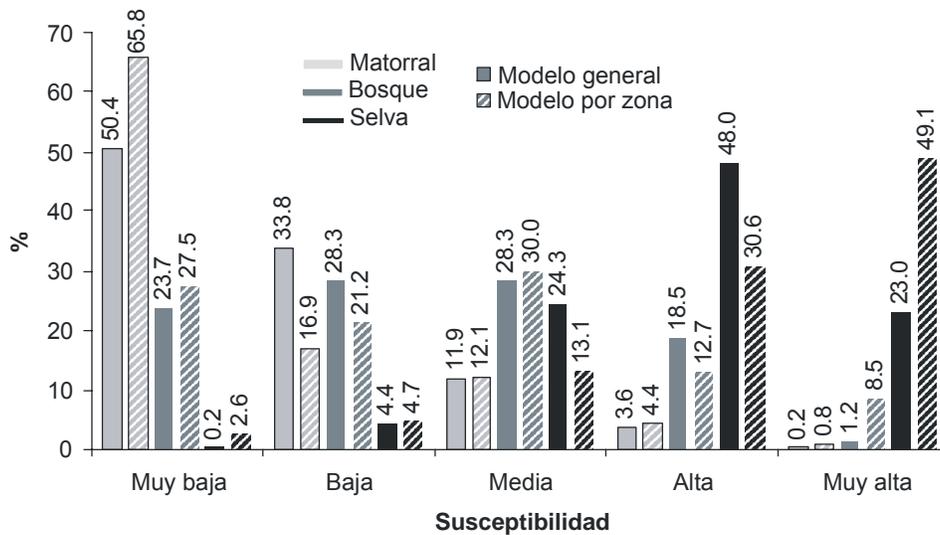


Figura 4.7. Niveles de susceptibilidad de deforestación en el área de estudio.

4.3.5. Alternativas de Acción

Sobre los efectos de la protección de los bosques en la conservación, algunos autores exhiben que el riesgo a deforestación no varía significativamente dentro o fuera de las zonas protegidas (Fuller *et al.*, 2010). Mientras otros indican que sí (Flamenco-Sandoval *et al.*, 2007). Pineda-Jaimes *et al.* (2008) evaluaron, entre otras cosas, el porcentaje de píxeles del municipio dentro de áreas naturales protegidas como variable explicatoria del porcentaje deforestado de bosques de latifoliadas y encontró correlaciones positivas y negativas en el mismo estudio.

Para las condiciones sociales y políticas de México donde el 70% de los terrenos forestales son de propiedad ejidal o comunal, lo mejor es promover el uso múltiple de los recursos y protección por sus dueños o poseedores. En la actualidad, los gobiernos están transfiriendo derechos de propiedad y de uso de los recursos forestales a comunidades rurales, ya que comienzan a reconocer su falta de capacidad para asegurar la conservación y el uso sustentable de estos recursos y que las comunidades reclaman sus derechos ancestrales sobre estos territorios y la oportunidad para beneficiarse directamente de sus recursos naturales como un medio de vida. En México, existen varias experiencias de manejo forestal exitoso que sustentan la tesis del manejo forestal sustentable (Barton y Merino-Pérez, 2004).

4.4. Conclusiones

Los resultados cuantitativos obtenidos en este capítulo contribuyen al conocimiento, tanto de las variables involucradas en el proceso de deforestación de ecosistemas áridos, templados y tropicales en el estado de San Luis Potosí, como de los puntos más vulnerables a sufrir este deterioro. La división del área de estudio en zonas biogeográficas permitió detectar relaciones duales que se encontraban ocultas en el modelo general, y que fueron estadísticamente significativas para cada zona en particular. Dada la variación ecológica y las diferentes condiciones socioeconómicas encontradas en cada zona

biogeográfica, las causas que determinan la deforestación en los ecosistemas áridos, templados y tropicales fueron diferentes.

Los mapas de susceptibilidad obtenidos no aseguran que las zonas señaladas vayan a ser deforestadas, solo representan una medida de facilidad basada en relaciones documentadas por los casos determinados en la comparación cartográfica, los cuales representan una interesante herramienta de planeación regional forestal en el Estado. Alrededor del 70%, 20% y 4% de la selva, bosque y matorral remanente respectivamente se encuentran en condiciones físicas, sociales y de proximidad que propician una susceptibilidad alta a muy alta de deforestación.

Una alternativa polémica para la conservación de los recursos forestales es la creación de áreas naturales protegidas, donde a veces no se cuenta con el consenso de la población y que en estos casos resulta contraproducente, trayendo como consecuencia la Tragedia de Los Comunes de *Garret Hardin*. Para promover el uso sustentable de los recursos forestales, se propone que los prestadores de servicios técnicos forestales de la zona promuevan entre los dueños y poseedores el uso múltiple de los recursos forestales; proyectos de servicios ambientales hidrológicos que traigan como beneficio la recarga de los mantos acuíferos y la prevención de la erosión del suelo, proyectos de almacenamiento y captura de carbono para mitigar el efecto invernadero y proyectos de ecoturismo para aprovechar la belleza escénica, entre otros. Las zonas deforestadas representan oportunidad para proyectos de plantaciones forestales con especies de interés comercial. Por otro lado, dado que el consumo de leña resultó significativo en la zona Altiplano y Huasteca, una opción complementaria es seguir promoviendo el uso de estufas ahorradoras de leña.

4.5. Literatura Citada

- Alderete, A.M. 2006. Fundamentos del análisis de regresión logística en la investigación psicológica. *Evaluar*. 6:52-67.
- Antonio-Némiga, X., Treviño-Garza, E.J., Jiménez-Pérez, J., Villalón-Mendoza, H. y Navar-Chaidez, J.J. 2006. Cambios en la vegetación en la subcuenca del Río Pilón, Nuevo León, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12(1):5-11.
- Arcand, J.L., Guillaumont, P., and Guillaumont, J.S. 2008. Deforestation and the real exchange rate. *Journal of Development Economics*. 86: 242–262.
- Averna-Valente, R.O. and Vettorazzi, C.A. 2008. Definition of priority areas for forest conservation through the ordered weighted averaging method. *Forest Ecology and Management*. 256:1408-1417.
- Bailis, R., Berrueta, V., Chengappa, C., Dutta, K., Edwards, R., Masera, O. Still, D. and Smith, K.R. 2007. Performance testing for monitoring improved biomass stove interventions: experiences of the Household energy and health project. *Energy for Sustainable Development*. 11(2):57-70.
- Barton, B.D. y Merino-Pérez, L. 2004 La experiencia de las comunidades forestales en México. Instituto Nacional de Ecología. 268 p.
- Beguiría, S. 2006. Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*. 74:196– 206.
- Bhattarai, K., Conway, D. and Yousef, M. 2009. Determinants of deforestation in Nepal's Central Development Region. *Journal of Environmental Management*. 91:471–488.
- Braimoh, A.K. and Onishi, Takashi. 2007. Geostatistical techniques for incorporating spatial correlation into land use change models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 9:438–446.
- Chapa-Bezanilla, D., Sosa-Ramírez, J. y de Alba-Ávila, A. 2008. Estudio multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques*, 14(1):37-51.

- Chowdhury, R.R. 2006. Landscape change in the Calakmul Biosphere Reserve, Mexico: Modeling the driving forces of smallholder deforestation in land parcels. *Applied Geography*. 26:129–152.
- Culas, R.J. 2007. Deforestation and the environmental Kuznets curve: An institutional perspective. *Ecological Economics*. 61:429-437.
- Dendoncker, N., Rounsevell, M. and Bogaert. 2007. Spatial analysis and modelling of land use distributions in Belgium. *Computers, Environment and Urban Systems*.31:188–205.
- Deng, X., Jiang, Q., Zhan, J., He, S. and Lin, Y. 2010. Simulation on the dynamics of forest area changes in Northeast China. *Journal of Geographical Sciences*. 20(4): 495-509.
- Echeverria, C., Coomes, D.A., Hall, M. and Newton, A.C. 2008. Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile. *Ecological Modelling*. 212:439-449.
- FAO. 2010. Global Forest Resource Assessment 2010. FAO Forestry Paper 163. 378 p. Available at www.fao.org/forestry/fra2010.
- Flamenco-Sandoval, A., Martínez-Ramos, M., and Masera, O.M. 2007. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological Conservation*. 138:131-145.
- Freitas, S.R., Hawbaker, T.J. and Metzger, J.P. 2010. Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*. 259: 410–417.
- Fuller, D.O., Meijaard, E.M., Christy, L. and Jessup, T.C. 2010. Spatial assessment of threats to biodiversity within East Kalimantan, Indonesia. *Applied Geography*. 30(3): 416-425.
- García, M., Riaño, D., Chuvieco, E. and Danson, F.M. 2010. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment*. 114:816–830.
- Gönen, M. 2007. Analyzing receiver operating characteristic curves with SAS. Cary, N.C. SAS Institute Inc. 134 p.

- Hamel, L. 2008. Model assessment with ROC curves. *The Encyclopedia of Data Warehousing and Mining*. 2nd Edition, Idea Group Publishers. 16 p.
- Hu, Z. and Lo, C.P. 2007. Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31:667-688.
- Legendre, P. 1993. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm?. *Ecology*. 74(6):1659-1673.
- Márquez-Linares, M.A., Treviño-Garza, E.J. and Jurado, E. 2005. Reemplazo de áreas arboladas por chaparrales y comunidades herbáceas en el período 1970-2000 en una microcuenca de Durango, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 58:54-65.
- Martínez, M.L., Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G., Castillo-Campos, G., García-Franco, J., Mehlreter, K., Equihua, M. and Landgrave, R. 2009. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*. 258:1856–1863.
- Návar, J. 2011. The spatial distribution of aboveground biomass in tropical forests of Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 13: 149-158.
- Pineda-Jaimes, N.B., Bosque, S.J., Gómez, D.M. and Franco, P.R. 2010. Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression. *Applied Geography*. 30(4):1–16.
- Pineda-Jaimes, N.B., Bosque-Sendra, J., Gómez-Delgado, M. y Plata-Rocha, W. 2008. Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 69:33-52.
- Pompa-García, M. 2008. Distribución espacial de la pérdida de vegetación en ecosistemas áridos de México. *Métodos en Ecología y Sistemática*. 3(3):13-22.
- Reyes-Hernández, H., Aguilar-Robledo, M., Aguirre-Rivera, J.R. y Trejo-Vázquez, I. 2006. Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el

- área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 59:26-42.
- Rincón-Ramírez, J. A. 2003. Cambio de uso de suelo en la sierra sur de Oaxaca mediante técnicas geomáticas. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Programa Forestal. 87 p.
- Romieu, I., Riojas-Rodríguez, H., Marrón-Mares, A.T., Schilman, A., Pérez-Padilla, R. and Maser, O. 2009. Improved biomass stove intervention in rural México. Impact on the respiratory Health of Women. *American Journal of Respiratory and Clinical Care Medicine*. 189:649-656.
- Rutherford, G.N., Bebi, P., Edwards, P.J., and Zimmermann, N.E. 2008. Assessing land-use statistics to model land cover change in a mountainous landscape in the European Alps. *Ecological Modelling*. 212:460-471.
- Rzedowski, J. 1963. El extremo boreal del bosque tropical siempre verde en norteamérica continental. *Plant Ecology*. 11(4):173-198.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 5121 p.
- Sifuentes, R. y Ramírez, G. 2010. Efectos de especificar un modelo incorrecto para regresión logística, con dos variables independientes correlacionadas. *Agrociencia*. 44:197-207.
- Solís-Moreno, R., Treviño-Garza, E.J., Aguirre-Calderon, O.A., Jiménez-Pérez, J. and Ybarra-Jurado, E. 2006. Análisis de la cubierta vegetal de la cuenca alta del río nazas en Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 12(2):139-143.
- Velázquez, A., Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P.C., Castro, R., Fernández, T. Bocco, G., Ezcurra, E. y Palacio, J.L. 2002. Patrones y Tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*. 62:21-37.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIÓN

El trabajo de investigación planteó como primera hipótesis que durante los últimos 15 años han existido cambios en el uso del suelo principalmente representados por la deforestación en las diferentes zonas biogeográficas del estado de San Luis Potosí, para ello se consideró el monitoreo de los recursos forestales en el estado de San Luis Potosí mediante diferentes técnicas empleadas en la Geomática. El estudio de cambio se abordó desde diferentes enfoques. Como resultado se determinó la tasa de deforestación mediante la comparación espacial de los mapas oficiales de uso del suelo más recientes a la fecha. Los mapas empleados fueron la serie II (1993) y la serie IV (2007) de vegetación y uso del suelo. Después de realizar diferentes técnicas de integración de datos espaciales, como la estandarización de la base de datos y el co-registro espacial de ambas fuentes cartográficas, se procedió a la construcción de matrices de cambio. Se calculó la tasa de deforestación anual para cada zona: Altiplano (0.11 %), Media (0.16 %), Centro (-0.12 %) y Huasteca (0.51 %). Estas tasas de deforestación se consideran bajas respecto a las reportadas en la literatura y su valor revela una tendencia a la alza respecto a cada zona biogeográfica. i.e. mientras el clima es más árido se detectaron menores tasas de deforestación; con excepción de la zona Centro, donde se encuentra la zona metropolitana de San Luis Potosí donde la tasa de deforestación reveló recuperación del ecosistema.

En segunda instancia se consideró que la dinámica de la vegetación está relacionada con la precipitación y puede ser modelada mediante imágenes anuales simulando una serie de tiempo. Para contestar a esto se monitorearon los cambios interanuales en la vegetación usando datos satelitales

hipertemporales de resolución media en el estado de San Luis Potosí, México y datos de precipitación. Se emplearon 489 imágenes del producto combinado MODIS MCD43A4 (500 m, resolución espacial) correspondientes al periodo 2000-2010 (11 años). Se realizaron compuestos temporales anuales de índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) usando la técnica de máximo valor compuesto (MVC, por sus siglas en inglés); el análisis de la serie de tiempo anual se realizó mediante la técnica estadística multivariada de Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés), donde la interpretación del segundo componente principal (PC, por sus siglas en inglés) fue quien recogió el detalle de los cambios observados. Se observó una relación altamente significativa ($p = 0.01$) entre el NDVI máximo anual y la precipitación anual; además de una ligera tendencia a la alza. Con base en los resultados obtenidos en esta parte de la investigación, asumiendo que exista la misma tendencia de incremento, se cree que la precipitación aumentará un 19.01 % (2020) y 41.83 % (2030) respecto a las estimaciones realizadas en 2010.

Para finalizar se consideró que la deforestación no es un fenómeno aleatorio sin causas aparentes y puede ser explicado con base en diferentes variables de índole espacial. Para probar dicha hipótesis se estudió la susceptibilidad de deforestación de los ecosistemas forestales remanentes del estado de San Luis Potosí, México (matorral, bosque y selva). Se emplearon técnicas de análisis espacial para ubicar las zonas deforestadas que ocurrieron en el área de estudio durante el 1993-2007. Se empleó la regresión logística para relacionar variables explicatorias de tipo social, de inversión, producción forestal, biofísicas y de proximidad para construir modelos predictivos de la susceptibilidad de deforestación en dos modos: global y por zona biogeográfica. En todos los modelos la deforestación se correlacionó directamente con la distancia a la agricultura de temporal, e inversamente con la pendiente, la distancia a carreteras y la distancia a localidades. Las demás variables fueron significativas en algunos casos y en otros presentaron relaciones duales que varían respecto a cada zona biogeográfica. Los resultados confirman que la selva remanente de la zona Huasteca es la más susceptible a la deforestación;

los dos modelos obtenidos estiman que poco más del 70 % de las selvas se encuentra en un nivel de susceptibilidad alto y muy alto.

El conocer la 1) distribución espacial de las zonas afectadas por el proceso de deforestación, 2) las causas que la predisponen y un 3) mapa de la susceptibilidad de los ecosistemas remanentes representan información básica para la generación de propuestas de protección y restauración de los ecosistemas forestales. Por otro lado, el 4) análisis del comportamiento del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) y su relación con la precipitación reveló una ligera tendencia a la alza.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Liliana Miranda Aragón

Candidata para el Grado de
Doctor en Ciencias con Especialidad en Manejo de Recursos Naturales

Tesis: MONITOREO DE LA DEFORESTACIÓN EN UNA PORCIÓN DEL
CENTRO NORTE DE MÉXICO MEDIANTE TÉCNICAS GEOMÁTICAS

Campo de estudio: Geomática Aplicada a los Recursos Naturales.

Datos personales: Nacida en Chiconcuac, Estado de México el 15 de octubre de 1977, hija de Salomón Miranda Jaimes (finado) y Alicia Aragón Barreto.

Educación: Ingeniero Agrónomo especialista en Parasitología Agrícola egresada de la Universidad Autónoma Chapingo en 2001, Maestra en Ciencias Forestales egresada del Colegio de Postgraduados en 2008.

Experiencia: A partir de 2001 ha trabajado en proyectos relacionados con Sanidad Forestal y como investigadora en el área de Geomática aplicada al estudio de los recursos forestales.