



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE LOS PROCESOS DE DEFORESTACIÓN EN LA
CUENCA DEL RÍO COYUQUILLA, GUERRERO**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

PRESENTA

LAURA PAULINA OSORIO OLVERA

TUTOR PRINCIPAL: DR. JEAN FRANÇOIS MAS CAUSSEL
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL
COMITÉ TUTOR: DR. JOSÉ MANUEL MAASS MORENO
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS
DRA. SILKE CRAM HEYDRICH
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE LOS PROCESOS DE DEFORESTACIÓN EN LA
CUENCA DEL RÍO COYUQUILLA, GUERRERO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

PRESENTA

LAURA PAULINA OSORIO OLVERA

TUTOR PRINCIPAL: DR. JEAN FRANÇOIS MAS CAUSSEL
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL
COMITÉ TUTOR: DR. JOSÉ MANUEL MAASS MORENO
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS
DRA. SILKE CRAM HEYDRICH
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO, 2013

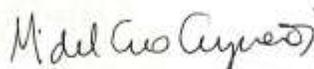
Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día 26 de noviembre de 2012, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** de la alumna **OSORIO OLVERA LAURA PAULINA** con número de cuenta **511012174** con la tesis titulada **"ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE LOS PROCESOS DE DEFORESTACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO COYUQUILLA, GUERRERO"**, realizada bajo la dirección del **DR. JEAN FRANCOIS MAS CAUSSEL**:

Presidente: DRA. MARÍA DEL CONSUELO BONFIL SANDERS
Vocal: DR. ADRIÁN GHILARDI
Secretario: DR. JOSÉ MANUEL MAASS MORENO
Suplente: DR. DIEGO PÉREZ SALICRUP
Suplente: DRA. SILKE CRAM HEYDRICH

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 13 de mayo de 2013.



DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
COORDINADORA DEL PROGRAMA

c.c.p. Expediente

Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México por ser parte de mi formación profesional y al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada, la cual está registrada con el número 245645.

Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Proyecto "Elaboración y Aplicación de modelos prospectivos de cambio de cobertura/uso del suelo" clave RR113511).

Al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) por los mapas de coberturas y usos del suelo brindados.

A los miembros de mi comité tutor por su apoyo incondicional, mi tutor principal, el Dr. Jean François Mas Causse, el Dr. José Manuel Maass Moreno y la Dra. Silke Cram Heydrich.

Agradecimientos a título personal

A mi tutor principal, Dr. Jean Francois Mas Causse y los miembros del comité tutorial, los Dres. José Manuel Maass Moreno y Silke Cram Heydrich, les agradezco profundamente su apoyo en los momentos más difíciles. Sus amplias experiencias y conocimientos me orientaron a cumplir este sueño.

A los miembros del Jurado por la revisión del manuscrito y las aportaciones que enriquecieron el trabajo, Dra. Ma. Consuelo Bonfil Sanders, Dr. José Manuel Maass Moreno, Dr. Adrián Ghilardi, Dra. Silke Cram Heydrich y Dr. Diego Pérez Salicrup.

A Gabriela Diego, por su amistad y apoyo en los procedimientos administrativos de la maestría.

Al Dr. Ernesto Armando Rodríguez por su apoyo en los procedimientos administrativos de la maestría.

A mi amiga M.G. Guadalupe Álvarez Verdugo, gracias por toda tu amistad, por toda tu paciencia para enseñarme los Sistemas de Información Geográfica en el momento más oportuno.

A la Lic. Raquel González García, M-T.I. Hugo Zavala Vaca, gracias por todo el apoyo en la informática.

A la M.G. Gabriela Cuevas García y M.C. José Antonio Navarrete, gracias por el apoyo en la fotointerpretación de imágenes de satélite y los Sistemas de Información Geográfica.

A mis amigos, Clara Andrade, Luz Ruíz, Araceli Rojas, Leticia Escamilla, Maggie Onchi, Aron Bernal, Paz Coba, Jorge Cortés, Nelly Aguilera, Sac-Nicté Carsal, Javier Valmor, Lenning Tamay, Ardian Romero y Melina Tapia.

A mi hermano M.C. Luis Alfredo Osorio Olvera y mi novio M.C. Francisco Guerra Martínez por todo su apoyo en la Estadística.

A mi familia, a quienes les debo la vida y mi entusiasmo y dedicación, mis padres Alfredo Osorio Santiago y Consuelo Olvera Alarcón y mi hermano Luis Alfredo Osorio.

A mis tíos y todos mis primos...

A Francisco Guerra por permitirme compartir mi vida a su lado, gracias por ser más que mi amigo. Agradezco a su familia, a la Sra. Isabel Martínez, el Sr. Mariano Guerra y sus hermanos Isamari y Mariano Guerra Martínez.

*A mis abuelos y a los padres
de mis abuelos...*

*A mis padres, Alfredo y Consuelo,
a mi hermano Luis Alfredo*

A Francisco Guerra, el amor de mi vida

Índice

Agradecimientos.....	5
Agradecimientos a título personal	6
Índice.....	8
Índice de Cuadros	13
Índice de Figuras.....	15
Resumen.....	19
Abstract	21
1. Introducción.....	23
1.1. Marco Teórico	23
1.2. El cambio de cobertura y uso de suelo	25
1.3. Las tasas de deforestación en el país.....	28
1.2. Problemática ambiental de la cuenca del río Coyuquilla.....	30
1.4. Planteamiento del problema	33
2. Objetivos	34
2.1. General	34
2.2. Particulares	34
3. Material y métodos	35
3.1. Área de Estudio.....	35
3.1.1. Ubicación Geográfica.....	35
3.1.2. Topografía	37
3.1.3. Pendiente.....	38
3.1.4. Clima.....	39
3.1.5. Edafología.....	40
3.1.6. Vegetación de la cuenca del río Coyuquilla	42
3.1.6.1. Bosque de Pino-Encino (BPE).....	42
3.1.6.2. Bosque Tropical Seco (BTS)	43
3.1.6.3. Bosque de Encino (BE)	43
3.1.7. Aspectos Socioeconómicos	44
3.1.7.1. Población.....	44

3.1.7.2. Migración	45
3.1.7.3. Educación.....	45
3.1.7.4. Salud	45
3.1.7.5. Bienes y Servicios	46
3.1.7.6. Economía	46
3.2. Materiales	47
3.2.1. Datos de percepción remota.....	47
3.2.2. Cartografía vectorial.....	47
3.2.3. Software.....	48
3.3. Métodos	48
3.3.1. Sistema clasificatorio para el análisis y cuantificación de los cambios .	48
3.3.3.1. Bosque Tropical Seco.....	49
3.3.3.2. Bosque de Encino	49
3.3.3.3. Bosque de Pino-Encino	50
3.3.3.4. Agricultura de Temporal	51
3.3.3.5. Pastizal Inducido	51
3.3.3.6. Asentamientos humanos	51
3.3.2. Corrección geométrica de las imágenes satelitales	52
3.3.3. Clasificación de las imágenes satelitales.....	52
3.3.4. Evaluación de la fiabilidad de las clasificaciones.....	53
3.3.5. Cálculo de las tasas de cambio	55
3.3.6. Matrices de transición	56
3.3.7. Identificación de las variables ambientales y socioeconómicas que se asocian con la deforestación	56
3.3.8. Modelación de los procesos de deforestación	60
3.3.8.1. Calibración.....	60
3.3.8.1. Elaboración de un mapa de probabilidad de deforestación	61
3.3.8.2. Fase de evaluación	62
4. Resultados	64
4.1. Corrección geométrica de las imágenes satelitales	64
4.2. Evaluación de la fiabilidad de las clasificaciones	64

4.3 Mapas de coberturas y usos del suelo	68
4.4. Estadísticas de la dinámica de los procesos de deforestación	71
4.4.1. Estadísticas de la dinámica de los procesos de deforestación para el período 1986-2011	71
4.4.2. Estadísticas de la dinámica de los procesos de deforestación para los períodos 1986-2000 y 2000-2011	73
4.5. Matrices de Transición	75
4.6. Identificación de las variables que se asocian a la deforestación	79
4.6.1. Análisis de correlación (Coeficiente de Spearman)	79
4.6.2. Identificación de las variables ambientales y socioeconómicas que se asocian con la deforestación en los períodos 1986-2000 y 2000-2011	84
4.6.2.1. Variables Ambientales (accesibilidad)	87
4.6.2.1.1. Bosque Tropical Seco	87
4.6.2.1.2. Bosque de Encino	89
4.6.2.1.3. Bosque de Pino-Encino.....	91
4.7.2.1. Variables Socioeconómicas (Demografía, Marginación, Economía y Migración).....	92
4.7.2.1.1. Demografía.....	92
4.7.2.1.1.1. Bosque Tropical Seco	92
4.7.2.1.1.2. Bosque de Encino	93
4.7.3.1.1. Marginación.....	93
4.7.3.1.1.1. Bosque Tropical Seco	93
4.7.3.1.1.2. Bosque de Encino	94
4.7.3.1.1.3. Bosque de Pino-Encino (Período 2000-2011)	96
4.7.4.1.1. Economía	97
4.7.4.1.1.1. Bosque Tropical Seco	97
4.7.4.1.1.2. Bosque de Encino	98
4.7.4.1.1.3. Bosque de Pino-Encino	98
4.7.4.1.1. Migración.....	99
4.8. Modelación de los procesos de deforestación	102
4.8.1. Calibración del modelo	102

4.8.1.1. Determinación de los rangos para el cálculo de los pesos de evidencia	102
4.8.1.2. Pesos de evidencia	103
4.8.1.3. Elaboración de un mapa de probabilidad de deforestación	107
4.8.1.4. Evaluación del modelo probabilístico	108
5. Discusión.....	119
5.1. Fiabilidad de las distintas clasificaciones de cobertura/usos de suelo...	119
5.2. Tasas de deforestación y matrices de cambio.....	122
5.3. Variables ambientales y socioeconómicas que se asocian a la deforestación	125
5.4. Modelación de los procesos de deforestación	129
6. Conclusiones.....	131
7. Literatura citada.....	133
8. Anexos	142
Anexo 1: Matrices de transición	142
Anexo 2: Modelación de los procesos de deforestación	144

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Características generales de los sensores más utilizados en el análisis de los procesos de cambio de cobertura y usos del suelo (Bakker et al., 2004)... 27	27
Cuadro 2. Comparación de las tasas de deforestación en México. La columna de la izquierda incluye datos reportados por académicos, mientras que la columna de la derecha contiene datos derivados de instancias de gobierno (modificado de Velázquez, 2008). 28	28
Cuadro 3. Variables explicativas ambientales que fueron utilizadas para analizar los procesos deforestación..... 57	57
Cuadro 4. Variables explicativas socioeconómicas consideradas para analizar los procesos de deforestación. 58	58
Cuadro 5. Errores Medio Cuadráticos tomados de las imágenes satelitales Landsat MSS, ETM+ y SPOT. 64	64
Cuadro 6. Matriz de confusión del mapa de coberturas/usos del suelo del 2011, con corrección de Card (1982). Los datos se encuentran representados en valores relativos..... 66	66
Cuadro 7. Matriz de confusión del mapa de coberturas/usos del suelo del 2000, con corrección de Card (1982). Los datos se encuentran representados en valores relativos..... 66	66
Cuadro 8. Matriz de confusión del mapa de coberturas/usos del suelo del 1986, con corrección de Card (1982). Los datos se encuentran representados en valores relativos..... 67	67
Cuadro 9. Estadísticas generales de la dinámica de cambio en el período completo 1986-2011..... 72	72
Cuadro 10. Estadísticas generales de la dinámica de cambio en los períodos 1986-2000 y 2000-2011. 73	73
Cuadro 11. Variables ambientales que se asocian con la pérdida de las coberturas forestales: bosque tropical seco (BTS), bosque de encino (BE) y bosque de pino-encino (BPE) en los períodos 1986-2000 y 2000-2011. Códigos de significancia: 0***, 0.001**,0.01*..... 85	85
Cuadro 12. Variables socioeconómicas que se asociaron a la pérdida de las coberturas forestales: bosque tropical seco (BTS), bosque de encino (BE) y bosque de pino-encino (BPE) en los períodos 1986-2000 y 2000-2011. Códigos de significancia: 0***, 0.001**, 0.01..... 86	86

Cuadro 13. Resumen de las variables que se relacionaron con la pérdida de las coberturas forestales en los períodos 1986-2000 y 2000-2011. Códigos: - relación negativa sobre el cambio de cobertura; --: relación negativa fuerte sobre el cambio de cobertura; +: relación positiva sobre el proceso de cambio de cobertura; ++: relación positiva fuerte sobre el proceso de cambio de cobertura. 101

Cuadro 14. Resumen de corrección de pesos de evidencia para el período 1986-2000. 105

Índice de Figuras

Figura 1. Localización de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero	35
Figura 2. Municipios de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero.	36
Figura 3. Modelo digital de elevación de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero. .	37
Figura 4. Pendientes de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero.	38
Figura 5. Mapa climático de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero	39
Figura 6. Mapa edafológico de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero.....	41
Figura 7. Distribución de la población de la cuenca del río Coyuquilla para los años 2000 y 2010 de acuerdo al Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2000) y al Censo de Población y Vivienda (2010)	44
Figura 8. Sitios aleatorios estratificados (Tomado de Mas, 2003).....	54
Figura 9. Construcción de la curva ROC. La curva une vértices que indican la tasa de falsas alarmas vs tasa de aciertos en varios niveles de umbrales del potencial de transición; a) Curva ROC con capacidad predictiva y b) Curva ROC sin capacidad predictiva.....	63
Figura 10. Mapa de uso del suelo y vegetación de la cuenca del río Coyuquilla en el año 1986.....	68
Figura 11. Mapa de uso del suelo y vegetación de la cuenca del río Coyuquilla en el año 2000.....	69
Figura 12. Mapa de uso del suelo y vegetación de la cuenca del río Coyuquilla en el año 2011.....	70
Figura 13. Comparación entre las pérdidas de coberturas forestales y ganancias de los usos del suelo superficiales (%) en el período 1986-2011.....	72
Figura 14. Comparación entre las pérdidas de coberturas forestales y ganancias de usos del suelo superficiales (%) para el período 1986-2000.....	74
Figura 15. Comparación entre las pérdidas de coberturas forestales y ganancias de usos del suelo superficiales (%) para el período 2000-2011.....	75
Figura 16. Representación esquemática de los procesos de cambio de coberturas/usos del suelo en el período 1986-2000. Los datos se encuentran representados en valores absolutos. Estos resultados se pueden comparar con la matriz de transición (Anexo 1).....	77

Figura 17. Representación esquemática de los procesos de cambio de coberturas/ usos del suelo en el período 2000-2011. Los datos se encuentran representados en valores absolutos. Estos resultados se pueden comparar con la matriz de transición (Anexo 1).....	78
Figura 18. Se muestra un ejemplo de la interpretación de los resultados de correlación de variables a través del análisis del Coeficiente de Spearman. Las variables que se analizan son altitud y distancia a localidades. El coeficiente de correlación es menor a 0.70 por lo que fue considerada para posteriores análisis debido a su independencia.....	79
Figura 19. Análisis de Correlación Spearman entre variables ambientales en el año 2000; a) distancia a carreteras; b) distancia a localidades; c) distancia a ríos; d) tipo de suelo; e) altitud; y f) pendiente.....	80
Figura 20. Análisis de Correlación Spearman entre variables ambientales del 2011; a) distancia a carreteras; b) distancia a localidades; c) distancia a ríos; d) tipo de suelo; e) altitud; y f) pendiente.	81
Figura 21. Análisis de Correlación Spearman entre variables socioeconómicas 2000; a) población total; b) población masculina; c) población de 15 a 49 años; d) población que habla lengua indígena; e) población analfabeta; f) población sin agua entubada; g) población de viviendas habitadas con piso de tierra; h) población con acceso a servicios de salud; e i) población económicamente activa. Los valores están representados en valores relativos.....	82
Figura 22. Análisis de Correlación Spearman entre variables socioeconómicas 2011; a) población total; b) población masculina; c) población de 15 a 49 años; d) población que habla lengua indígena; e) población analfabeta; f) población sin agua entubada; g) proporción de viviendas habitadas con piso de tierra; h) población con acceso a servicios de salud; e i) población económicamente activa. Los valores están representados en valores relativos.....	83
Figura 23. Relaciones logísticas entre las variables explicativas --a) pendiente; b) altitud; c) distancia a carreteras-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque tropical seco en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	88
Figura 24. Relaciones logísticas entre las variables explicativas --a) pendiente; b) altitud; c) distancia a carreras; d) distancia a localidades-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque de encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	90
Figura 25. Relaciones logísticas entre las variables explicativas --a) Distancia a ríos; b) pendiente; c) altitud; d) distancia a carreteras; e) distancia a localidades-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque de pino-encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	91

Figura 26. Relación logística entre la variable explicativa --a: Población total-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque tropical seco en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	92
Figura 27. Relación logística entre la variable explicativa --b) Población total-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque de encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	93
Figura 28. Relaciones logísticas entre las variables explicativas --a) proporción de población analfabeta; b) proporción de población que tuvo acceso a servicios de salud; c) proporción de viviendas habitadas con piso de tierra-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque tropical seco en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	94
Figura 29. Relaciones logísticas entre las variables explicativas --a) proporción de población analfabeta; b) proporción de viviendas habitadas con piso de tierra; c) proporción de población que habla lengua indígena; d) proporción de población con servicios de la salud-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque de encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	95
Figura 30. Relaciones logísticas entre las variables explicativas --a) proporción de población con acceso a servicios de salud; b) proporción de viviendas habitadas con piso de tierra c) proporción de población analfabeta-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque de pino-encino en el período 2000-2011.	96
Figura 31. Relación logística entre la variable explicativa --a) proporción de población económicamente activa-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque tropical seco en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	97
Figura 32. Relación logística entre la variable explicativa --a) proporción de población económicamente activa-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque de encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	98
Figura 33. Relación logística entre la variable explicativa --a) proporción de población económicamente activa-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque de pino-encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	99
Figura 34. Relación logística entre la variable explicativa --proporción de población de 15 a 49 años-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque tropical seco (izquierda) y el bosque de encino (derecha) en el período 1986-2000.	99
Figura 35. Relación logística entre las variables explicativas --a) población masculina; b) población de 15 a 49 años-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque de pino-encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.	100
Figura 36. Ejemplo de cálculo de rangos de evidencia para la transición bosque tropical seco a asentamientos humanos en el período 1986-2000.	102

Figura 37. Ejemplo de pesos de evidencia para la transición bosque tropical seco a asentamientos humanos en el período 1986-2000: a) pendiente; b) población total.	104
Figura 38. Ejemplo de modificación del peso de evidencia para la transición BTS a agricultura de temporal (período 1986-2000): a) muestra el primer resultado del cálculo del peso de evidencia; b) muestra la misma variable con modificación ya que el último peso no tenía significancia estadística.	104
Figura 39. El gráfico muestra el resultado del cálculo del peso de evidencia para la transición BTS a pastizal inducido correspondiente a la variable “población de 5 años o más que habla alguna lengua indígena”; esta variable no tiene ninguna influencia en la transición, por lo tanto fue descartada.	105
Figura 40. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque tropical seco a asentamientos humanos.	109
Figura 41. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque tropical seco al pastizal inducido.	110
Figura 42. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque tropical seco a agricultura de temporal.	111
Figura 43. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de encino a asentamientos humanos.	112
Figura 44. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de encino al pastizal inducido.	113
Figura 45. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de encino a agricultura de temporal.	114
Figura 46. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de pino-encino a asentamientos humanos.	115
Figura 47. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de pino-encino a pastizal inducido.	116
Figura 48. Resultados de la evaluación del estadístico ROC para las distintas coberturas forestales. La curva une vértices que indican la tasa de falsas alarmas vs la tasa de aciertos como superficie potencial de transición: a) bosque tropical seco a asentamientos humanos; b) bosque tropical seco a pastizal inducido c) bosque tropical seco a agricultura de temporal; d) bosque de encino a asentamientos humanos; e) bosque de encino a pastizal inducido; f) bosque de encino a agricultura de temporal; g) bosque de pino-encino a asentamientos humanos; y h) bosque de pino-encino a pastizal inducido.	118

Resumen

El análisis de los procesos de deforestación es un tema crucial para la correcta gestión de los recursos naturales. El presente estudio tuvo por objetivo analizar y modelar los procesos de deforestación en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, durante los períodos 1986-2000 y 2000-2011. Se obtuvieron los mapas de coberturas/ usos del suelo de las imágenes: Landsat MSS, 1986; Landsat ETM, 2000 y SPOT, 2011. Se determinó un sistema de clasificación para el análisis y cuantificación de los cambios en la cuenca del río Coyuquilla con base en el sistema clasificatorio del Inventario Nacional Forestal (INF); se definieron seis categorías de coberturas y usos de suelo: (1) asentamientos humanos; (2) pastizal inducido; (3) agricultura de temporal; (4) bosque tropical seco; (5) bosque de encino; y (6) bosque de pino (incluye: bosque de pino y bosque de pino-encino). Fue empleado para el procesamiento de las imágenes satelitales un método de clasificación combinando un enfoque digital y visual, para ello, se siguió el método de clasificación interdependiente (FAO, 1996) para generar mapas de coberturas/ usos de suelo en las distintas fechas. Se evaluó la fiabilidad de los distintos mapas de coberturas/ usos de suelo; los resultados mostraron que las distintas clasificaciones se encontraron dentro del rango de aceptabilidad; las imágenes mejor interpretadas correspondieron a la escena SPOT 2011 (75%), seguido de la escena Landsat ETM+ (73%) y, por último, la escena Landsat MSS (71%). Se evaluaron y cuantificaron los cambios de las distintas coberturas/ usos de suelo. En el presente estudio reportamos una pérdida de 16% de cobertura forestal durante el período 1986-2000 y una pérdida de cobertura forestal del 22% en el período 2000-2011 con una tasa anual de cambio de -1.3% y -2.4% respectivamente. En el período 1986-2000, las mayores tasas anuales se dieron en el bosque tropical seco (-3.71%), seguido del bosque de encino (-1.36%) y, por último, el bosque de pino-encino (-0.27%). En el período 2000-2011, se registró un aumento en las tasas anuales en la cobertura bosque de encino (-5.54%), seguido del bosque tropical seco (-4.53%) y el bosque de pino-encino (-0.98%). La pérdida de las distintas coberturas forestales se debió principalmente a la conversión del uso del suelo a pastizal inducido, seguido de los asentamientos humanos y la agricultura de temporal. Se utilizó el método de pesos de evidencia y los Modelos Lineales Generalizados para identificar las variables ambientales y socioeconómicas que se asociaron a la pérdida de las distintas coberturas forestales en los dos períodos analizados. Entre las variables ambientales, las bajas pendientes y la cercanía a carreteras fueron las principales variables ambientales que se asociaron positivamente con la pérdida de las distintas coberturas forestales en ambos períodos. Respecto a las variables socioeconómicas que se analiza en las coberturas bosque tropical seco y bosque de encino, en ambos períodos, la deforestación estuvo asociada positivamente a

la proporción de población analfabeta y a la proporción de población que no tuvo servicios a la salud. Estas variables sugirieron que, en ambos períodos, la deforestación del bosque tropical seco y bosque de encino ocurrieron en áreas marginadas. La pérdida de la cobertura bosque de pino-encino, en el primer período, se asoció positivamente a la proporción de población que participó en la producción económica y negativamente a la proporción de población masculina. En el segundo período, se asoció positivamente con la proporción de la población que no participó en la producción económica, la proporción de la población que no tuvo derecho a la salud y a la proporción de la población de 15 a 49 años. Una vez analizadas las variables ambientales y socioeconómicas que se asociaron a la pérdida de las distintas coberturas forestales, se elaboró un mapa probabilístico para cada transición con la finalidad de identificar las áreas más propensas a cambiar de cobertura. Para su obtención, se utilizaron las coberturas de los años 1986 y 2000 y las variables explicativas resultantes del primer período analizado. En los mapas de probabilidad fue posible identificar que las áreas más propensas a los cambios de cobertura se localizan en áreas de fácil acceso, generalmente, estas zonas tienen bajas pendientes y se encuentran cerca de centros urbanos y ríos.

Finalmente, a través del método estadístico “Característica de Operación Relativa (ROC)” fue posible validar los modelos probabilísticos, con base en la comparación de las áreas que cambiaron o no y las probabilidades de cambio. Los resultados mostraron mejores predicciones para la transición asentamientos humanos y agricultura de temporal y bajas predicciones para la transición a pastizal inducido.

Abstract

The analysis of the processes of deforestation is a crucial issue for the proper management of natural resources. The present study had the objective to analyze and model the processes of deforestation in Coyuquilla River Basin, Guerrero, for the periods 1986-2000 and 2000-2011. Maps of land cover/land use were obtained from the images: Landsat MSS, 1986, Landsat ETM, 2000 and SPOT, 2011. We determined a classification system for the analysis and quantification of changes in Coyuquilla River Basin based on the classification system of the National Forest Inventory (IFN); we defined six categories of land cover and use: (1) human settlements, (2) induced pasture, (3) seasonal agriculture, (4) tropical dry forest, (5) oak forest, and (6) oak-pine forest (includes pine and pine-oak forest). For the processing of satellite images it was employed a classification method that combines a digital and visual approach, for it, it was followed by an interdependent classification method (FAO, 1996) to generate maps of cover / land use in different data. We evaluated the accuracy of the different maps of cover / land use; the results showed that the different classifications were within the acceptable range, the images best interpreted corresponded to the scene SPOT 2011 (75%), followed by the scene Landsat ETM + (73%), and finally, Landsat MSS scene (71%). Moreover, it was evaluated and quantified changes of the different maps of land cover/ land use. In the present study we report a loss of forest coverage of 16% during the 1986-2000 period and a loss of forest coverage of 22% in the period 2000-2011 with an annual rate of change of forest of -1.3% and -2.4% respectively. According to the statistics of change in the period 1986-2000, the highest annual rates were in the tropical dry forest (-3.71%), followed by oak forest (-1.36%) and, finally, the pine-oak forest (-0.27%). In the period 2000-2011, there was an increase in annual rates of oak forest coverage (-5.54%), followed by tropical dry forest (-4.53%) and pine-oak forest (-0.98%). The loss of various forest cover was primarily due to the conversion of land use induced pasture, followed by human settlements and seasonal agriculture. We used the weights of evidence method and Generalized Linear Models to identify environmental and socioeconomic variables that were associated with the loss of forest cover in the two periods analyzed. Among the environmental variables, the low slopes and proximity to roads were the main environmental variables that were positively associated with the loss of the different forest cover in both periods. Regarding socioeconomic variables analyzed in the dry tropical forest cover and oak forest, in both periods, deforestation was positively associated with the proportion of population illiterate and the proportion of the population without access to health services. These variables suggest that, in both periods, deforestation of tropical dry forest and oak forest occurred in marginalized areas. The loss of coverage of pine-oak forest in the first period was positively associated with the proportion of people who participated in economic

output and negatively to the proportion of male population. In the second period, was positively associated with the proportion of the population that did not participate in economic production, the proportion of the population who had no right to health and the proportion of the population of 15-49 years. After analyzing the environmental and socioeconomic variables that were associated with the loss of the different forest cover, a probabilistic map was developed for each transition probability in order to identify the areas most likely to change their coverage. To obtain them, we used the coverage for 1986 and 2000 and the explanatory variables resulting from the first period. In probability maps was possible to identify the areas most prone to changes in coverage are located in easily accessible areas, generally, these areas have low slopes and areas located near urban centers and rivers.

Finally, through the statistical method "Relative Operating Characteristic (ROC)" was possible to validate the probabilistic models, based on the comparison of the areas that have changed or not and the likelihood of change. The results showed better predictions for the transition settlements and seasonal agriculture and low predictions for the transition to pasture induced.

1. Introducción

1.1. Marco Teórico

En la actualidad está ampliamente documentado que la pérdida de cobertura forestal conlleva consecuencias ecológicas importantes, tales como la pérdida de biodiversidad, la fragmentación del hábitat, la alteración hidrológica, la degradación de suelos, la pérdida de nutrientes y el cambio climático (Giardina et al., 2000; Lambin et al., 2001; Geist y Lambin, 2002; Fox et al., 2003; DeFries et al., 2006; Farley et al., 2011). Esta pérdida de cobertura se ha atribuido a factores naturales (p. ej. incendios y huracanes; Amacher y Merry, 2008; Sorrensen, 2008) y sobre todo humanos (p. ej. sobreexplotación de madera; Lambin et al., 2001; Foley et al., 2005).

Las actividades productivas, tales como la agricultura y la ganadería, se han reconocido como las principales causas de la pérdida de cobertura forestal (Noble y Dirzo, 1997; Coomes et al., 2008). Estas actividades promueven un proceso denominado deforestación (Karancsi, 2010). De acuerdo con la FAO (2001), la deforestación se refiere a una disminución de la cobertura forestal por debajo del 10% respecto a su cobertura original. A los estudios que analizan las transiciones de las coberturas/ usos del suelo se les conoce como análisis del cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS). De este modo, la cobertura del suelo es definida por los atributos de la superficie terrestre y las características del subsuelo, incluyendo la biota, el suelo y la topografía; mientras que el uso del suelo está definido por los propósitos con los que el humano explota la cobertura del suelo (Lambin et al., 2003). Por medio del estudio del CCUS es posible cuantificar la extensión actual de los bosques en un territorio y entender las causas de fenómeno; pero también se pueden generar modelos espacio-temporales de los procesos de cambio ocurridos durante determinados períodos (mapas de procesos de cambio; Turner y Meyer, 1994; Lambin et al., 2001).

Aunque su análisis no evalúa de manera detallada los cambios que podrían ocurrir a nivel de la estructura y composición del bosque por efecto del manejo,

sus productos son considerados de gran utilidad para apoyar políticas encaminadas a disminuir o revertir el deterioro ambiental (Velázquez et al., 2002).

El presente estudio tuvo por objetivo analizar y modelar los procesos de deforestación en la cuenca del Río Coyuquilla, Guerrero debido a que esta región ha presentado, en el período de 1976 a 2002, una drástica reducción de la cobertura forestal (18% de acuerdo a Duran et al., 2011).

La información contenida en el presente trabajo se organiza de la siguiente forma:

- (1) En la primera sección se revisan los antecedentes de los procesos de CCUS.
- (2) En la segunda sección se presentan los materiales y métodos empleados en el trabajo: se describe el área de estudio, los insumos cartográficos, el sistema clasificatorio para el análisis de los cambios, los métodos utilizados para la corrección geométrica de las imágenes satelitales, la evaluación de la fiabilidad de las clasificaciones, el cálculo de las tasas de cambio, las matrices de transición, la identificación de los conductores de la deforestación y la modelación de los procesos de deforestación.
- (3) En la tercera sección se reportan los resultados encontrados en la presente investigación. Se muestran los resultados de la evaluación de las correcciones geométricas realizadas a las imágenes satelitales, la evaluación de la fiabilidad de las clasificaciones, el cálculo de las tasas de cambio, las matrices de transición, la identificación de los conductores de la deforestación y la modelación de los procesos de deforestación.
- (4) En la cuarta sección se discuten los resultados del presente trabajo.
- (5) Por último, en la quinta sección se presentan las conclusiones obtenidas.

1.2. El cambio de cobertura y uso de suelo

Una de las manifestaciones más evidentes de la actividad humana en la biosfera terrestre ha sido el proceso de cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS). De acuerdo a Maass (1995) los patrones de conversión implican la remoción casi total de la estructura y composición de la vegetación. El mismo autor afirma que estos patrones de conversión comienzan con los sitios de mayor potencial, dejando las tierras de baja pendiente y con baja eficiencia y soporte técnico para los agricultores de subsistencia. Las variedades de crecimiento corto como maíz, haba, arroz y sorgo son los cultivos más comunes en el sistema de agricultura. Existe una fuerte tendencia hacia el establecimiento de pastizales extensivos. A través de estas prácticas de uso de la tierra, las sociedades han obtenido una gran variedad de servicios, incluyendo un aumento en la producción de alimentos (Farley et al., 2011); sin embargo, el desarrollo de estas actividades ha traído consigo implicaciones negativas en la provisión de servicios ecosistémicos (p.ej. provisión de agua, regulación del clima, captación de dióxido de carbono; Zeledon y Kelly, 2008) y, simultáneamente, pueden ocasionar severas transformaciones en el ecosistema (Carey et al., 2000). Entre las más importantes consecuencias ecológicas de conversión forestal están: (1) la pérdida de diversidad biológica; (2) la reducción de la cobertura del suelo, lo cual reduce la capacidad de infiltración y fertilidad del suelo; (3) la alteración del ciclo hidrológico, incrementando la escorrentía, la erosión del suelo y el riesgo de inundación; (4) los cambios en el estado de nutrientes del suelo, debido al efecto combinado de la adición de los minerales de la vegetación removida; y (5) la pérdida de nutrientes del ecosistema como resultado de los elementos minerales volátiles, cenizas arrastradas por el viento y erosión del suelo (Maass, 1995). Ante esta situación, se ha reconocido la necesidad de entender las causas del proceso de CCUS. La identificación de las causas del CCUS requiere del entendimiento de cómo las personas toman decisiones del uso del suelo y cómo la asociación de otros factores económicos, políticos, sociales e institucionales interactúan en contextos específicos para influir en la toma de decisiones del uso del suelo (Lambin et al., 2003). La combinación de estos factores conduce a escenarios de CCUS, en muchos casos, difíciles de

comprender debido a la imposibilidad de incluir todos los factores causales o por la calidad desigual (escala y precisión) de los datos disponibles (Mertens y Lambin, 2000). En este contexto, Geits y Lambin (2002) distinguen que los factores que se asocian al proceso de CCUS se les puede dividir en dos principales grupos: a) factores próximos y b) factores subyacentes. Los primeros constituyen las actividades humanas o acciones inmediatas que se derivan del uso del suelo y afectan directamente a la cobertura vegetal; entre las actividades que se originan de esta acción están la extracción de madera, la expansión agropecuaria y la expansión de infraestructura. Los factores subyacentes son fundamentales para el entendimiento de las causas inmediatas; entre los factores que los conforman están las variables sociales, políticas, económicas, demográficas y biofísicas. La identificación de estos factores es esencial para entender los procesos de CCUS y constituyen uno de los desafíos en la investigación del análisis del cambio de cobertura y uso del suelo (ACCUS). Al respecto, el programa de investigación del ACCUS se ha enfocado en entender estas relaciones a través del análisis y monitoreo de los cambios, ya que a través de éstos ha sido posible determinar los patrones y tasas de conversión forestal. Se han desarrollado diferentes métodos para el análisis y monitoreo de los procesos de CCUS. Un primer acercamiento es a través de la comparación de superficies reportadas por autores u organizaciones para distintas coberturas en distintas fechas. Sin embargo, este tipo de información no ofrece certidumbre debido al desconocimiento del tipo de cartografía empleada (Mas et al., 2004). Otra de las formas de cuantificar los CCUS es por medio de la comparación de cartografía existente para el mismo sitio en diferentes fechas; esto se logra siempre y cuando se respete la escala y los sistemas de clasificación sean compatibles (Velázquez et al., 2002). Finalmente, uno de los métodos más empleado en la investigación científica para la cuantificación y la comprensión del fenómeno es mediante el uso de datos derivados del procesamiento de imágenes satelitales multi-temporales (Singh, 1989). Este último enfoque en conjunto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han añadido una nueva dimensión para la evaluación y el entendimiento de los CCUS (Batisella, 2003). Hoy en día, existe una amplia

variedad de plataformas satelitales para el mapeo de los CCUS (Cuadro 1). Por medio de las imágenes satelitales es posible obtener las transiciones de las coberturas/usos de suelo, las cuales pueden ser útiles para la comprensión de la relación entre las actividades antropogénicas y el ambiente.

Cuadro 1. Características generales de los sensores más utilizados en el análisis de los procesos de cambio de cobertura y usos del suelo (Bakker et al., 2004).

Plataforma	Sensor	Número de banda	Rango espectral (μm)	Resolución espacial (m)	Ancho de barrido (km)	Resolución radiométrica (bits)
Landsat	Multi-Spectral Scanner (MSS)	1	0.5-0.6	80	185	8
		2	0.6-0.7	80	185	8
		3	0.7-0.8	80	185	8
		4	0.8-0.11	80	185	8
	Thematic Mapper (TM)	1	0.45-0.52	30	180	8
		2	0.52-0.6	30	180	8
		3	0.63-0.69	30	180	8
		4	0.76-0.90	30	180	8
		5	1.55-1.75	30	180	8
		6 (térmica)	10.4-12.5	120	180	8
		7	2.08-2.35	30	180	8
	Enhanced Landsat Mapper Plus (ETM+)	1	0.45-0.52	30	183	8
		2	0.53-0.61	30	183	8
		3	0.63-0.69	30	183	8
		4	0.78-0.9	30	183	8
		5	1.55-1.75	30	183	8
6		10.4-12.5	30	183	8	
7		2.09-2.35	30	183	8	
8		0.52-0.9	15	183	8	
Système Spot	(alta resolución radiométrica)		0.50-0.59	10	60	8
5 HRG Pour l'Observation de la Terre			0.61-0.68	10	60	8
			0.78-0.89	10	60	8
			1.58-1.75	10	60	8
SPOT			0.48-0.70	5	60	8

1.3. Las tasas de deforestación en el país

México abarca más de dos millones de km² y es reconocido como uno de los países más biodiversos en el mundo: contiene más del 12% de la biota mundial (Toledo y Ordoñez, 1993). Sin embargo, alrededor del cincuenta por ciento de su cobertura original forestal se ha perdido (FAO, 1996; Velazquez et al., 2002).

Las estimaciones en cuanto a las tasas de deforestación han oscilado de 365,000 ha/año a más de 1,600,000 ha/año (Velazquez et al., 2002). Estas discrepancias se deben a la diversidad de métodos utilizados, tales como el tipo de información (fotografías aéreas e imágenes satelitales), las escalas de trabajo, el período de análisis y el tipo de clasificación empleado. En el Cuadro 2 se muestran las principales estimaciones de las tasas de deforestación a nivel nacional. Estos resultados difieren entre las instituciones gubernamentales y las instituciones académicas (Velázquez, 2008).

Cuadro 2. Comparación de las tasas de deforestación en México. La columna de la izquierda incluye datos reportados por académicos, mientras que la columna de la derecha contiene datos derivados de instancias de gobierno (modificado de Velázquez, 2008).

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

A pesar de contar con diversas estimaciones sobre la pérdida de bosques y selvas se ha reconocido la necesidad de mejorar los instrumentos que permitan la cuantificación de los recursos forestales en México. Para ello, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) desarrollaron esfuerzos para cartografiar a nivel nacional las coberturas/ usos del suelo con el objetivo de proveer una base de datos actualizada y compararla con información anterior y así calcular las tasas de deforestación con base en productos cartográficos actualizados (Mas et al., 2004). De esta forma, INEGI elaboró las Series III y IV, del 2002 y 2007, respectivamente y, por último en el año 2000, el Instituto de Geografía de la UNAM llevó a cabo un mapeo de las coberturas/ usos del suelo con el fin de actualizar la Serie II de INEGI y poder reportarlo en el Inventario Forestal Nacional (IFN). A partir de esta información se pudo evaluar y generar una base de datos multi-fecha para el territorio nacional con el propósito de describir la distribución de los patrones de CCUS y permitir la cuantificación y caracterización espacial de los cambios. Para lograr esto, Mas et al. (2004) presentaron un análisis de los procesos de CCUS basado en la comparación cartográfica entre las bases de datos de INEGI e Inventario Forestal Nacional (IFN) para analizar la calidad informativa de estas bases de datos. Con esta información fue posible estimar que entre 1976 y 2000, más de 20,000 km² de bosques templados, 60,000 km² de bosques tropicales y 45,000 km² de matorrales fueron eliminados y consecuentemente generando un cambio de cobertura/ uso de suelo. Esto representa un promedio anual de áreas deforestadas de 90,000; 265,000; y 195,000 ha; y tasas de deforestación de 0.25, 0.76 y 0.33% por año, respectivamente. Asimismo, se ha reportado que en la cobertura forestal bosque tropical seco, en el año 1990 representó un total de 270,000 km² (lo que representaba el 14% del país) de los cuales 3.6% se mantuvieron como bosque intacto 3.8% presentaron un grado de alteración 3.1 % mostraron degradación y un 3% se convirtieron a otros usos del suelo (Trejo y Dirzo, 1999). Ante esta situación se ha reconocido la necesidad de realizar estudios enfocados a cuantificar y entender los factores que están involucrados en la dinámica de la deforestación en las distintas regiones del país.

1.2. Problemática ambiental de la cuenca del río Coyuquilla

El estudio realizado por Durán et al (2011) muestra que la cuenca del río coyuquilla (la cual abarca los municipios de Petatlán, Tecpán de Galeana y Coyuca de Catalán, ubicados en la región “Costa Grande de Guerrero”) se ha caracterizado por altos niveles de violencia debido a múltiples actores relacionados con la tala ilegal, el desarrollo de extensas áreas de pastizales para la ganadería, la violencia estatal y levantamientos guerrilleros que protestaban contra las políticas gubernamentales, muchas de las cuales están relacionadas con los bosques como recurso económico.

De acuerdo a Bartra (1996) a partir del año 1910, los recursos forestales de la región “Costa Grande de Guerrero” fueron codiciados por compañías madereras extranjeras, quienes se adueñaron de aproximadamente más de 150,000 ha de bosque; mientras tanto en la década de los cincuentas, campesinos de la región desarrollaron experiencias autogestionarias como contrapeso al proceso de privatización ante la falta de recursos económicos para la explotación propia de sus bosques tales como la falta de financiamiento, de caminos en la sierra y de medios para el transporte de la madera; este hecho continuó hasta los años setenta, cuando cuatro quintas partes del área forestal se encontraban en poder de un puñado de compañías; así mismo, Bartra (1996) afirma que el gobierno de Luis Echeverría Álvarez promovió una alianza entre el Estado y los campesinos con el fin de fomentar la industrialización y comercialización de sus productos agropecuarios y forestales, creándose un número importante de institutos de fomento y de empresas paraestatales; sin embargo, las estructuras caciquiles persistieron. En el año 1972, como parte del modelo gubernamental, se creó la Forestal Vicente Guerrero, un organismo público descentralizado, cuya función fue absorber compañías madereras que operaban en la zona, puesto que se le concedieron los derechos exclusivos para explotar los bosques, con esto, las relaciones se volvieron menos conflictivas de lo que resultaban con las empresas privadas; este esquema gubernamental persistió hasta la llegada a la gubernatura de Francisco Ruiz Massieu, quien, en consonancia con la política neoliberal de Carlos Salinas de Gortari deshizo las paraestatales forestales, en donde habían

tenido ciertos avances los campesinos forestales (Cienfuegos, 2001). Ante este hecho y paralelamente a la aplicación del Tratado de Libre Comercio (entre México y Estados Unidos), en 1995, la compañía estadounidense Boise-Cascade (Idaho, E.U.) firmó un convenio con el entonces gobernador de Guerrero, Rubén Figueroa, por el que se otorgaba, durante un período de 5 años (1995-2000), la concesión y derecho exclusivo de compra y explotación de madera en los ejidos de la Costa Grande de Guerrero (Camacho, 2000). La empresa dirigió sus operaciones a esta región debido a que existía (y sigue existiendo) una mezcla explosiva de tres elementos: la extrema pobreza, el deterioro ambiental y la violencia endémica, lo que permitía hacer negocios con bajos costos de mano de obra (20 a 30 pesos por metro cubico de extracción forestal) y aprovecharse de la actividad económica de los campesinos, quienes se dedicaban principalmente a la actividad ganadera (Cienfuegos, 2001; Díaz, 2012). En respuesta a esto, en el año 1998, un grupo de campesinos y comerciantes de la zona tramitaron un registro como asociación civil con el nombre de Organización de Campesinos Ecológicos de la Sierra de Petatlán y Coyuca de Catalán (OCEPS); esta organización, liderada por Rodolfo Montiel Flores y Teodoro Cabrera García, tuvo el objetivo de promover la concientización acerca del ecocidio que se estaba cometiendo en esta sierra (Bartra, 2001). Esta lucha organizada por la OCEPS rindió una victoria aparente: se logró la suspensión de las actividades de Boise-Cascade, sin embargo, el ecocidio continuó por medio de organizaciones paramilitares y los caciques de la región (Pérez, 2001). La actividad de defensa del bosque continúa a pesar de la represión contra la OCEPS (encarcelamiento de Rodolfo Montiel Flores y Teodoro Cabrera García y los crímenes de campesinos no muy conocidos culminando con el asesinato de Digna Ochoa, la abogada defensora de este movimiento). En la actualidad, las labores por defensa de los bosques subsisten, no importando el sinnúmero de crímenes que han sufrido los miembros de la OCEPS (Bartra, 2001; García, 2012; Díaz, 2012).

Por su parte, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) mediante un análisis basado en imágenes de satélite, calculó que entre el año 1992 y 2000 se perdieron en la zona 86,000 ha de

bosques de las 226,203 que existían, representando una pérdida del 38%. Sin embargo Duran et al. (2010), mediante una detallada verificación en campo, logró mejorar el cálculo revelando, para el período 1979-2000, una pérdida forestal de un 18%, la cual fue producto de la expansión de pastizales inducidos para ganado, los cuales incrementaron de 28 a 45%. Esta información fue generada a una escala 1:500,000, y fue derivada de la serie I del mapa de vegetación y uso del suelo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía tomada durante el año 1979 y una escena Landsat ETM + del año 2000. Esta diferencia significativa entre los dos estudios estimuló el presente trabajo.

1.4. Planteamiento del problema

Los ecosistemas continúan degradándose y/o perdiéndose a lo largo del país (Masera, 1996; Trejo y Dirzo, 2000), una de las principales causas es la deforestación provocada por el cambio de uso de suelo (Geist y Lambin, 2001; Mas y Flamenco, 2011), por lo que es necesario analizar y comprender la dinámica de la deforestación.

La vegetación de la cuenca del río Coyuquilla en el estado de Guerrero ha sido reducida en un 18% en los últimos años, como resultado de la ampliación de las áreas agrícolas y el establecimiento de pastizales para ganado, estos últimos aumentaron del 28% al 45% en el período de 1979 a 2000 (Durán et al., 2011). A pesar de que se tiene información referente a la dinámica de la deforestación para la cuenca del río Coyuquilla, no se ha descrito de manera detallada la dinámica de los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo y por lo tanto no se han comprendido los factores que se asocian a la pérdida de las distintas coberturas forestales presentes en la región. Comprender la dinámica de los procesos de deforestación permitirá establecer lineamientos para la toma de decisiones en beneficio del aprovechamiento, conservación y restauración de los recursos naturales.

El estudio se realizó a escala regional empleando la cuenca hidrográfica como unidad de estudio, debido a que presenta límites definidos (parteaguas) y salidas determinadas. Así mismo, la topografía existente en una cuenca asegura la presencia de sitios de empleo de los recursos, y de áreas en las que los accidentes geográficos eviten su uso. Las cuencas representan un buen modelo para entender los conductores que están promoviendo la deforestación (Sarukhán y Maass, 1990; Maass y Cotler, 2008). El estudio de una cuenca permite visualizar de forma integral los aspectos políticos, sociales, ambientales y económicos que participan en la dinámica de la deforestación (Cotler, 2010).

2. Objetivos

2.1. General

Comprender la dinámica de cambio de uso del suelo por procesos de deforestación en la cuenca del río Coyuquilla

2.2. Particulares

- Evaluar la fiabilidad de las distintas clasificaciones de coberturas/ usos del suelo con imágenes de alta resolución del portal Google Earth.
- Evaluar la dinámica de los procesos de deforestación de las diferentes coberturas presentes en la cuenca del río Coyuquilla para los períodos 1986-2000, 2000-2011 y 1986-2011.
- Identificar las relaciones entre algunos factores ambientales y socioeconómicos con la deforestación del bosque tropical seco, bosque de encino y bosque de pino-encino.
- Desarrollar un modelo espacial de simulación prospectiva de los futuros cambios de coberturas y usos del suelo.

3. Material y métodos

3.1. Área de Estudio

3.1.1. Ubicación Geográfica

La cuenca del río Coyoquilla se localiza en la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, al suroeste del estado de Guerrero, entre las coordenadas extremas 10° 53' 45.40" N, 101° 09' 11.88" O (superior izquierdo) y 17° 13' 27.59" N, 100° 50' 52.92" O (inferior derecho) (Figura 1). La región de estudio cubre una superficie de 591 km² y comprende los municipios de Petatlán (78.64%), Técpan de Galeana (21.40%) y una pequeña porción al norte de la cuenca el municipio Coyouca de Catalán (0.38%) (Figura 2).

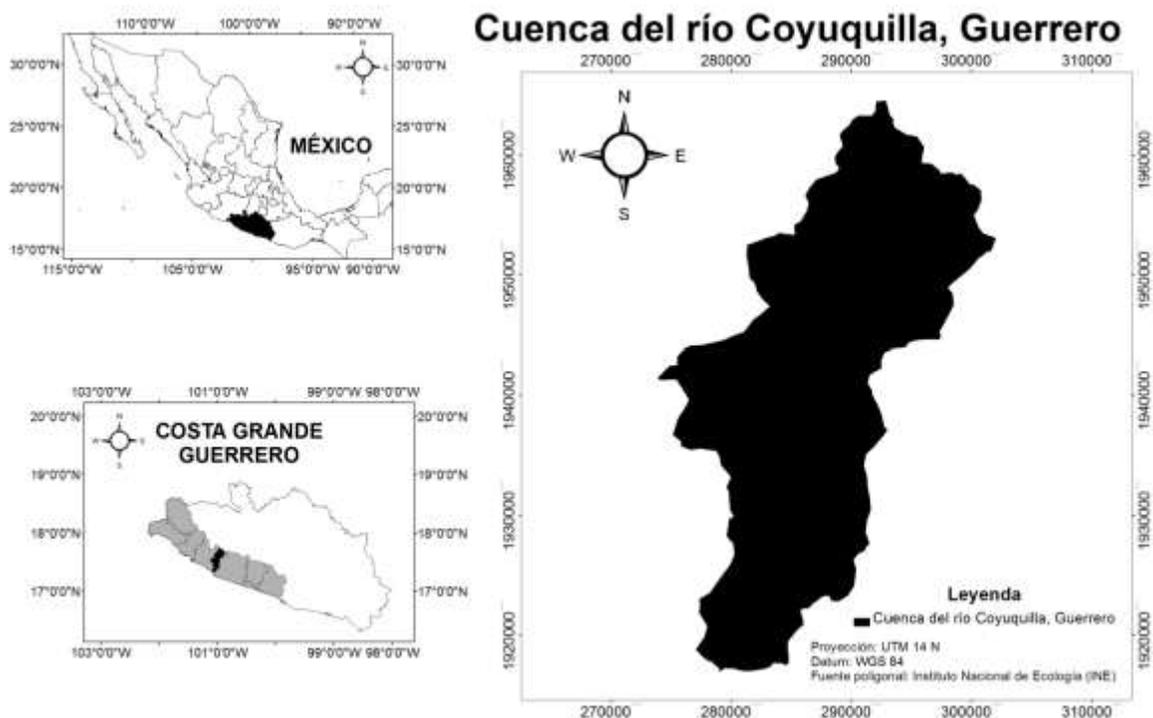


Figura 1. Localización de la cuenca del río Coyoquilla, Guerrero

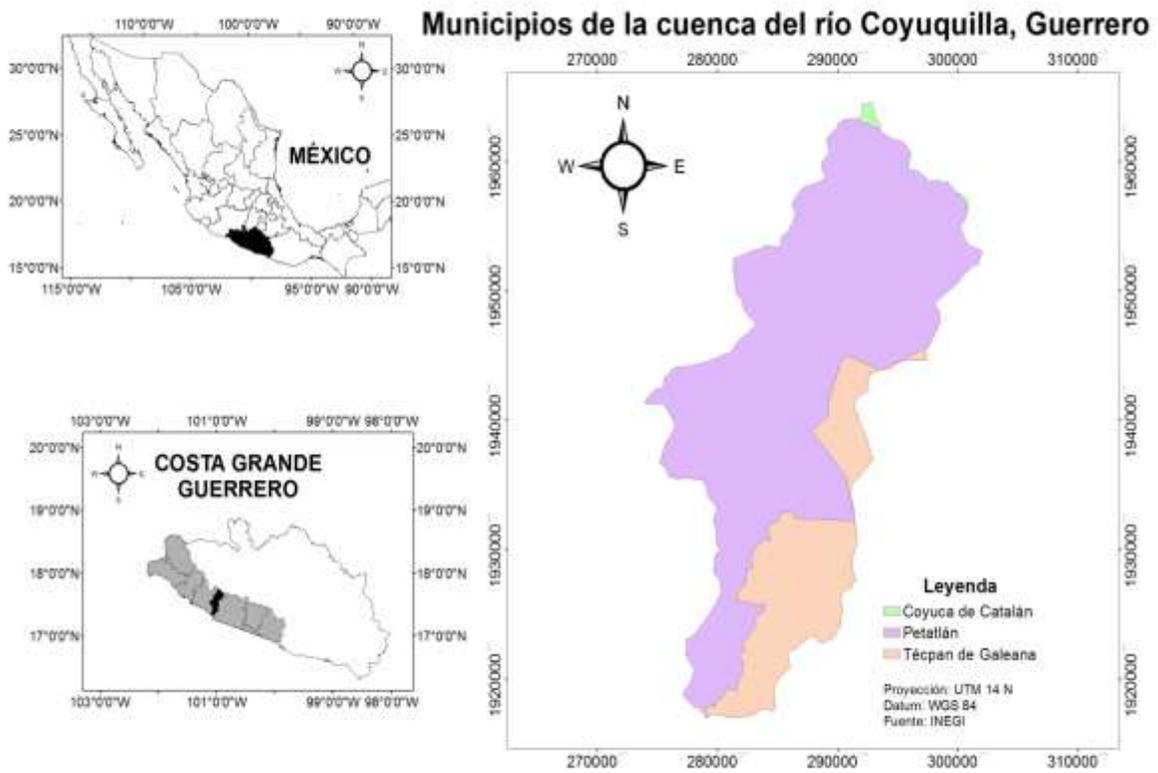


Figura 2. Municipios de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero.

3.1.2. Topografía

Altitud. La cuenca del río Coyoquilla presenta un gradiente altitudinal que va de los 0 a los 2519 msnm (Figura 3).

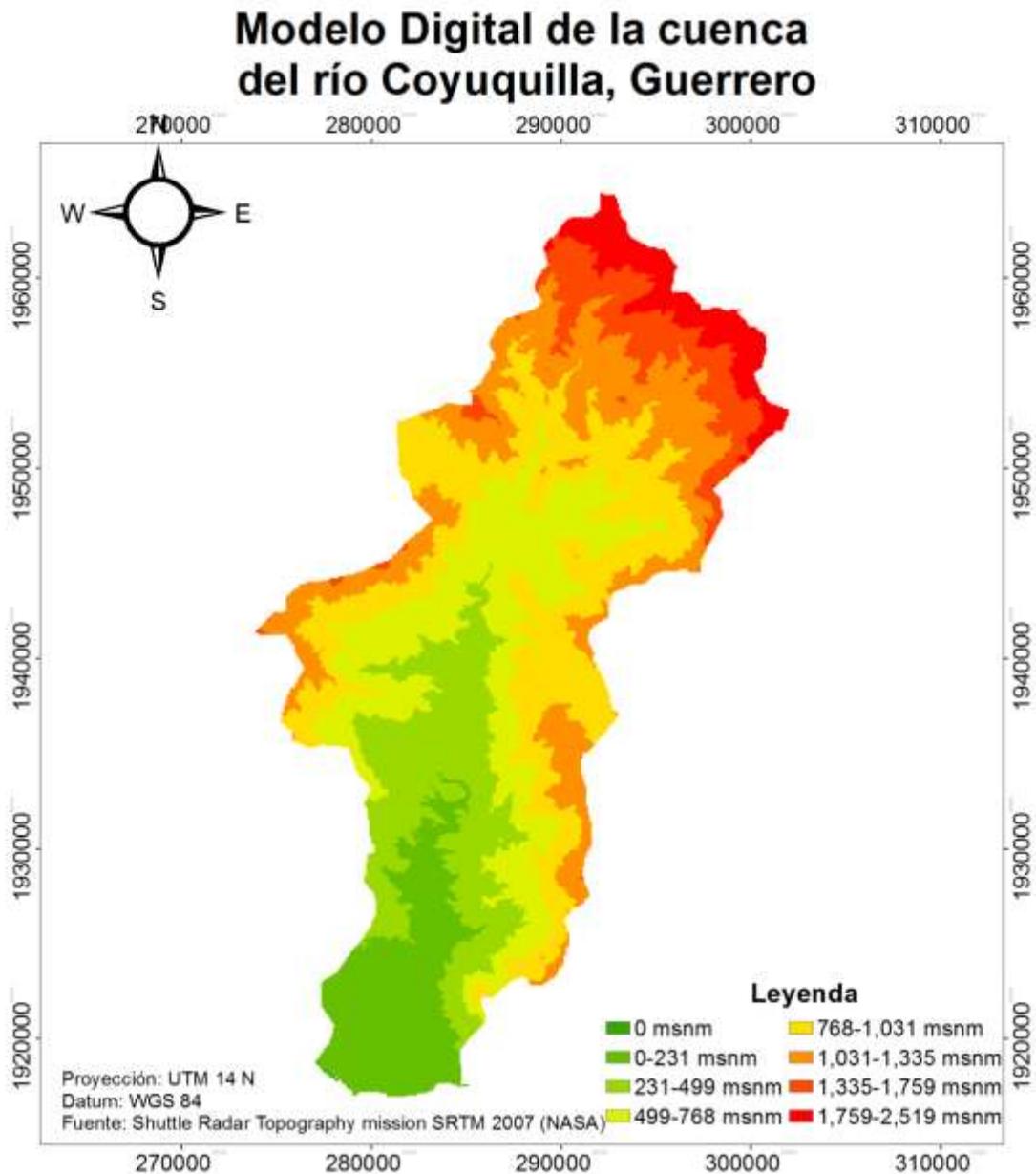


Figura 3. Modelo digital de elevación de la cuenca del río Coyoquilla, Guerrero.

3.1.3. Pendiente

Las pendientes van desde 0° hasta los 89.7° . Las partes altas de la cuenca cuentan con pendientes que superan los 60° , mientras que la cuenca media presenta pendientes que oscilan entre 0 y 60° ; por su parte, más del 50% de la cuenca baja presenta pendientes menores a 6° y pendientes máximas de hasta 35° (Figura 4).

Pendiente de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero

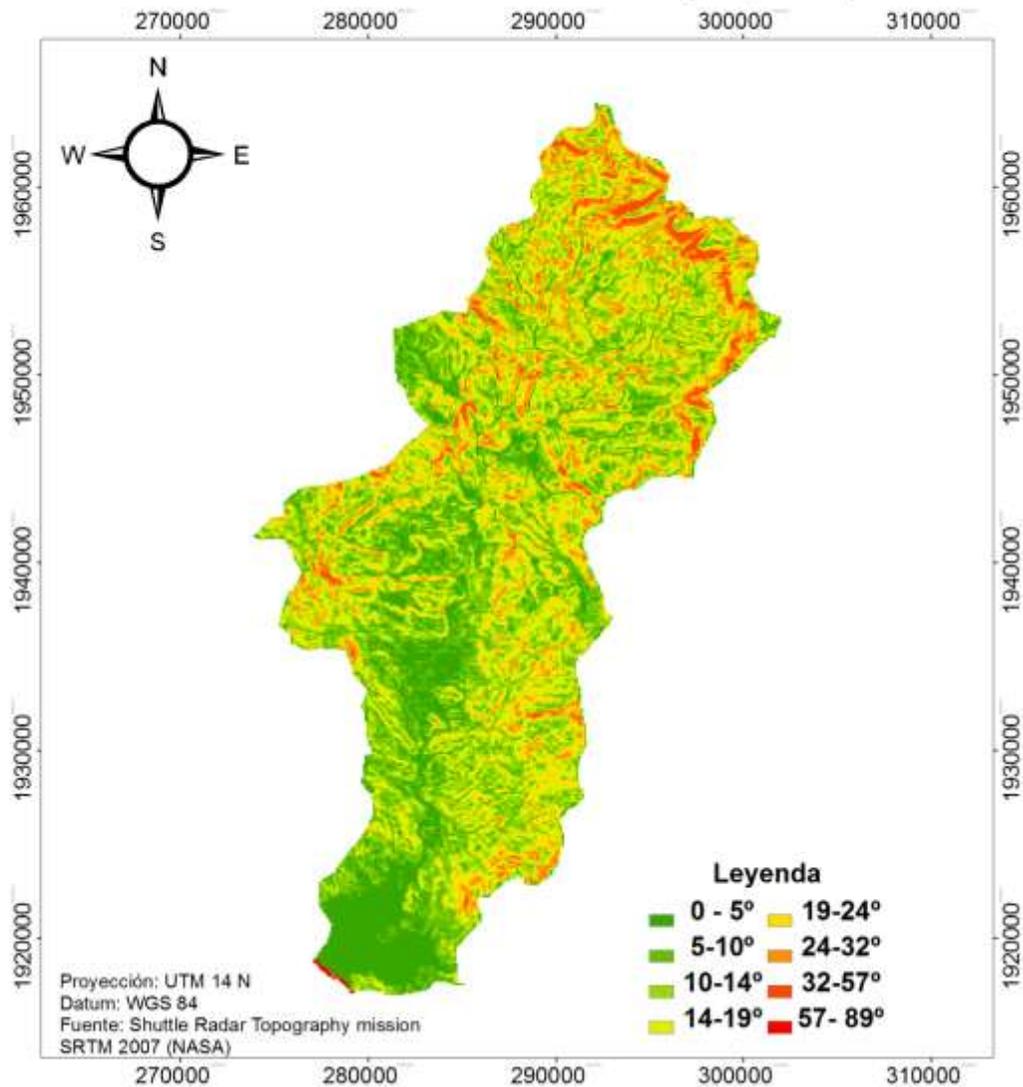


Figura 4. Pendientes de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero.

3.1.4. Clima

Los tipos de clima que se presentan en la cuenca del río Coyoquilla son (A) C (w_2), Aw_2 , y Aw_0 , de acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García (2004). En la parte baja de la cuenca predomina el clima Cálido Subhúmedo, mientras que en las partes medias a altas predominan los climas Semicálidos Subhúmedos y Templados Subhúmedos (Figura 5).

Clima de la cuenca del río Coyoquilla, Guerrero

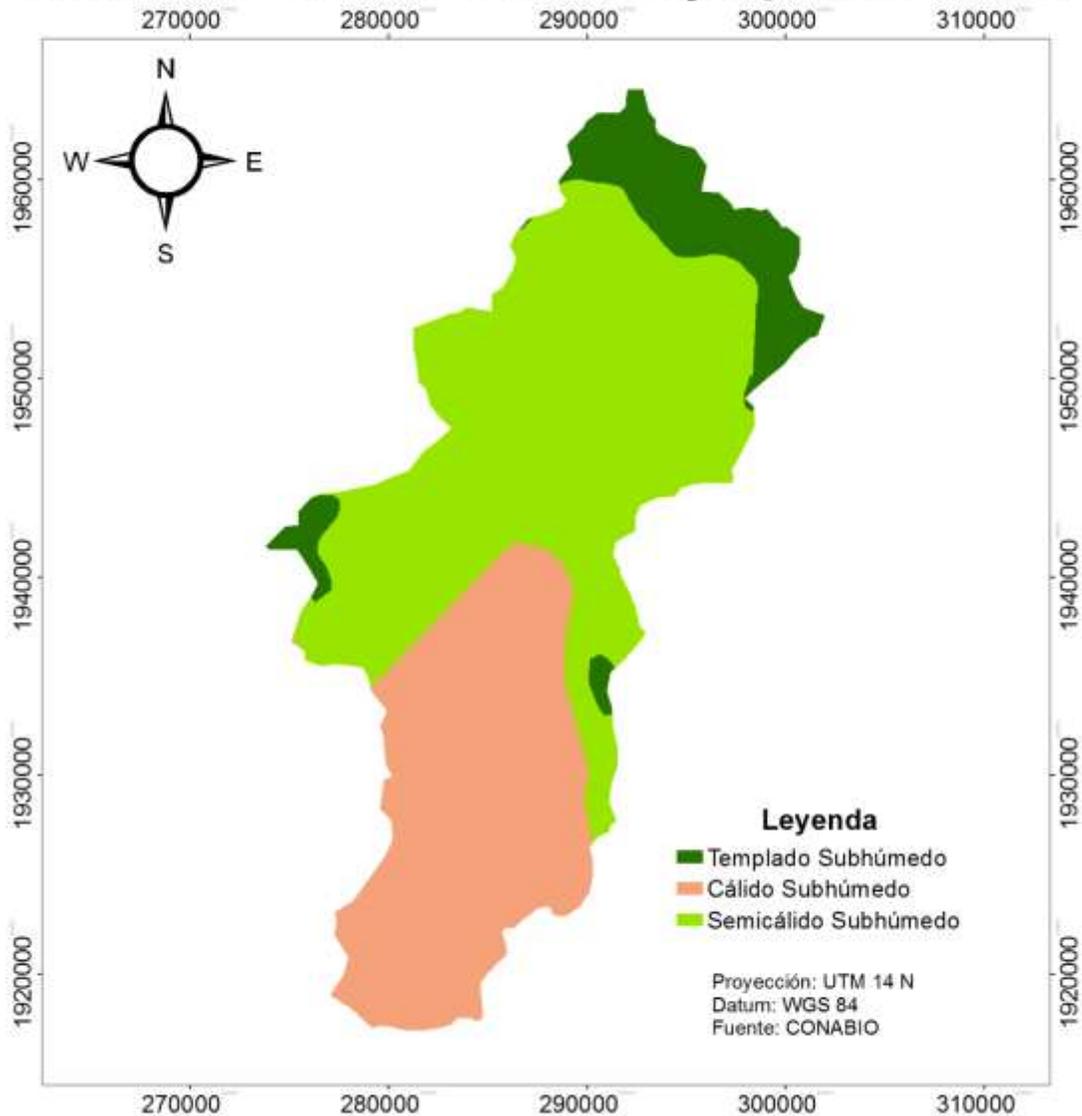


Figura 5. Mapa climático de la cuenca del río Coyoquilla, Guerrero

3.1.5. Edafología

Aproximadamente el 50% de la cuenca del río Coyuquilla presenta una asociación edáfica entre leptosol, phaeozem y regosol; esta asociación está distribuida principalmente en la porción sur de la cuenca, mientras que al norte se presentan regiones conformadas por acrisoles y leptosoles (Figura 6). Los suelos de tipo leptosol tienen un espesor reducido, y aparecen principalmente en zonas altas o medias con una topografía escarpada y elevada pendiente. Por su parte, los suelos de tipo phaeozem son de color oscuro en sus horizontes superficiales, presentan un alto contenido en materia orgánica, caracterizados por estar saturados de bases en su parte superior; el perfil es de tipo A/C o algunos pueden ser A/B/C; se asocian con regiones con un clima suficientemente húmedo; el clima puede ir de cálido a frío y van de la zona templada a las tierras altas tropicales (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Finalmente, los suelos de tipo regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, son someros (leptosoles), arenosos (arenosoles) o con materiales flúvicos (fluvisoles). Los regosoles están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007).

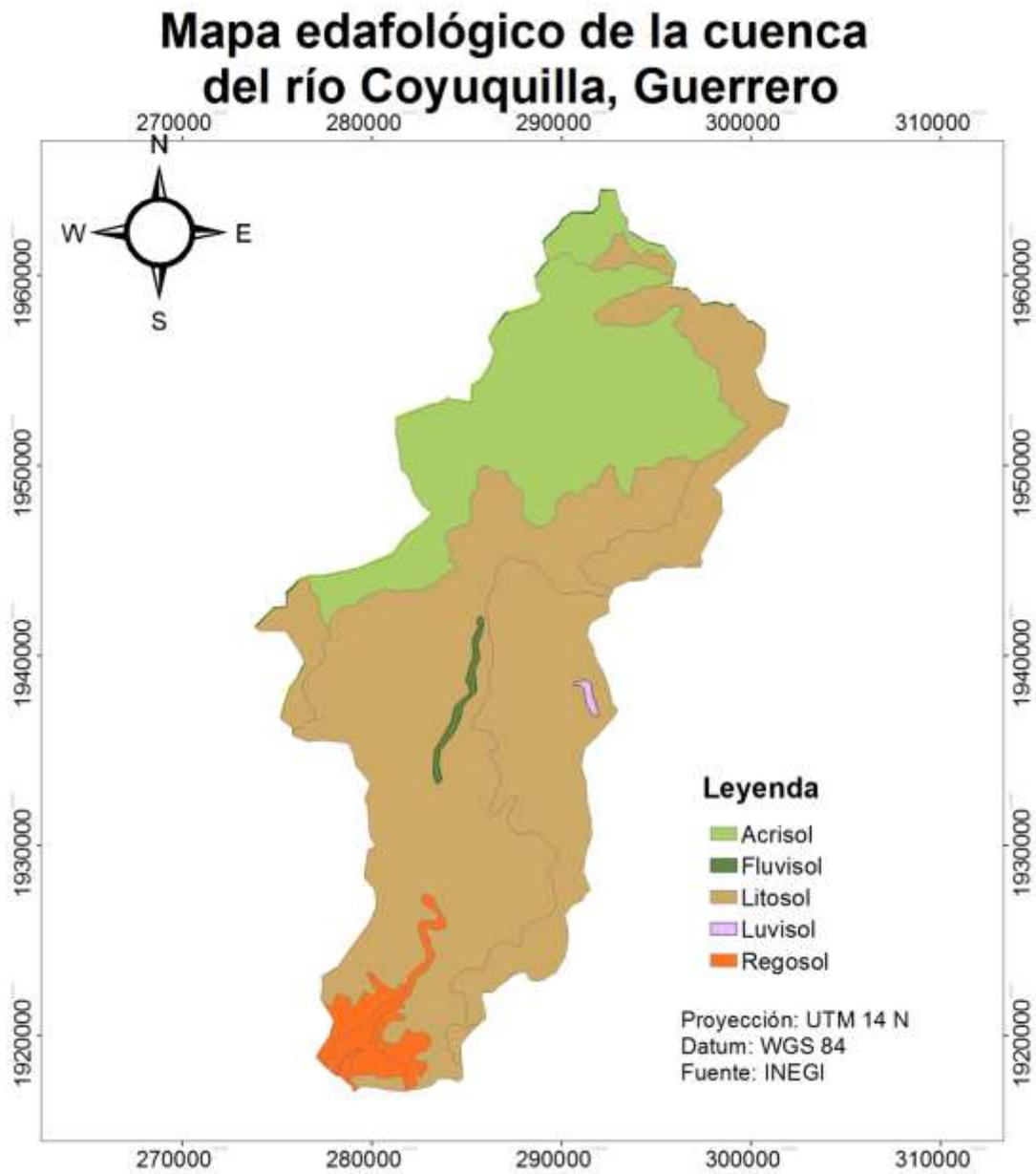


Figura 6. Mapa edafológico de la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero

3.1.6. Vegetación de la cuenca del río Coyuquilla

Para la determinación de los tipos de vegetación presentes en la cuenca se utilizó clasificación propuesta por Rzedowski (1978). El tipo de vegetación que se desarrolla en la región está representada por: Bosque Tropical Seco (BTS), Bosque de Encino (BE) y Bosque de Pino-Encino (BPE).

Para identificar la composición florística de esta cuenca se revisaron las colectas botánicas efectuadas en la cuenca o en zonas aledañas; estas colectas se encuentran disponibles en las bases de datos del Herbario Nacional de México (MEXU) y el Herbario del Jardín Botánico de Missouri (MOBOT), las cuales se encuentran en el portal http://www.conabio.gob.mx/remib_esp.html.

3.1.6.1. Bosque de Pino-Encino (BPE)

El bosque de pino-encino se distribuye en un rango altitudinal que va de los 1200 a 2519 msnm. Es la comunidad más representativa en el área de estudio, ocupa el 44.97%. Estas áreas se distribuyen principalmente en la parte alta de la cuenca. Entre las especies dominantes se encuentran: *Pinus teocote* Schltdl. y Cham., *P. ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. religiosa* Kunth., *Podocarpus guatemalensis* Standl., *Salvia iodantha* Fernald., *S. mocinoi* Benth., *S. incospicua* Bertol., *S. breviflora* Moc. y Sessé, *S. bupleuroides* J. Presl ex Benth., *S. riparia* Kunth., *Cosmos Sulphureus* Cav., *Ambrosia cumanaensis* Kunth. En las zonas de transición entre bosque de encino y bosque de pino-encino dominan las especies *Rumfordia floribunda* DC. y *Baccharis trinervis* Pers.

3.1.6.2. Bosque Tropical Seco (BTS)

El bosque tropical seco es la segunda cobertura con mayor extensión, representa el 23.85%, estas áreas se localizan en las partes bajas y medias de la cuenca. Se encuentran localizadas en un rango altitudinal que va de los 0 a 1300 msnm. Las especies que dominan en este tipo de bosques son: *Bursera excelsa* (Kunth) Engl., *B. grandifolia* (Schltdl.) Engl., *B. ariensis* (Kunth) McVaugh y Rzed., *B. fagaroides* (Kunth) Engl., *B. heteresthes* Bullock., *B. hintonii* Bullock., *B. kerberi* Engl., *B. copallifera* (DC.) Bullock., *B. sarukhanii* Guevara y Rzed., *B. trímera* Bullock., *B. velutina* Bullock., *Nissolia leiogyne* Sandwith., *Ipomoea triloba* L., *I. igualensis* Weath., *I. meyeri* (Spreng.) G. Don., *I. minutiflora* (M. Martens y Galeotti) ., *I. trífida* (Kunth) G. Don. y *Lysilomatergeminum* Benth. En las zonas de transición del bosque tropical seco y bosque de encino dominan las especies *Ficus goldmani* Standl. y *F. glaucescens* (Liebm.) Miq.

3.1.6.3. Bosque de Encino (BE)

La cobertura bosque de encino representa el 20.33%, estas áreas se distribuyen a lo largo de toda la cuenca y cubren un rango altitudinal que va de los 900 a los 1300 msnm. Las especies que dominan en este tipo de bosques son *Quercus castanea* Née., *Q. rugosa* Née., *Q. planipocula* Trel., *Q. conspersa* Benth., *Q. elliptica* Née., *Arbutus xalapensis* Kunth., *Baccharis* L., *Bidens pilosa* L., *Eupatorium ligustrinum* DC. y *Hymenostephium microcephalum* S.F. Blake.

3.1.7. Aspectos Socioeconómicos

3.1.7.1. Población

De acuerdo al Consejo Nacional de Población (CONAPO), la población total de las 32 localidades en donde se extiende la cuenca del río Coyuquilla, en el año 2000, era de 7,586 habitantes. Para el año 2010, de acuerdo al Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la población fue de 5,688 (Figura 7). Estos datos muestran una reducción de la población de un 25% en el período 2000-2010. Esta disminución de la población se puede atribuir tanto a la migración como a la violencia en la región, las cuales ocurrieron principalmente en las partes centrales y altas de la cuenca (Durán et al., 2011).

Las poblaciones más importantes por el número de habitantes son las localidades Santa Rosa de Lima y Coyuquilla Sur, ubicadas en el sureste de la cuenca, con 780 y 548 habitantes respectivamente.

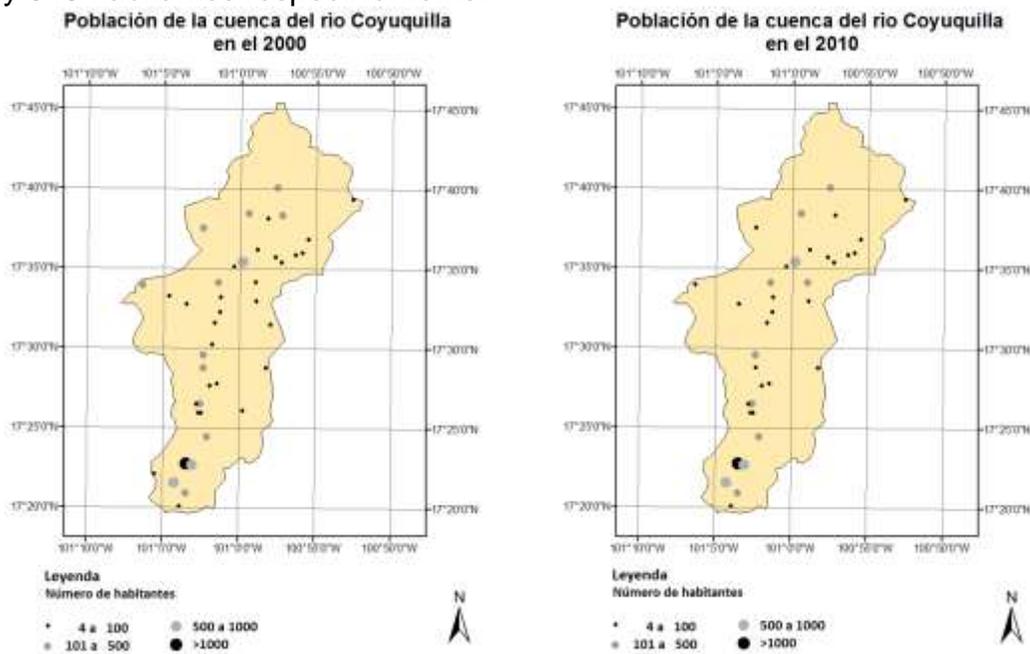


Figura 7. Distribución de la población de la cuenca del río Coyuquilla para los años 2000 y 2010 de acuerdo al Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2000) y al Censo de Población y Vivienda (2010)

3.1.7.2. Migración

En la cuenca del río Coyuquilla, para el año 2000, la población masculina representó el 49% de la población total, habiendo un total de 3,259 habitantes (INEGI, 2000). Para el año 2010, representó el 50%, con un total de 2,831 habitantes (INEGI, 2010). Esto significó una disminución del 9% de la población masculina en un período de 10 años.

La población de 15 a 49 años, en el año 2000, representó el 22% de la población, con un total de 1,345 habitantes. Para el año 2010, representó el 21% de la población total, con un total de 1,245 habitantes. Esto significó una disminución del 16% de la población de 15 a 49 años en un período de 10 años.

3.1.7.3. Educación

En la cuenca, en el año 2000, la población que asistió a la escuela, representó el 1.5% de la población total, con un total de 100 habitantes (INEGI, 2000). Para el año 2010 representó el 3.2% con un total de 181 habitantes que asistieron a la escuela. Esto representó un aumento del 80% de población que asistió a la escuela en un período de diez años.

En relación a la población analfabeta, en el año 2000, la población analfabeta representaba el 11.9% de la población total con un total de 786 habitantes analfabetas (INEGI, 2010). Para el año 2010 representó el 8.5% con un total de 475 habitantes analfabetas; esto significó una disminución del 39% de población analfabeta en un período de 10 años.

3.1.7.4. Salud

En relación al acceso a servicios de salud, para el año 2000, la población que tuvo acceso a servicios de salud representó el 3.3% de la población con un total de 258 habitantes (CONAPO, 2000). Para el año 2010 representó el 11.3% con un total de 632 habitantes que tuvieron acceso a servicios de salud (INEGI, 2010); esto significó un aumento de más del doble en la población que tuvo servicios a la salud.

3.1.7.5. Bienes y Servicios

En relación a los servicios de agua entubada, drenaje y energía eléctrica, en el año 2000, la población que tuvo acceso a estos servicios, representó el 11.7% de la población total, con un total de 771 habitantes. Para el año 2010, representó el 17%, con un total de 995 (CONAPO, 2000; INEGI, 2000), lo que representa un aumento del 27% de habitantes que tuvieron acceso a estos servicios.

3.1.7.6. Economía

En la cuenca, en el año 2000, la población económicamente activa se registró un total de 1,658 habitantes, representando el 25% de la población total. Para el año 2010 la población económicamente activa fue de 1,745 habitantes, representando el 33%; esto significa que hubo un aumento del 13% de población económicamente activa en un período de 10 años. De esta población, el 18% se dedica al sector primario, principalmente al sector agropecuario. En el mismo orden, el 7% se dedica al sector secundario, en especial, en el área de estudio, se realiza producción de leche y carne a través de la explotación de bovinos y porcinos. Por último, el 2% de la población se dedica al sector terciario, destinadas a actividades relacionadas a la prestación de servicios (INEGI, 2010).

La ganadería es la actividad más importante que se desarrolla en la región. Entre las actividades que se desarrollan están la explotación de bovinos para la producción de leche y carne y explotación de porcinos en traspatio (INEGI, 2007).

La actividad agrícola se concentra principalmente en las planicies aluviales de los ríos importantes que tienen acceso a sistemas de riego. Los principales cultivos que se desarrollan en la región son el maíz, frijol, garbanzo y chile (INEGI, 2007).

3.2. Materiales

3.2.1. Datos de percepción remota

- Imagen de satélite Landsat MSS (14/05/1986). Resolución espectral: cuatro bandas, resolución espacial: 80m.
- Imagen de satélite Landsat ETM+ (11/04/2000). Resolución espectral: ocho bandas, resolución espacial: 30m.
- Imagen de satélite SPOT (9/02/2010). Resolución espectral: 5 bandas, resolución espacial: 10m.

Las imágenes MSS y ETM+ empleadas fueron obtenidas a través del portal: Global Land Cover Facility (GLCF) de forma gratuita (GLCF:<http://www.glcg.umd.edu>). La imagen SPOT fue proporcionada por el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) a través del programa ERMEXS.

3.2.2. Cartografía vectorial

- Uso de suelo y vegetación, Serie I (1976), Serie II (1993) y Serie IV (2007) de INEGI e Inventario Nacional Forestal (2000). Escala 1: 250 000
- Censos de Población de INEGI 2000 y 2011. Escala 1: 250 000
- Localidades CONAPO 2000. Escala 1: 250 000
- Modelo Digital del Terreno. Escala 1: 250 000
- Carreteras. Escala 1: 250 000
- Mapa edafológico. Escala 1: 250 000
- Mapa de rasgos hidrológicos. Escala 1: 250 000

3.2.3. Software

- Sistema de Interpretación Vectorial Geográfico (GEOVIS)
(<http://www.geovis.net/>).
- Plataforma de modelación ambiental DINAMICA EGO
(<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>).
- Software para la estadística computacional R-project
(<http://www.r-project.org/>)
- Sistema de información geográfica ArcGIS
(<http://www.esri.com/software/arcgis>)
- Programa de procesamiento de imágenes satelitales ERDAS
(<http://geospatial.intergraph.com/Homepage.aspx>)

3.3. Métodos

3.3.1. Sistema clasificatorio para el análisis y cuantificación de los cambios

Se definieron seis categorías de coberturas y usos de suelo en la cuenca del río Coyuquilla: (1) asentamientos humanos; (2) pastizal inducido; (3) agricultura de temporal; (4) bosque tropical seco; (5) bosque de encino; (6) bosque de pino (incluye: bosque de pino y bosque de pino-encino). Estas categorías se asignaron con base al sistema clasificatorio del Inventario Forestal Nacional (IFN), realizado con base en el reagrupamiento de las categorías de los mapas de cobertura/uso de suelo de INEGI (Mas et al., 2004). Las categorías consideradas se describen a continuación:

3.3.3.1. Bosque Tropical Seco

Conjunto de bosques propios de regiones de clima cálido y dominados por especies arborescentes. La característica más sobresaliente de esta formación vegetal la constituye la pérdida de sus hojas durante la época de secas en un período de 5 a 8 meses. Se desarrolla a una altitud entre los 0 a 1900 msnm, en él se registra una temperatura de 0-20°C con una media anual de 29°C y una precipitación pluvial de 600-1200mm, considerado como un clima Aw, Bs y Cw de la clasificación de Koeppen; los suelos son someros, pedregosos con rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, siendo de pobres a ricos en materia orgánica, de colores claros, oscuros, rojizos, amarillos, grisáceos, cafés o negros, con un pH de ácido a ligeramente alcalino (Rzedowski, 2006).

Desde el punto de vista de la explotación forestal este tipo de vegetación es de escasa importancia, pues el tamaño y la forma de sus árboles no presentan características deseables para el comercio, sin embargo, muchos de sus componentes se les usa para la fabricación de artesanías, muebles, postes, combustibles y otros propósitos (Rzedowski, 2006).

3.3.3.2. Bosque de Encino

Los bosques de *Quercus* o encinares son comunidades vegetales cuya altura varía entre 2 y 50m, generalmente son de tipo cerrado, pero también abiertos. Varían de totalmente caducifolios a totalmente perennifolios. Generalmente se distinguen tres estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo, los cuales pueden variar de uno a tres estratos. Se encuentran desde el nivel del mar hasta los 3100 msnm aunque la mayoría de su extensión se halla en altitudes entre los 1200 a 2800 msnm; se desarrollan en climas templados, semihúmedos y cálidos; las temperaturas medias anuales tienen una amplitud global de 10 a 26°C; la precipitación media anual varía de 600 y 1200mm; se desarrollan en suelos someros de terrenos muy rocosos e inclinados o pedregosos con rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Típicamente el suelo es de reacción ácida moderada, con abundante hojarasca y materia orgánica en el horizonte superficial

y a menudo también a mayor profundidad; la textura varía de arcilla a arena con coloraciones roja, amarilla, negra, café o gris (Rzedowski, 2006).

Con respecto a su aprovechamiento, los encinares son, en general, muy explotados a nivel local y muy poco a nivel industrial. Este hecho se debe principalmente a que la mayor parte de los bosques de *Quercus* de este país está formada por árboles bajos y con troncos delgados. Localmente la madera de encino se emplea para construcciones, muebles, postes y, principalmente, como combustible (Rzedowski, 2006).

3.3.3.3. Bosque de Pino-Encino

Comunidades vegetales cuyas especies dominantes son del género *Pinus* y *Quercus*, con mayor dominancia por parte del género *Pinus*. El estrato más importante es el arbóreo, con alturas promedio entre los 15 y los 25 m. La presencia (o ausencia) de un estrato arbustivo bien definido está relacionada con el manejo que se le esté dando al bosque en cada sitio; en áreas donde se extrae madera o en sitios perturbados (abiertos al cultivo y posteriormente abandonados), el estrato arbustivo se encuentra poco representado o no existe y las copas del estrato arbóreo cubren menos del 60% de la superficie. Se desarrollan en altitudes entre los 1500 a 3000 msnm, donde los climas pueden ser templados y subhúmedos, con temperaturas medias anuales entre 10 y 20°C y son propicias a descender; las precipitaciones varían entre 600 y 1000mm. Se establecen a menudo sobre suelos someros, rocosos y muchas veces pobres en nutrientes (Rzedowski, 2006).

En relación a su aprovechamiento, este tipo de bosques, constituyen un recurso de primera importancia por la demanda de su madera, por la facilidad de su explotación, por la relativa rapidez del crecimiento de muchas de sus especies y sobre todo por la extensa área de distribución (Rzedowski, 2006).

3.3.3.4. Agricultura de Temporal

Se clasifica como tal al tipo de agricultura en donde el ciclo vegetativo de los cultivos que se siembran depende de la época de lluvia, por lo que su éxito depende de la precipitación y de la capacidad del suelo para retener el agua, su clasificación es independiente del tiempo que dura el cultivo en el suelo, que puede llegar a más de diez años, en el caso de los frutales, o bien son por períodos de un año como los cultivos de verano. Incluye los que reciben agua invernal como el garbanzo (INEGI, 2010).

3.3.3.5. Pastizal Inducido

Esta comunidad resulta de la perturbación que produce el ser humano al abrir zonas de vegetación original (bosque, selva, matorral, otros), puede aparecer como consecuencia de desmontes de cualquier tipo de vegetación y principalmente para la realización de actividades ganaderas (INEGI, 2010).

3.3.3.6. Asentamientos humanos

Espacio físico en el que se establece un grupo de personas para formar una comunidad. Comprende ciudades y pueblos (INEGI, 2010).

3.3.2. Corrección geométrica de las imágenes satelitales

Las imágenes utilizadas provienen del portal *Global Land Cover Facility* (<http://glcf.umd.edu/>) y ya están corregidas geométricamente. Para verificar la calidad de la corrección, las escenas fueron analizadas con el programa ERDAS 9.1. Este proceso requiere el uso de los metadatos que acompañan a la imagen, una imagen Landsat ETM+ orto-rectificada con resolución espacial de 30 m fue usada como base para obtener coordenadas reales. La verificación se evaluó a través del error medio cuadrático (RMSE). El RMSE es un indicador que cuantifica el sesgo (indicado por el error medio), así como la dispersión (indicado por la desviación típica de los errores) del error de posición en la imagen, y está dado por las siguientes ecuaciones:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{xi}^2}{N}} \quad (1)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_{yi}^2}{N}} \quad (2)$$

Donde e_{xi} y e_{yi} , son las diferencias entre las coordenadas x e y reales y las tomadas en la imagen, y N representa el número de puntos de comprobación.

Para verificar las escenas se utilizaron 15 puntos de control distribuidos en la escena.

3.3.3. Clasificación de las imágenes satelitales

Se empleó un método de clasificación combinando un enfoque digital y visual en el procesamiento de imágenes satelitales. Para ello, se siguió el método de clasificación interdependiente (FAO, 1996) para generar mapas de coberturas/usos de suelo en las distintas fechas. Este método consiste en actualizar la interpretación de una fecha anterior con la imagen de la fecha

siguiente, lo cual permite obtener una serie temporal de mapas más congruente a la obtenida con base en interpretaciones independientes (FAO, 1996).

La interpretación de las imágenes satelitales se realizó mediante el Sistema de Interpretación Geográfica Vectorial (GeoVis 2.3.10), el cual fue desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 1996). Este sistema posee grandes ventajas debido a que combina la interpretación visual en pantalla (capacidad de relacionar patrones, tonos, formas, textura, tamaños de los objetos), clasificación digital (consiste en asignar todos los píxeles de una imagen particular en clases temáticas con base en su información espectral) y las operaciones en SIG (construcción de topología, estadísticas y búsqueda de información), lo que permite distinguir los distintos usos y coberturas del suelo en este estudio.

3.3.4. Evaluación de la fiabilidad de las clasificaciones

La estimación de la fiabilidad de las imágenes clasificadas se realiza a partir de la comparación de dos fuentes de información: (1) mapa derivado de la clasificación de las coberturas/ usos de suelo e (2) información de referencia de alta confiabilidad. Generalmente se basa en la generación de puntos de muestreo, denominados sitios de referencia (Jensen, 1996), cuya clasificación se obtiene a partir de observaciones en campo o usando imágenes de alta resolución (Stehman y Czaplewski, 1998).

Para evaluar la fiabilidad de las clasificaciones de coberturas y usos de los suelos generados en los años 1986, 2000 y 2010, se seleccionaron, de manera aleatoria, a través de un muestreo estratificado, un conjunto de 240 puntos y se empleó el programa ArcGis 9.3. La estratificación se realiza dividiendo la población en estratos, con base en una variable auxiliar (altitud, región ecológica, división administrativa, facilidad de acceso, clase del mapa, entre otros), lo que permite tener un control sobre la distribución de los sitios de muestreo y obtener información sobre subconjuntos de la población (Mas et al., 2003). Para este trabajo, se utilizó como estrato las clases identificadas en el mapa para tener una cantidad homogénea de puntos para cada clase (Figura 8).

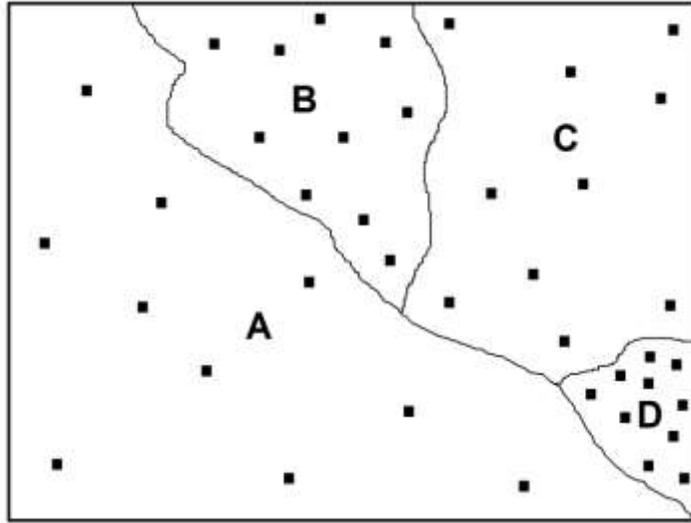


Figura 8. Sitios aleatorios estratificados (Tomado de Mas, 2003)

La verificación de los sitios fue hecha por fotointerpretación, utilizando como referencia imágenes de alta resolución tomadas en el sitio web Google Earth Versión 6.2.2. Se buscaron las imágenes con fechas más cercanas a las clasificaciones de coberturas y usos del suelo. Para la clasificación del año 1986, se tomaron los datos de una imagen de 1990. Para la clasificación del año 2000, se obtuvieron los datos de una imagen del 2001 y por último, la clasificación del año 2011, se tomaron datos de una imagen del 2009. La información de referencia más reciente se complementó con 20 puntos de muestreo de campo que realizó la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). A partir de estos puntos de muestreo, se efectuó la comparación entre la información de la imagen clasificada y la información de referencia, generando así una matriz de confusión.

La matriz estuvo constituida por filas y columnas en donde se ubican los valores que expresan el número de sitios de referencia asignados a una categoría particular, en relación con la verdadera categoría obtenida de las imágenes de alta resolución de Google Earth. El grado de confiabilidad se expresó en tres índices: el de la confiabilidad global (proporción del mapa correctamente clasificado); el de la confiabilidad del usuario (que mide la proporción de sitios de cierta categoría en

el mapa que están correctamente clasificados en la base de los datos de referencia); y el de la confiabilidad del productor (proporción de sitios de ciertas categorías en las imágenes que están correctamente clasificadas en el mapa; Mas et al., 2009). A la matriz generada se le aplicó el método propuesto por Card (1982) incorporando los valores de proporción (áreas relativas), de cada una de las categorías consideradas, para compensar el sesgo debido al muestro estratificado. Lo anterior de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_{ij} = \pi_i n_{ij} / n_{i+} \quad (3)$$

Dónde:

P_{ij} . Es la proporción de cada celda de la matriz de confusión incorporando la corrección de Card ubicados en la fila i y en la columna j

π_i . Es la proporción de la categoría i en el mapa

n_{ij} . Es el número de sitios verificados de la categoría real j pero que aparecen en el mapa con la categoría i . Finalmente n_{i+} es la suma marginal calculada con la siguiente ecuación:

$$n_{i+} = \sum_{j=1}^q n_{ij} \quad (4)$$

3.3.5. Cálculo de las tasas de cambio

Una vez generados los mapas de coberturas/ usos del suelo de las distintas fechas se llevó a cabo la sobreposición cartográfica. Con esta información se determinaron las áreas correspondientes a los diferentes tipos de coberturas/ usos del suelo. De esta manera, se pudieron obtener las tasas anuales de cambio para tres períodos de análisis: 1986-2000, 2000-2011 y 1986-2011.

Para obtener las tasas anuales de cambio, se utilizó la ecuación propuesta por Puyravaud (2003):

$$\delta = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \quad (5)$$

Dónde:

δ = tasa anual de cambio

S_1 = Superficie en la fecha 1

S_2 = Superficie de la fecha 2

n = número de años entre las dos fechas

3.3.6. Matrices de transición

Mediante la utilización de los mapas de cobertura y uso del suelo se calcularon las matrices de transición. Estas matrices permitieron evidenciar las áreas que cambian o persisten en un determinado período (Pontius et al., 2004). Esta matriz fue transformada a una matriz de probabilidad de ocurrencia para todo el período, misma que fue anualizada a través de la siguiente ecuación:

$$P^t = HV^t H^{-1} \quad (6)$$

Donde P es la matriz de transición original, H es la matriz de vectores propios, V una matriz construida con base en los valores propios, y t es el número de años del período correspondiente a la matriz original (Takada et al., 2010).

3.3.7. Identificación de las variables ambientales y socioeconómicas que se asocian con la deforestación

El presente estudio supone que las coberturas/ usos del suelo son reflejo del conjunto de las presiones económicas y sociales bajo condiciones biofísicas bien establecidas a lo largo del tiempo, por lo que se hace indispensable la incorporación de “variables explicativas” para el correcto entendimiento de la

dinámica y configuración del paisaje. Para llevar a cabo este análisis fue necesario realizar una revisión bibliográfica para recopilar y agrupar las variables ambientales y socioeconómicas que pudieran actuar como factores conductores de la pérdida de cubierta forestal. Las variables que se consideraron en este estudio se presentan en los cuadros 3 y 4.

Cuadro 3. Variables explicativas ambientales que fueron utilizadas para analizar los procesos de deforestación.

Variables ambientales	Fuente	Escala o resolución
Pendiente y altitud	Shuttle Radar Topography mission SRTM 2007 (NASA)	90 metros
Suelos	Mapa edafológico, INEGI	1:250000
Distancia a cuerpos hidrológicos	Mapa de rasgos hidrológicos, Instituto Nacional de Ecología (INE)	1:250000
Distancia a localidades	Mapa de localidades	INEGI, 2000; 2010
Distancia a carreteras	Interpretación visual	

En este estudio las fuentes de información más importantes para analizar los conductores de la deforestación fueron: los mapas de coberturas y usos del suelo de los años 1986, 2000 y 2011; el mapa edafológico, el mapa de rasgos hidrológicos, los censos de INEGI y las localidades de CONAPO. Esta información vectorial fue rasterizada con un tamaño de celda de 90m. Posteriormente se identificaron y agruparon las variables que pudieran tener una influencia sobre los procesos de deforestación (Cuadros 3 y 4).

Cuadro 4. Variables explicativas socioeconómicas consideradas para analizar los procesos de deforestación.

Indicador	Variables socioeconómicas	Fuente
Demografía	Población total	INEGI, 2000; 2010
	Población masculina	INEGI, 2000; 2010
Migración	Proporción población de 15 a 49 años	INEGI, 2000; 2010
	Proporción población de 5 años y más que hablan lengua indígena	CONAPO (2000)
Marginación	Proporción de población analfabeta	CONAPO (2000)
	Proporción de población sin agua entubada	CONAPO (2000)
	Proporción de viviendas habitadas con piso de tierra	CONAPO (2000)
	Proporción de población con acceso a servicios de salud	INEGI, 2000; 2010
Economía	Proporción de población económicamente activa Empleada entre 18 a 45 años	INEGI, 2000; 2010

El análisis estadístico espacial se basó en la generación de mapas binarios con las áreas deforestadas y no deforestadas. La colecta de datos para el análisis estadístico se basó en la generación de 19,000 puntos aleatorios para toda la zona de estudio. De esta manera, se pudo derivar información binaria (cambio / no cambio) para cada transición y para los dos períodos analizados.

En el caso de las variables socioeconómicas (datos puntuales de CONAPO y Censo de INEGI), para cada variable se interpolaron los valores de las localidades con el método IDW (Inverse Distance Weighting), el cual determina el valor de cada celda, utilizando un promedio de un conjunto de datos ponderado por el inverso de la distancia (Farfán et al., 2012). Este método se ha sugerido como el más eficiente para la representación heterogénea de datos espaciales socioeconómicos y el análisis de la deforestación para la cuenca del río Coyuquilla (Farfan et al., 2012)

Se empleó el análisis de Correlación de Spearman para descartar aquellas variables con un valor de correlación igual o mayor a 0.7.

Para evaluar estadísticamente la relación entre las “variables ambientales y socioeconómicas” y la deforestación, se emplearon Modelos Lineales Generalizados (MLG). El sustento estadístico de los MLG reside en que permiten identificar la contribución de una o más variables para explicar el fenómeno estudiado cuando la varianza no es constante. Los modelos resultantes fueron evaluados utilizando el Criterio de Información Akaike (AIC del inglés Akaike Information Criterion). Este criterio incorpora el equilibrio entre el sesgo y la varianza en los factores que son añadidos en el modelo y provee una comparación directa entre ellos (Burnhman y Anderson, 2002).

3.3.8. Modelación de los procesos de deforestación

El proceso de modelación se basó en el estudio de los cambios pasados que permiten evaluar las tasas de cambio entre los diferentes tipos de coberturas/ usos del suelo (CUS) y la relación espacial entre la localización de estos cambios y las variables “explicativas” (conductores) que influyen en la distribución espacial de los cambios. Este proceso requirió de tres etapas: (1) Calibración; (2) Elaboración de un mapa de probabilidad de deforestación; y (3) Validación del modelo de CCUS.

3.3.8.1. Calibración

Esta fase consistió en analizar los CCUS en un período anterior para evaluar los patrones de cambio y brindar información al modelo para determinar la cantidad de cambio y la localización más probable de los mismos. Para esto, se superpusieron los mapas de 1986 y 2000 para generar un mapa de CCUS y una matriz de cambio que indica la superficie de cada tipo de transición durante el período estudiado (14 años en este caso).

Para determinar la relación entre las “variables explicativas” y la deforestación en los períodos analizados se usó el método de los pesos de evidencia (Soares-Filho et al., 2004). Los pesos de evidencia se derivan de las probabilidades condicionales y representan la influencia de cada una de las variables en la probabilidad de ocurrencia de una transición $i \Rightarrow j$. El cálculo de este proceso permite asociar un peso de evidencia a cada categoría de las variables explicativas. Un peso de evidencia mayor a 0 significa que la categoría favorece dicho cambio, al contrario, los valores negativos indican que dicha categoría inhibe tal cambio. Los pesos de evidencia se calculan como se muestra a continuación:

$$W^+ = \ln O(D|E) - \ln O = \ln \left[\frac{O(D|E)}{O(D)} \right]$$

$$W^- = \ln O(D|\bar{E}) - \ln O = \ln \left[\frac{O(D|\bar{E})}{O(D)} \right]$$

(7)

Donde W^+ es el peso de evidencia de ocurrencia del evento D (p. ej. deforestación) dada cierta condición B (p.ej. cierta distancia a carreteras). La probabilidad posterior del evento D dado un conjunto de variables espaciales (B, C, D, \dots, N) se expresa en la siguiente ecuación:

$$P\{D|A \cap B \cap C \dots \cap N\} = \frac{e^{\sum W_N^+}}{1 + e^{\sum W_N^+}} \quad (8)$$

Donde A, B, C, \dots, N son los valores de las k variables explicativas, evaluadas en la ubicación espacial (x, y) , y representadas por sus pesos W_N^+ .

3.3.8.1. Elaboración de un mapa de probabilidad de deforestación

Para la elaboración del modelo probabilístico se utilizaron las coberturas generadas en los años 1986 y 2000, puesto que la cobertura del 2011 se usó para validar el modelo. Para su obtención, se utilizaron las variables explicativas resultantes del análisis de los pesos de evidencia, esto permitió la obtención de mapas de probabilidad para cada transición; finalmente, se pudieron identificar las áreas más propensas al cambio.

3.3.8.2. Fase de evaluación

Una vez elaborado el mapa de probabilidad de deforestación, fue necesario medir la precisión del modelo con base en la comparación de las áreas que cambiaron o no. Una de las formas de validar el modelo es a partir del estadístico del área bajo la curva ROC, ahora más comúnmente llamado “Característica de Operación Relativa”. Este estadístico considera que un buen modelo probabilístico de transición tendría que juzgar los píxeles que realmente cambiaron por su alto potencial, mientras que aquellos píxeles que no cambiaron tendrían que tener un bajo potencial. En este contexto de pronóstico binario (cambio/no cambio), una correcta predicción de cambio es conocida como “acierto” y una predicción incorrecta es conocida como “falsa alarma” (Figura 9).

En este sentido, si se considera el mapa potencial de transición como una superficie, el estadístico ROC permite evaluar la proporción relativa de aciertos y falsas alarmas como un plano de decisión horizontal que es inferior y que verticalmente baja a interceptar esta superficie. En un umbral alto, sólo los picos de la superficie de transición potencial han sido interceptados y esperamos (si la superficie es un buen predictor) que la mayoría de las cumbres que se encuentran puedan ser aciertos en lugar de falsas alarmas. Sin embargo, conforme la superficie de decisión se reduce más, es de esperar que el número de falsas alarmas aumente. Una medida altamente predictiva producirá una curva que se eleva rápidamente desde la parte inferior izquierda hasta un punto cerca de la esquina superior izquierda y después se mueve lentamente cerca del borde superior de la gráfica para llegar a la esquina superior derecha (Figura 9a). Por el contrario, en una medida sin capacidad predictiva en absoluto se esperaría encontrar iguales tasas de aciertos y falsas alarmas en cada umbral, dando una línea recta desde la parte inferior izquierda a la superior derecha (Figura 9b). Este estadístico utiliza la regla trapezoidal del cálculo integral para calcular el área bajo la curva, proyectada entre la proporción de falsas alarmas contra verdaderas alarmas. En este caso, un mapa con capacidad de predicción perfecta, tendría un valor de 1, mientras que un mapa aleatorio con ningún potencial predictivo, daría

un valor de 0.5. Los valores menores a esta cantidad, indican una medida sistemáticamente incorrecta (Eastman et al., 2009).

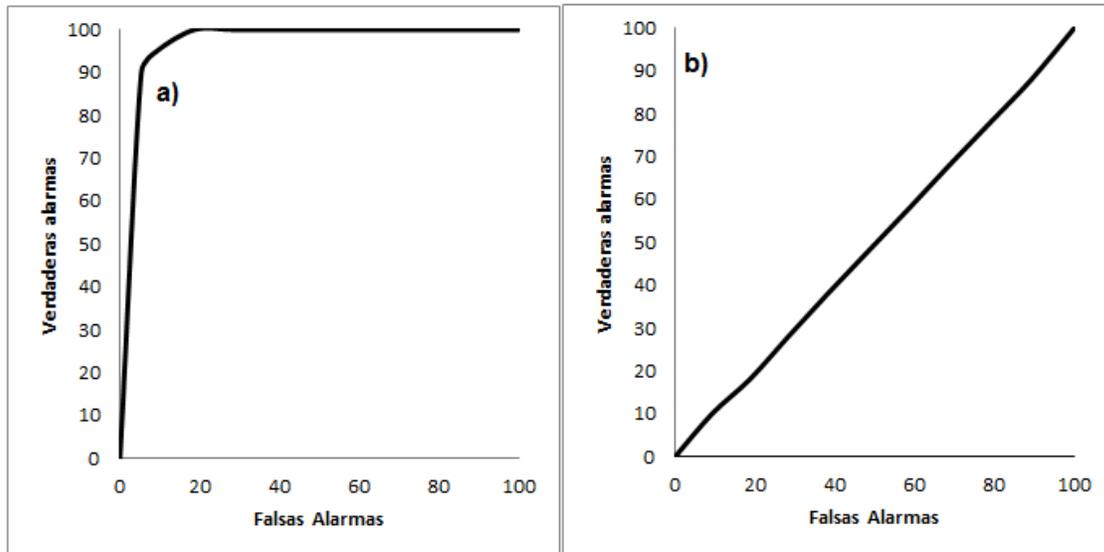


Figura 9. Construcción de la curva ROC. La curva une vértices que indican la tasa de falsas alarmas vs tasa de aciertos en varios niveles de umbrales del potencial de transición; a) Curva ROC con capacidad predictiva y b) Curva ROC sin capacidad predictiva.

4. Resultados

4.1. Corrección geométrica de las imágenes satelitales

En el Cuadro 5 se pueden observar los valores de los Errores Medios Cuadráticos (RMSE) tomados de las escenas satelitales Landsat MSS, ETM+ y SPOT. Los RMSE se presentan en el eje de las x y el eje de las y.

Cuadro 5. Errores Medio Cuadráticos tomados de las imágenes satelitales Landsat MSS, ETM+ y SPOT.

	RMSE (pixel)	
	X	Y
Landsat MSS	0.59	0.63
Landsat ETM+	0.62	0.56
SPOT	0.44	0.46

En las tres escenas satelitales se puede observar que los RMSE son muy pequeños (< 1 pixel), por lo tanto fueron utilizadas para el análisis del proceso de deforestación sin corrección geométrica adicional.

4.2. Evaluación de la fiabilidad de las clasificaciones

La fiabilidad global de las clasificaciones de los mapas de cobertura y usos del suelo de las fechas 1986, 2000 y 2011 fueron de 71.6%, 73.1% y 75.4%, respectivamente. Estos resultados son considerados aceptables y se encuentran dentro del rango de fiabilidad de diversos estudios que emplean criterios espectrales y visuales para la interpretación de imágenes satelitales (Díaz-Gallegos et al., 2010).

En el cuadro 6 se muestran los resultados de la fiabilidad del año 2011. Como se puede observar, las categorías mejor interpretadas fueron el bosque de pino-encino y los asentamientos humanos. Por el contrario, la categoría

agricultura de temporal fue la que generó mayor confusión con el pastizal inducido; otras categorías en las que se presentó confusión fueron el bosque tropical seco y el bosque de encino, confundidos con los pastizales inducidos. En este caso, el error posiblemente se debe a que los puntos de verificación más recientes de la imagen de referencia, tomada del portal Google Earth, correspondían al año 2009, por lo que es probable que en dos años algunos de los parches del bosque tropical seco y bosque de encino se hayan convertido a pastizales inducidos.

Por otro lado, en el año 2000, una de las categorías que continuó teniendo errores de clasificación fue la agricultura de temporal que fue confundida con el bosque de encino y el pastizal Inducido (Cuadro 8); esta confusión provocó la disminución de la confiabilidad del bosque de encino y la agricultura de temporal (Cuadro 7). Otra categoría que disminuyó su confiabilidad fueron los asentamientos humanos que se confundieron con pastizal inducido (Cuadro 8). En contraste, la categoría bosque de pino-encino se siguió manteniendo con un alto nivel de confiabilidad (generalmente > a 80%).

Finalmente, para el caso del mapa del año 1986, la fiabilidad global de la clasificación fue de 71.1% (cuadro 8). En general, para todas las coberturas forestales (bosque de pino encino, bosque de encino y bosque tropical seco) tuvieron confusión al interpretarlas como pastizales inducidos. Adicionalmente, la categoría asentamiento humano fue confundida con el pastizal inducido; esta baja confiabilidad puede atribuirse, por un lado, a que la información de referencia correspondía al año 1990, y por otro lado, a la menor resolución espacial del sensor MSS.

Cuadro 6. Matriz de confusión del mapa de coberturas/ usos del suelo del 2011, con corrección de Card (1982). Los resultados se encuentran representados en valores relativos.

Fiabilidad Clasificación 2011/ verdad terrestre 2009	Agricultura de Temporal	Pastizal Inducido	Bosque Tropical Seco	Bosque de Encino	Bosque de Pino-Encino	Asentamiento humano	Total	Conf.Usuario
Agricultura de Temporal	0.023	0.012	0.003	0.002	0.001	0.001	0.042	53.85
Pastizal Inducido	0.009	0.244	0.027	0.009	0.018	---	0.307	79.41
Bosque Tropical Seco	---	0.028	0.087	0.006	---	---	0.120	72.09
Bosque de Encino	---	0.033	0.005	0.082	0.008	---	0.128	63.83
Bosque de Pino-Encino	---	0.058	---	0.025	0.314	---	0.396	79.17
Asentamiento humano	---	---	---	0.000	0.000	0.006	0.006	94.29
Total	0.032	0.374	0.122	0.124	0.341	0.007		
Conf.productor	71.40	65.19	70.73	66.27	91.93	84.43		
Fiabilidad Global	75.4							

Cuadro 7. Matriz de confusión del mapa de coberturas/ usos del suelo del 2000, con corrección de Card (1982). Los resultados se encuentran representados en valores relativos.

Fiabilidad Clasificación 2000/ verdad terrestre 2001	Agricultura de Temporal	Pastizal Inducido	Bosque Tropical Seco	Bosque de Encino	Bosque de Pino-Encino	Asentamiento humano	Total	Conf.Usuario
Agricultura de Temporal	0.029	0.008	0.004	0.001	---	---	0.04	69.23
Pastizal Inducido	0.016	0.178	0.032	0.032	0.049	---	0.31	57.89
Bosque Tropical Seco	---	0.014	0.096	0.007	---	0.002	0.12	80.00
Bosque de Encino	0.008	0.008	0.003	0.109	---	---	0.13	84.78
Bosque de Pino-Encino	---	0.041	---	0.033	0.322	---	0.40	81.25
Asentamiento humano	---	0.001	---	---	---	0.01	0.01	88.24
Total	0.054	0.250	0.135	0.182	0.370	0.01		
Conf.productor	54.17	71.10	70.88	69.65	86.90	97.43		
Fiabilidad Global	73%							

Cuadro 8. Matriz de confusión del mapa de coberturas/ usos del suelo del 1986, con corrección de Card (1982). Los resultados se encuentran representados en valores relativos.

Fiabilidad clasificación 1986/ Verdad terrestre 1990	Agricultura de temporal	Pastizal inducido	Bosque Tropical Seco	Bosque de Encino	Bosque de Pino-Encino	A.humano	Total	C.usuario
Agricultura de temporal	0.034	0.003	0.002	0.002	---	---	0.041	82.05
Pastizal inducido	0.037	0.183	0.044	0.022	0.022	---	0.308	59.52
Bosque Tropical Seco	---	0.016	0.097	0.003	---	0.005	0.121	80.43
Bosque de Encino	0.003	0.025	0.008	0.085	0.008	---	0.129	65.96
Bosque de Pino-Encino	---	0.083	---	---	0.314	---	0.397	79.17
A.humano	---	0.001	---	---	---	0.005	0.006	79.53
Total	0.074	0.310	0.151	0.111	0.344	0.010		
Conf. productor (%)	46.65	58.97	73.24	76.02	91.23	89.54		
Fiabilidad global	71.67							

4.3 Mapas de coberturas y usos del suelo

Se elaboró la cartografía (1:100,000) correspondiente a las coberturas y usos del suelo de la cuenca del río Coyuquilla de los años 1986, 2000 y 2011 (Figura 10, 11 y 12). Las estadísticas de la dinámica de cambio se describen en la siguiente sección.

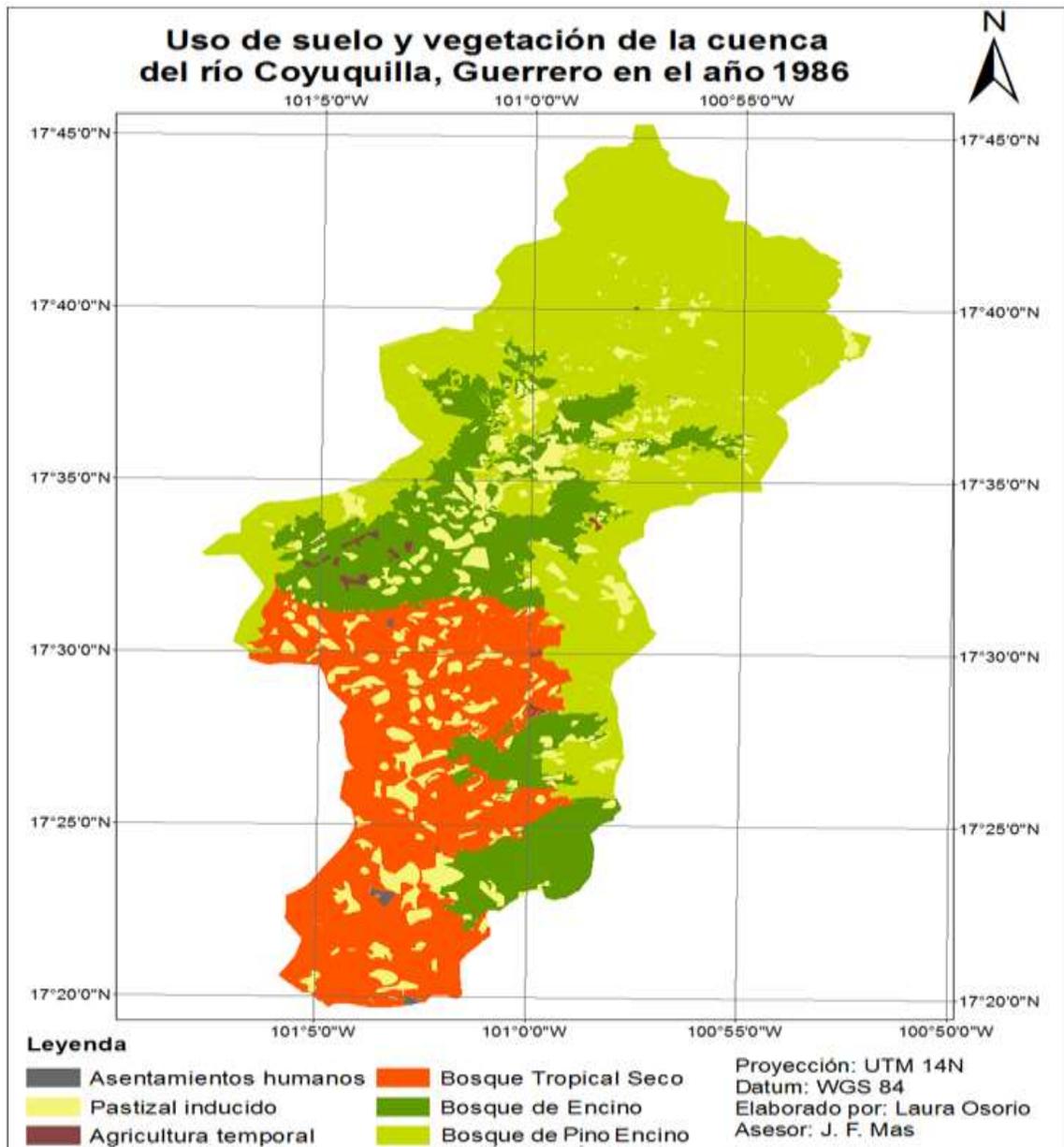


Figura 10. Mapa de uso del suelo y vegetación de la cuenca del río Coyuquilla en el año 1986.

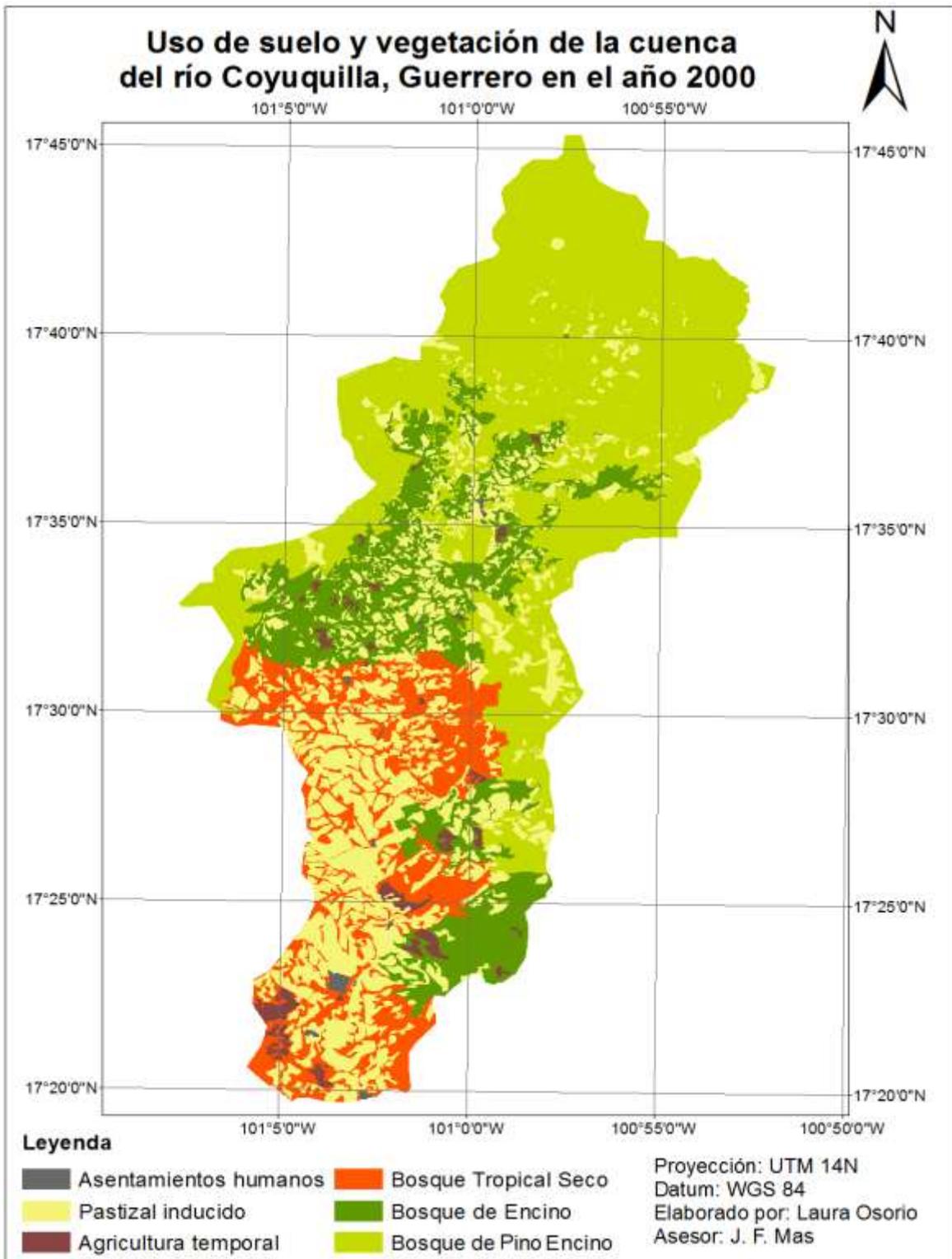


Figura 11. Mapa de uso del suelo y vegetación de la cuenca del río Coyuquilla en el año 2000.

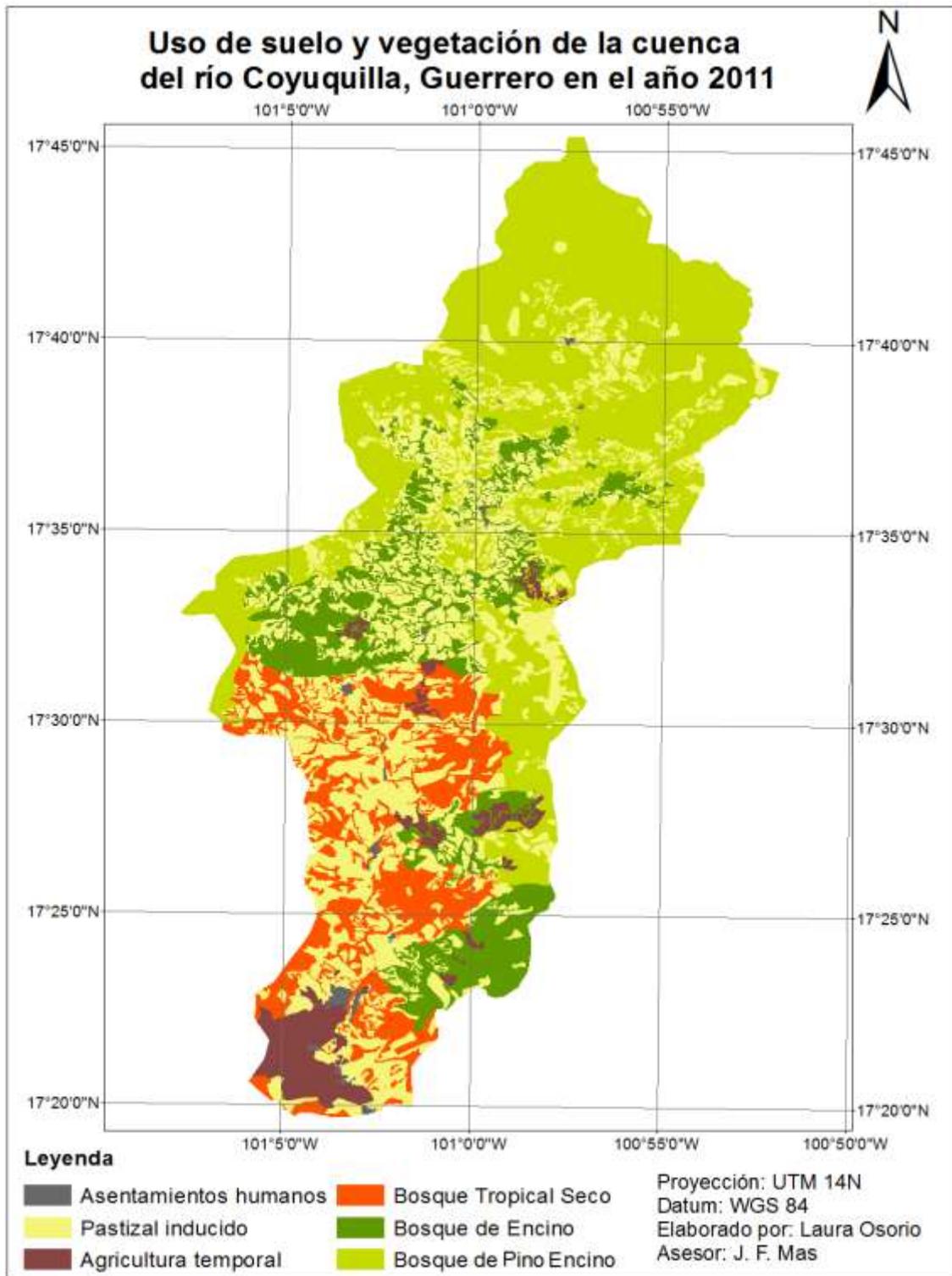


Figura 12. Mapa de uso del suelo y vegetación de la cuenca del río Coyuquilla en el año 2011.

4.4. Estadísticas de la dinámica de los procesos de deforestación

Los cuadros 9 y 10 contienen los resultados de las estimaciones de la dinámica de los procesos de deforestación para los períodos 1986-2000, 2000-2011 y 1986-2011. Las estadísticas calculadas incluyen superficies en hectáreas, porcentajes, estadísticas de cambio para todo el período y tasas anuales de cambio para las seis categorías consideradas en este estudio.

4.4.1. Estadísticas de la dinámica de los procesos de deforestación para el período 1986-2011

En el Cuadro 10 se muestran las estadísticas generales de la dinámica de cambio para el período completo (1986-2011). Se presentan las estadísticas de cambio anuales, y para todo el período, representados en valores positivos y negativos. Los valores positivos indican una ganancia de superficie (ha), en contraste los valores negativos indican una disminución en superficie (ha). En este período, se puede observar una tendencia general hacia la disminución del bosque tropical seco seguido del bosque de encino y, por último, el bosque de pino-encino. Esta disminución se debe al aumento de superficie de los usos de suelo antrópicos como son el pastizal inducido seguido de la agricultura de temporal y los asentamientos humanos. Estos resultados se pueden comparar con las tasas anuales de cambio (Cuadro 9). Las tasas positivas indican un aumento porcentual por año para las categorías agricultura de temporal seguida de los pastizales inducidos y los asentamientos humanos. Por el contrario, los valores negativos indican una disminución porcentual por año a las categorías bosque tropical seco, seguido del bosque de encino y bosque de pino-encino (cuadro 9). En la Figura 13 se aprecian de manera gráfica las tendencias generales de este período expresadas en porcentaje.

Cuadro 9. Estadísticas generales de la dinámica de cambio en el período completo 1986-2011.

Tipos de Coberturas y Usos del Suelo	1986 (ha)	%	2000 (ha)	%	2011 (ha)	%	Cambio 1986-2011(ha)	Cambio 1986-2011(%)	Tasa de Cambio 1986-2011 (%/año)
Asentam. Humanos	112	0.19	192	0.32	369	0.62	258	0.44	4.90
Pastizal Inducido	5838	9.87	12770	21.59	22746	38.45	16907	28.58	5.59
Agricultura Temporal	471	0.80	2364	4.00	2766	4.68	2296	3.88	7.34
Bosque Tropical Seco	14106	23.85	8304	14.04	4987	8.43	-9119	-15.42	-4.07
Bosque de Encino	12024	20.33	9925	16.78	5302	8.96	-6722	-11.36	-3.22
Bosque de Pino-Encino	26600	44.97	25597	43.27	22981	38.85	-3619	-6.12	-0.58
Total	59151	100	59151	100	59151	100			

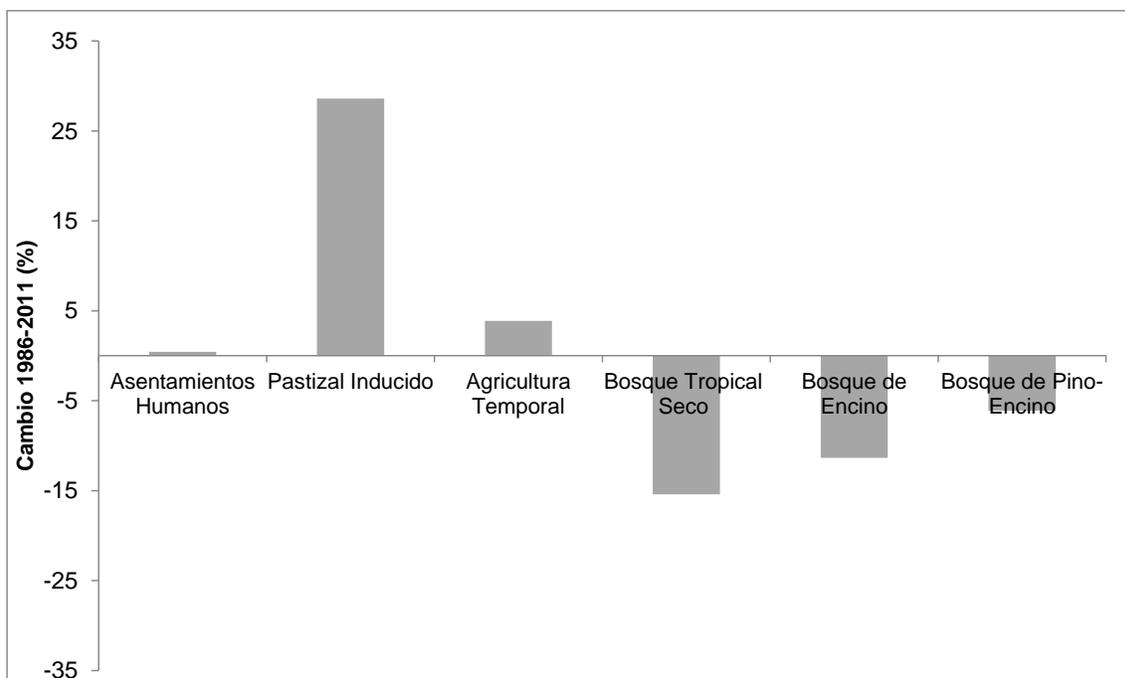


Figura 13. Comparación entre las pérdidas de coberturas forestales y ganancias de los usos del suelo superficiales (%) en el período 1986-2011.

4.4.2. Estadísticas de la dinámica de los procesos de deforestación para los períodos 1986-2000 y 2000-2011

Cuadro 10. Estadísticas generales de la dinámica de cambio en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

Tipos de Coberturas y Usos del Suelo	1986 (ha)	%	2000 (ha)	%	2011 (ha)	%	Cambio 1986-2000(ha)	Cambio 2000-2011(ha)	Tasa de Cambio 1986-2000 (%/año)	Tasa de Cambio 2000-2011 (%/año)
Asentam. Humanos	112	0.19	192	0.32	369	0.62	80	177	3.94	6.13
Pastizal Inducido	5838	9.87	12770	21.59	22746	38.45	6931	9976	5.39	5.45
Agricultura Temporal	471	0.80	2364	4.00	2766	4.68	1893	403	12.22	1.44
Bosque Tropical Seco	14106	23.85	8304	14.04	4987	8.43	-5802	-3317	-3.71	-4.53
Bosque de Encino	12024	20.33	9925	16.78	5302	8.96	-2100	-4623	-1.36	-5.54
Bosque de Pino-Encino	26600	44.97	25597	43.27	22981	38.85	-1003	-2616	-0.27	-0.98
Total	59151	100	59151	100	59151	100				

En el período 1986-2000 la cobertura que registró una mayor pérdida fue el bosque tropical seco, seguida del bosque de encino y el bosque de pino-encino. Estas pérdidas se deben a la predominancia del uso del suelo pastizal inducido (Cuadro 10 y Figura 14). Por el contrario, en el período 2000-2011 las coberturas que sufrieron mayores modificaciones fueron el bosque de encino, seguido por el bosque tropical seco y el bosque de pino-encino (Cuadro 10 y Figura 15). Así mismo, se observó un incremento en superficie para las categorías pastizal inducido, agricultura de temporal y asentamientos humanos.

Respecto a las tasas anuales de cambio, el primer período se caracteriza por tener altas tasas anuales de cambio para las categorías agricultura de temporal seguida de los pastizales inducidos y asentamientos humanos. Comparando estos datos con el segundo período se observa una disminución significativa de la tasa anual de cambio para la categoría agricultura de temporal y un aumento en la tasa anual de cambio para las categorías de asentamientos humanos y pastizales inducidos. Por otro lado, las coberturas que registraron

mayores tasas anuales de cambio, en el primer período, fueron el bosque tropical seco, continuando con el bosque de encino y el bosque de pino-encino. El segundo período se caracterizó por un incremento en la tasa anual de cambio para la cobertura bosque de encino, seguida del bosque tropical seco y bosque de pino-encino, la cobertura bosque de encino presentó la más alta tasa anual de cambio en el segundo período (Cuadro 10).

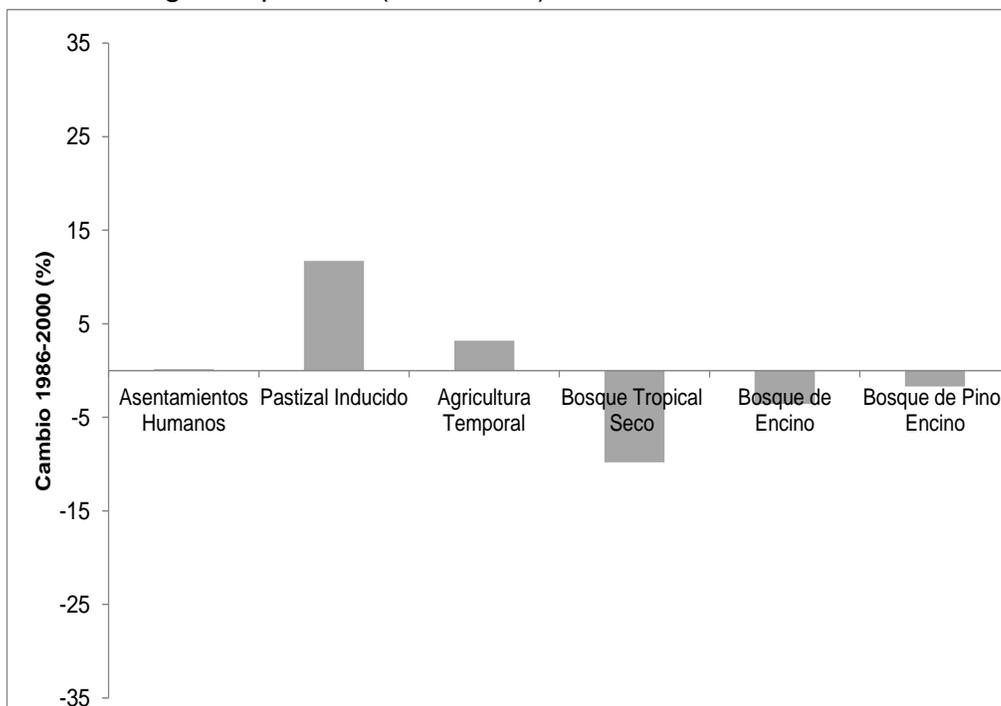


Figura 14. Comparación entre las pérdidas de coberturas forestales y ganancias de usos del suelo superficiales (%) para el período 1986-2000.

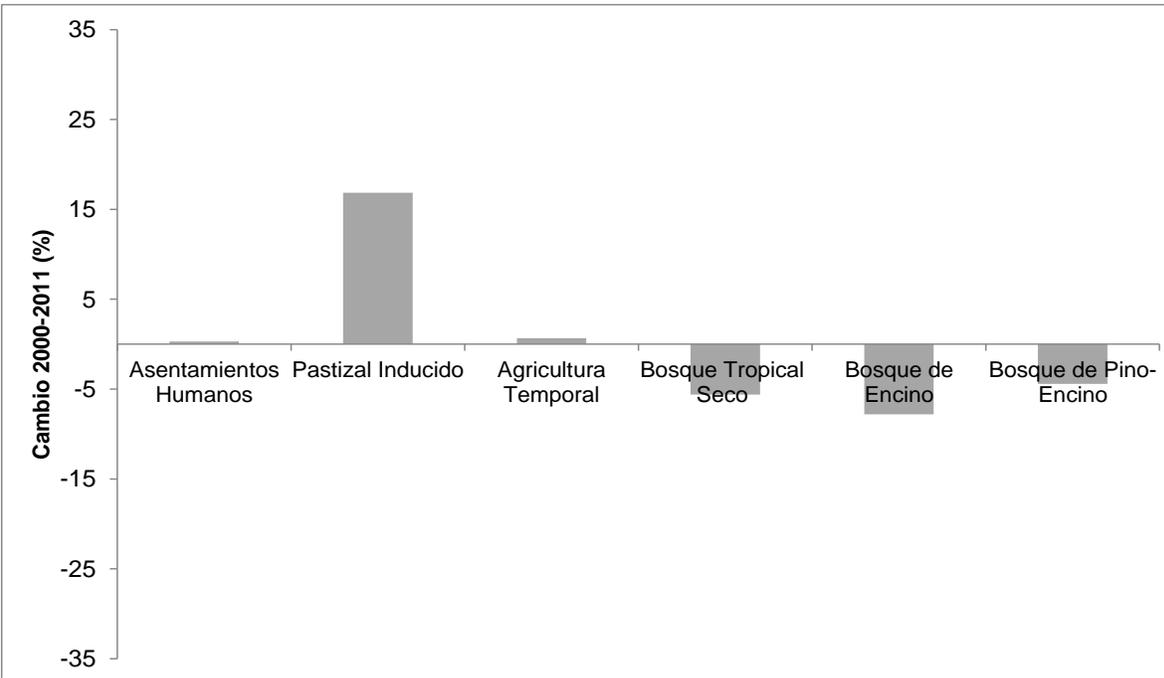


Figura 15. Comparación entre las pérdidas de coberturas forestales y ganancias de usos del suelo superficiales (%) para el período 2000-2011.

4.5. Matrices de Transición

En las Figuras 16 y 17 se presentan de manera esquemática las probabilidades de transición y las tasas anuales de cambio para cada una de las categorías consideradas y que corresponden a los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

La dinámica del primer período se caracterizó por importantes pérdidas de la cobertura del bosque tropical seco seguida por el bosque de encino y el bosque de pino-encino. Las coberturas bosque tropical seco y bosque de encino muestran transiciones hacia pastizales inducidos, agricultura de temporal y asentamientos humanos; la más alta probabilidad de cambio corresponde al pastizal inducido. Por su parte, la cobertura bosque de pino-encino derivó a pastizales inducidos mostrando bajas probabilidades de cambio. En relación con los usos del suelo, la agricultura de temporal experimentó una marcada disminución en su superficie cambiando hacia los pastizales inducidos. Además este período se caracterizó por una importante dinámica de recuperación de las coberturas bosque tropical

seco, seguido del bosque de encino y, por último el bosque de pino-encino (Figura 16).

El período 2000-2011 se caracterizó por una disminución de las coberturas del bosque de encino, seguida por el bosque tropical seco y el bosque de pino-encino. En las tres coberturas forestales fue posible observar que las más altas probabilidades corresponden al cambio hacia pastizales inducidos. En la cobertura bosque tropical seco se observaron incrementos en las probabilidades de cambio hacia la agricultura de temporal y asentamientos humanos, así como una disminución en las probabilidades de cambio hacia los pastizales inducidos con respecto al primer período. Mientras tanto, en las coberturas bosque de encino y bosque de pino-encino se observaron incrementos significativos en las probabilidades de cambio hacia los pastizales inducidos, siendo el bosque de encino la cobertura más afectada. Con respecto a los usos del suelo, en este período, la agricultura de temporal experimentó un incremento significativo en su probabilidad de cambio hacia pastizales inducidos. Asimismo se observó una disminución en la recuperación de las coberturas bosque tropical seco y bosque de pino-encino y un aumento en la recuperación de bosque de encino (Figura 17).

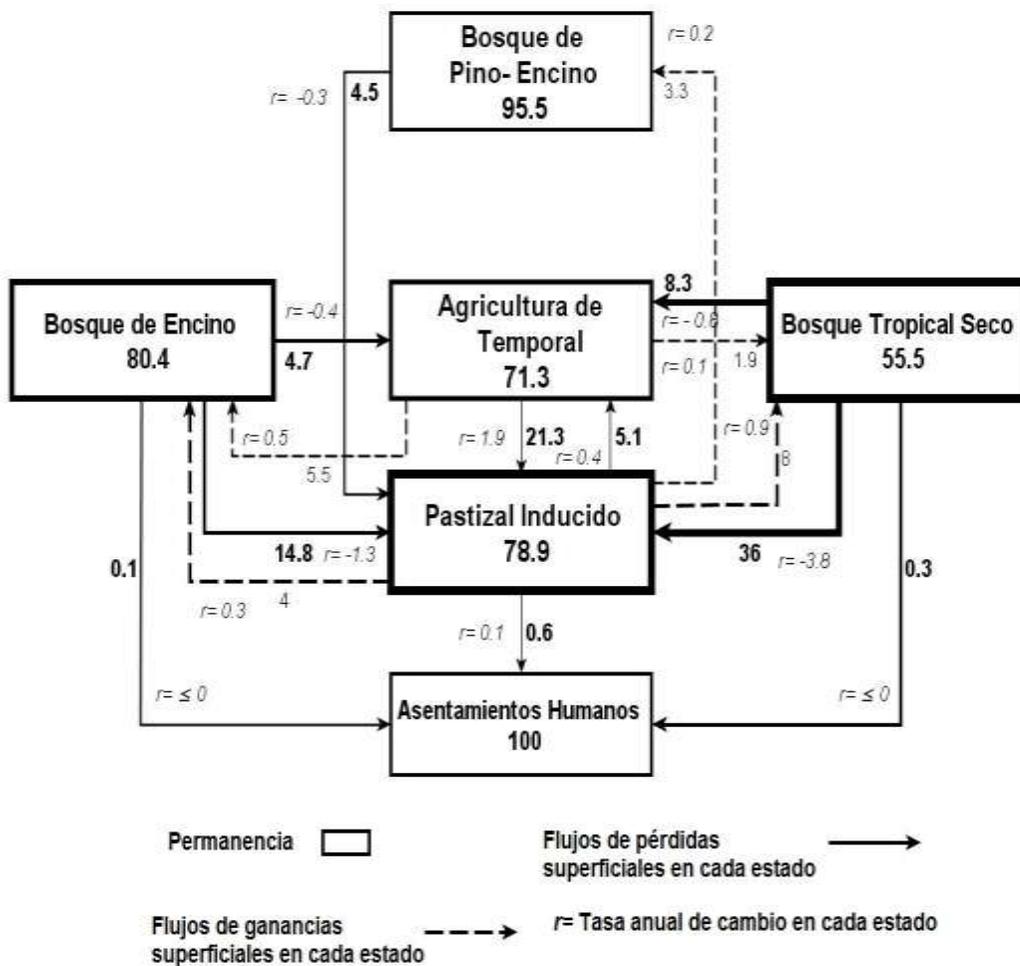


Figura 16. Representación esquemática de los procesos de cambio de coberturas/ usos del suelo en el período 1986-2000. Los resultados se encuentran representados en porcentaje. Estos resultados se pueden comparar con la matriz de transición (Anexo 1).

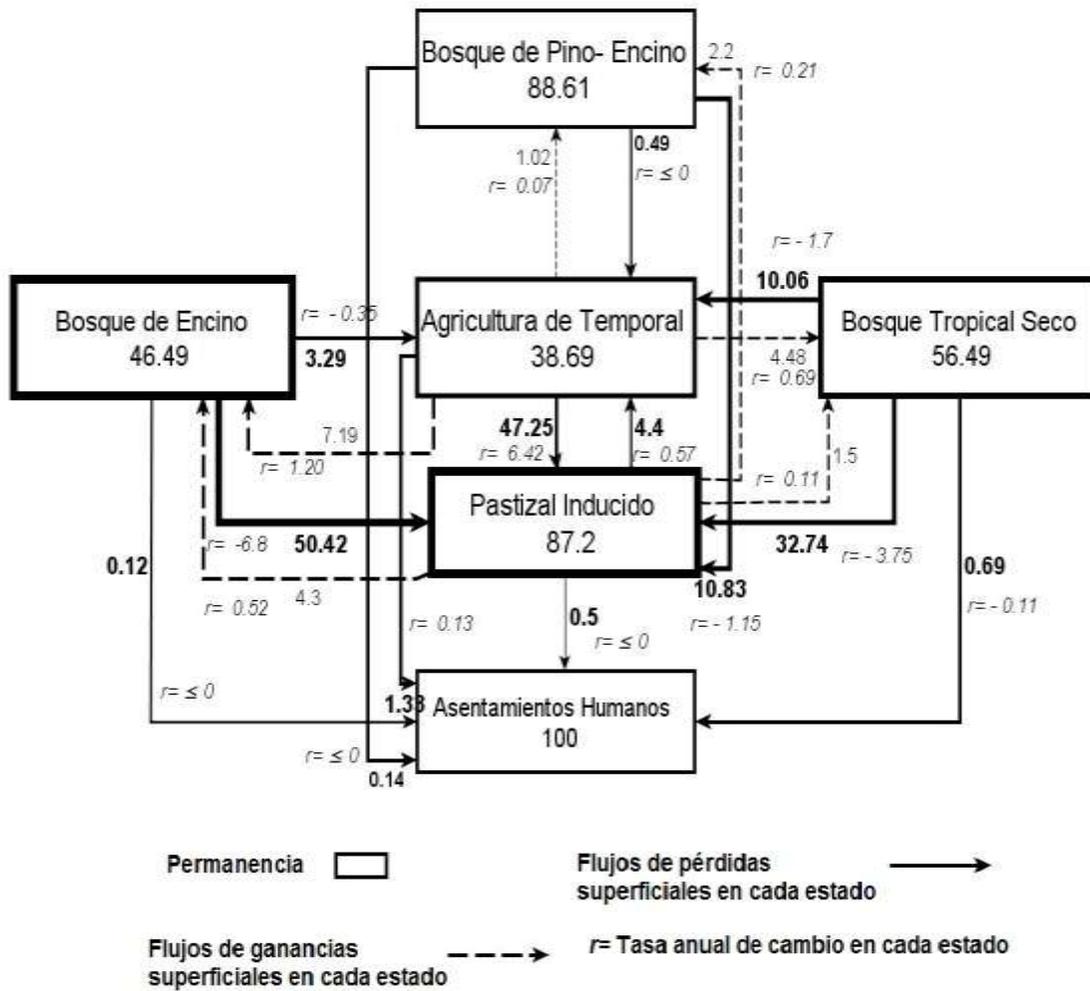


Figura 17. Representación esquemática de los procesos de cambio de coberturas/ usos del suelo en el período 2000-2011. Los resultados se encuentran representados en porcentaje. Estos resultados se pueden comparar con la matriz de transición (Anexo 1).

4.6. Identificación de las variables que se asocian a la deforestación

4.6.1. Análisis de correlación (Coeficiente de Spearman)

Las Figuras 19, 20, 21 y 22 muestran las correlaciones entre las variables explicativas ambientales y socioeconómicas, interpoladas por el método IDW para las localidades CONAPO e INEGI (2000) e INEGI (2011). La figura 18 muestra un ejemplo para la interpretación de los resultados del Coeficiente de Spearman.

Los coeficientes de Correlación de Spearman, mostraron que, de las seis variables ambientales y las nueve variables socioeconómicas analizadas en los dos períodos analizados, únicamente, la variable socioeconómica “Población sin agua entubada (2011)” presenta alta correlación con la variable población de 15 a 49 años (Spearman > 0.75), por lo que fue descartada para posteriores análisis.

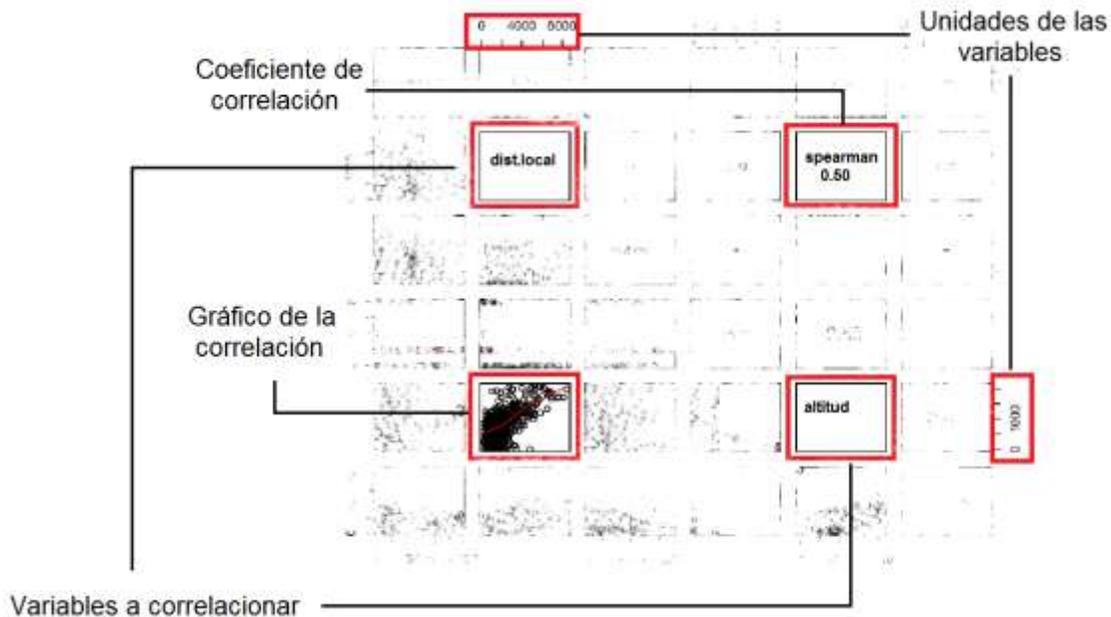


Figura 18. Se muestra un ejemplo de la interpretación de los resultados de correlación de variables a través del análisis del Coeficiente de Spearman. Las variables que se analizan son altitud y distancia a localidades. El coeficiente de correlación es menor a 0.70 por lo que fue considerada para posteriores análisis debido a su independencia.

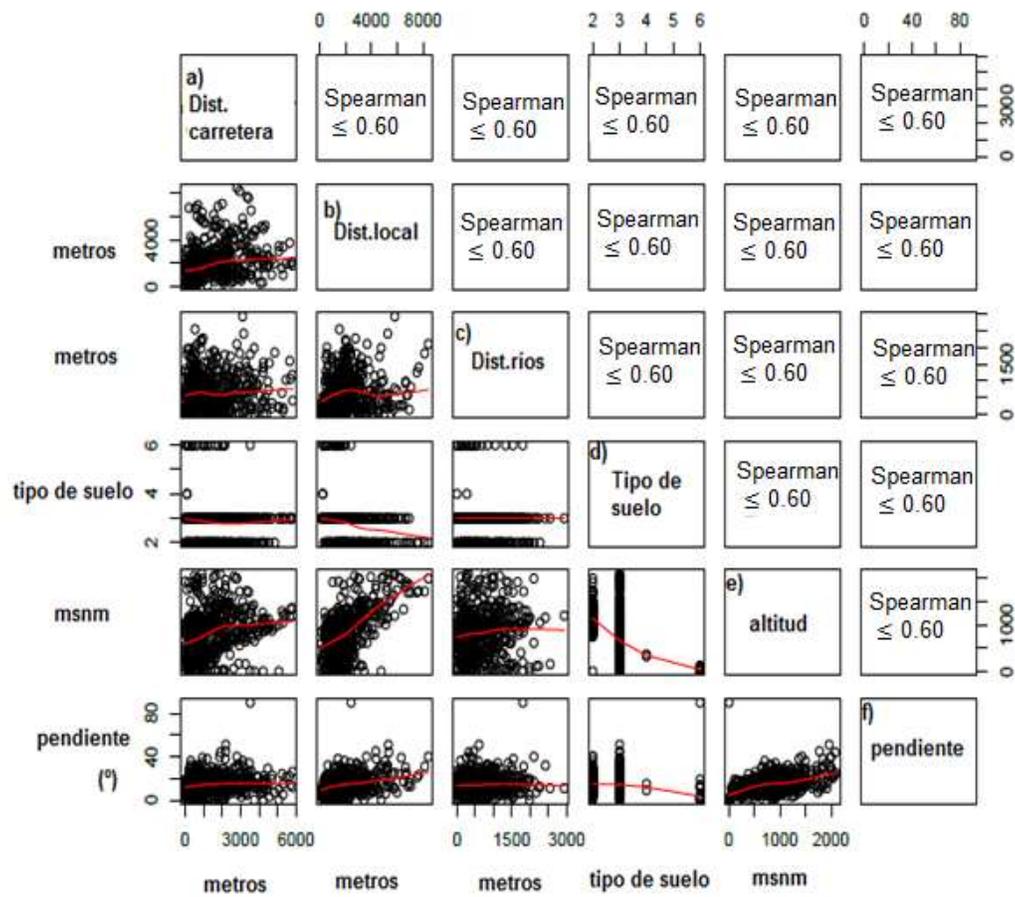


Figura 19. Análisis de Correlación Spearman entre variables ambientales en el año 2000; a) distancia a carreteras; b) distancia a localidades; c) distancia a ríos; d) tipo de suelo; e) altitud; y f) pendiente.

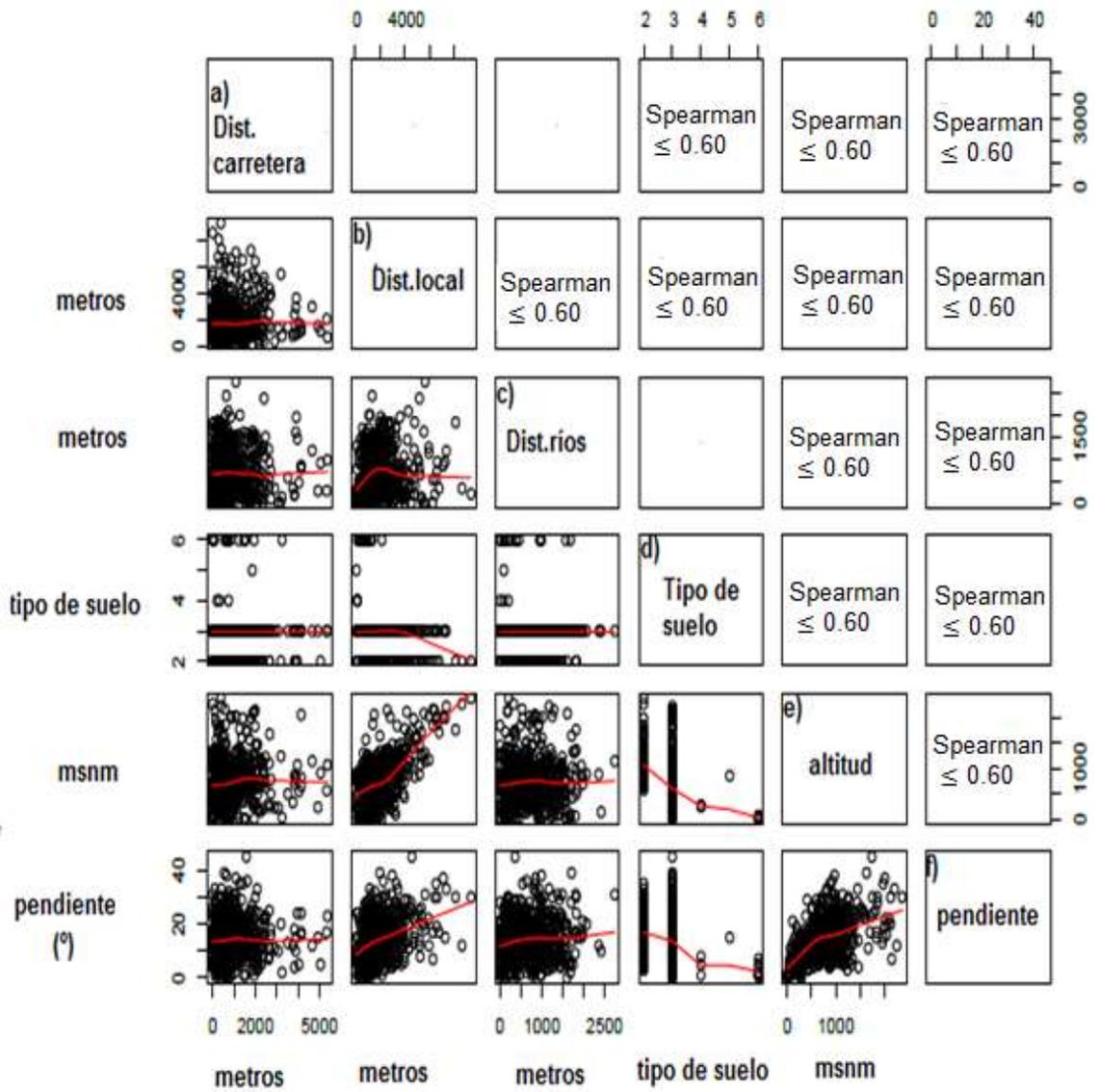


Figura 20. Análisis de Correlación Spearman entre variables ambientales del 2011; a) distancia a carreteras; b) distancia a localidades; c) distancia a ríos; d) tipo de suelo; e) altitud; y f) pendiente.

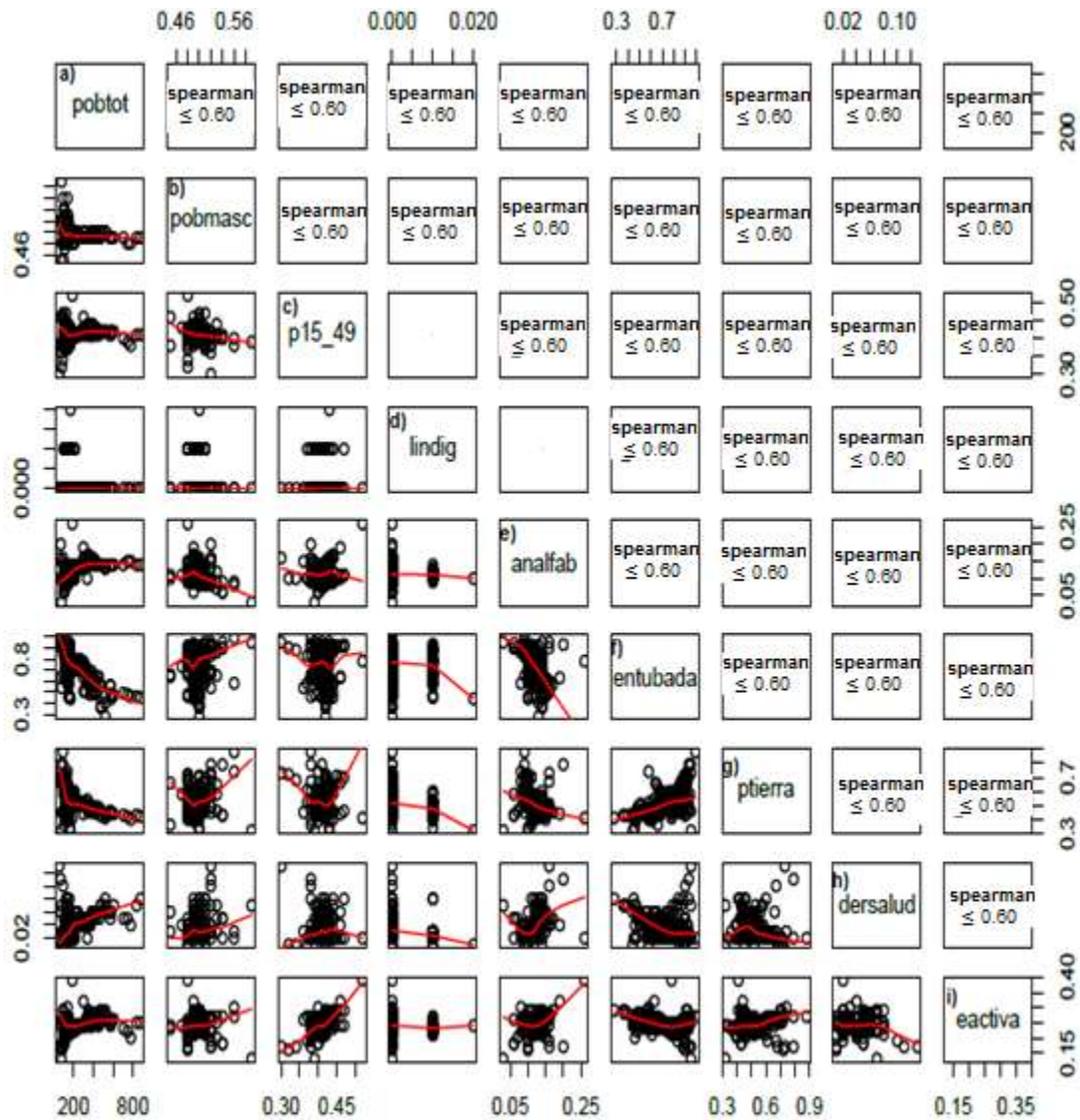


Figura 21. Análisis de Correlación Spearman entre variables socioeconómicas 2000; a) población total; b) población masculina; c) población de 15 a 49 años; d) población que habla lengua indígena; e) población analfabeta; f) población sin agua entubada; g) población de viviendas habitadas con piso de tierra; h) población con acceso a servicios de salud; e i) población económicamente activa. Los valores están representados en valores relativos.

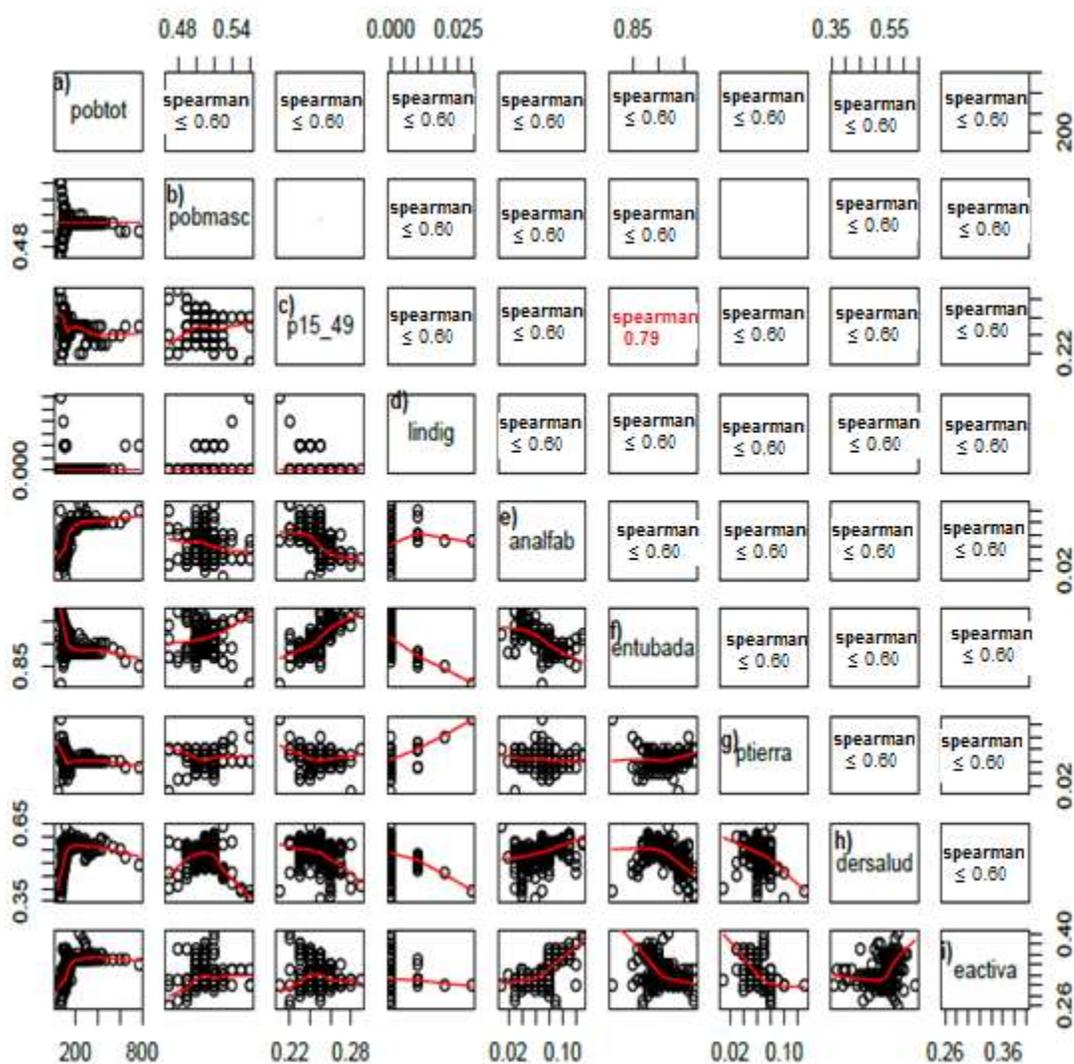


Figura 22. Análisis de Correlación Spearman entre variables socioeconómicas 2011; a) población total; b) población masculina; c) población de 15 a 49 años; d) población que habla lengua indígena; e) población analfabeta; f) población sin agua entubada; g) proporción de viviendas habitadas con piso de tierra; h) población con acceso a servicios de salud; e i) población económicamente activa. Los valores están representados en valores relativos.

4.6.2. Identificación de las variables ambientales y socioeconómicas que se asocian con la deforestación en los períodos 1986-2000 y 2000-2011

Las actividades socioeconómicas, junto con los factores ambientales, se han asociado a la pérdida de las coberturas forestales. Con la utilización de los Modelos Lineales Generalizados (MLG) a través del Criterio de Información Akaike (AIC) fue posible identificar las variables ambientales y socioeconómicas que se asocian con la pérdida de las coberturas boscosas: bosque tropical seco (BTS), bosque de encino (BE) y bosque de pino-encino (BPE).

En el caso de las variables ambientales fue posible identificar que la variable categórica “tipo de suelo” no presentó asociación con la pérdida de las coberturas forestales en los dos períodos analizados; las variables ambientales consideradas fueron categorizadas como indicadores de accesibilidad, entre éstas están la pendiente, la altitud, la distancia a carreteras, la distancia a localidades y la distancia a ríos.

Las variables socioeconómicas fueron categorizadas en cuatro grupos: (1) Demografía (Población total) ;(2) Marginación (población analfabeta, población de viviendas habitadas con piso de tierra, población de población con acceso a servicios a la salud, población que habla lengua indígena);(3) Economía (población económicamente activa); y (4) Migración (población de 15-49 años y población masculina).

En los Cuadros 11 y 12 se muestran los resultados de las variables significativas resultantes de la evaluación de los MLG a través de la selección de modelos del criterio AIC.

En el Cuadro 13 se muestra un resumen de las variables ambientales y socioeconómicas que tendieron a presentar una asociación positiva o negativa con el cambio de cobertura en los dos períodos analizados.

Cuadro 11. Variables ambientales que se asocian con la pérdida de las coberturas forestales: bosque tropical seco (BTS), bosque de encino (BE) y bosque de pino-encino (BPE) en los períodos 1986-2000 y 2000-2011. Códigos de significancia: 0***, 0.001**,0.01*.

Cobertura	Indicador	Variables ambientales que se asocian a la deforestación	Código de Significancia	AIC
BTS (1986-2000)	Accesibilidad	Distcarretera Altitud Pendiente	p≤ 0 (***) p≤ 0 (***) p≤ 0 (***)	7775
BTS (2000-2011)	Accesibilidad	Distcarretera Altitud Pendiente	p≤ 0 (***) p≤ 0 (***) p≤ 0.001 (**)	3886
BE(1986-2000)	Accesibilidad	Distcarretera Altitud Pendiente DistLocalidades	p≤ 0 (***) p≤ 0 (***) p≤ 0.001 (**) p≤ 0 (***)	5004
BE(2000-2011)	Accesibilidad	Distcarretera Pendiente DistLocalidades	p≤ 0 (***) p≤ 0 (***) p≤ 0 (***)	5074
BPE (1986-2000)	Accesibilidad	DistRios	p≤ 0 (***)	1461
BPE (2000-2011)	Accesibilidad	Distcarretera Pendiente DistLocalidades	p≤ 0 (***) p≤ 0.001 (**) p≤ 0 (***)	4078

Cuadro 12. Variables socioeconómicas que se asociaron a la pérdida de las coberturas forestales: bosque tropical seco (BTS), bosque de encino (BE) y bosque de pino-encino (BPE) en los períodos 1986-2000 y 2000-2011. Códigos de significancia: 0***, 0.001**,0.01.

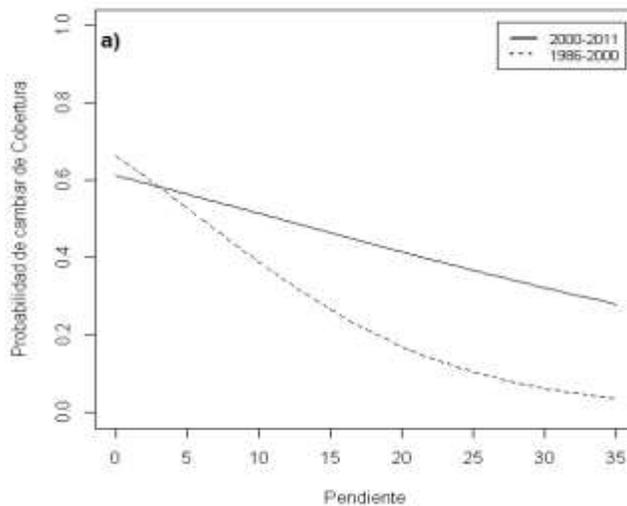
Cobertura	Indicador	Variables socioeconómicas que se asocian a la deforestación	Código de Significancia	AIC
BTS (1986-2000)	Demografía	Población total	p≤ 0 (***)	8033
	Marginación	Población analfabeta	p≤ 0 (***)	
	Economía	Población económicamente activa	p≤ 0 (***)	
	Migración	Población de 15 a 49 años	p≤ 0 (***)	
BTS (2000-2011)	Demografía	Población total	p≤ 0 (***)	3914
	Marginación	Población analfabeta	p≤ 0 (***)	
		Proporción de viviendas con piso de tierra	p≤ 0.001 (**)	
		Población con servicio a la salud	p≤ 0 (***)	
Economía	Pop. Económicamente Activa	p≤ 0 (***)		
BE(1986-2000)	Demografía	Población total	p≤ 0.001 (**)	5171
	Marginación	Población analfabeta	p≤ 0.001 (**)	
		Proporción de viviendas con piso de tierra	p≤ 0 (***)	
		Población que habla lengua indígena	p≤ 0.01(*)	
Migración	Población de 15 a 49 años	p≤ 0.001 (**)		
BE(2000-2011)	Demografía	Población total	p≤ 0 (***)	5138
	Marginación	Población analfabeta	p≤ 0 (***)	
		Población con servicio a la salud	p≤ 0 (***)	
		Proporción de viviendas con piso de tierra	p≤ 0.001 (**)	
		Población que habla lengua indígena	p≤ 0.01(*)	
Economía	Población económicamente activa	p≤ 0 (***)		
BPE (1986-2000)	Economía	Población económicamente activa	p≤ 0 (***)	7162
BPE (2000-2011)	Marginación	Población analfabeta	p≤ 0.001 (**)	
		Proporción de viviendas con piso de tierra	p≤ 0 (***)	
		Población con servicio a la salud	p≤ 0.001 (**)	
	Economía	Población económicamente activa	p≤ 0 (***)	
Migración	Población de 15 a 49 años	p≤ 0 (***)		

4.6.2.1. Variables Ambientales (accesibilidad)

En ambos períodos, las condiciones de accesibilidad han tenido un efecto significativo sobre la pérdida de las coberturas forestales. Los resultados muestran que las áreas de fácil acceso (en términos de tiempo o bajos costos) a los recursos forestales presentan mayores probabilidades de cambio en comparación con las áreas de difícil acceso, donde se presentan las probabilidades de cambio más bajas.

4.6.2.1.1. Bosque Tropical Seco

La deforestación del bosque tropical seco, en ambos períodos, tendió a asociarse en áreas de bajas pendientes, bajas altitudes y distancias cercanas a carreteras. La asociación entre la pendiente y la deforestación tuvo un efecto significativo mayor en el primer período. Las variables altitud y distancias cercanas a carreteras mantuvieron una relación constante con la deforestación en ambos períodos (Figura 23).



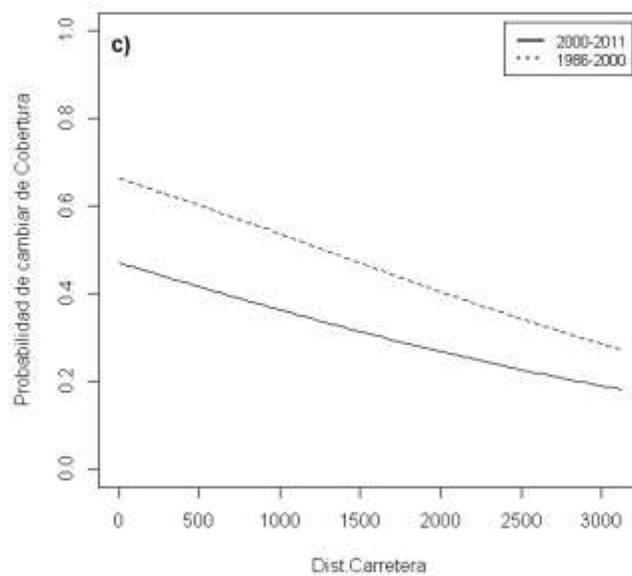
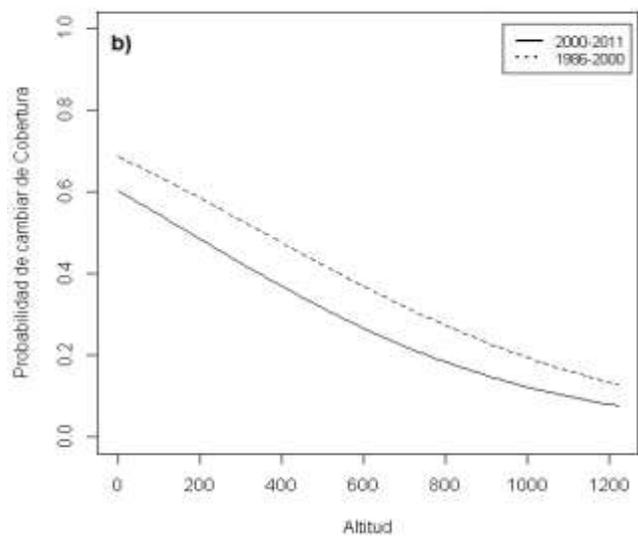
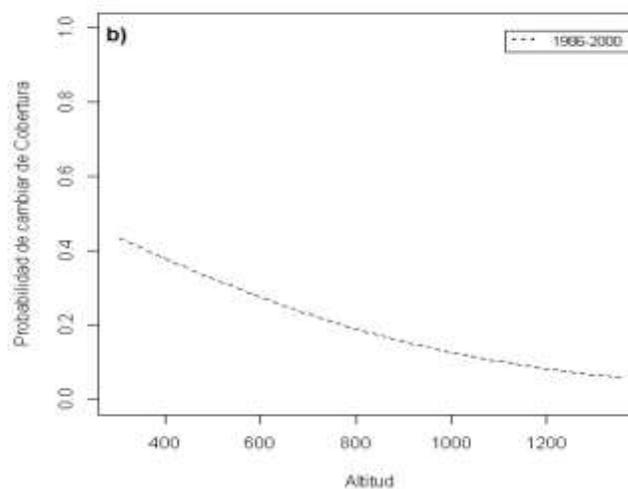
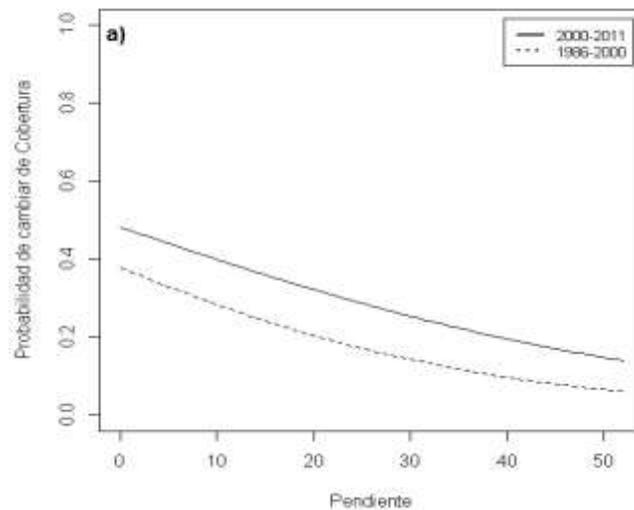


Figura 23. Relaciones logísticas entre las variables explicativas--a) pendiente; b) altitud; c) distancia a carreteras-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque tropical seco en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.6.2.1.2. Bosque de Encino

La pérdida del bosque de encino, en ambos períodos, estuvo relacionada con áreas con bajas pendientes, cercanía a localidades y carreteras. Para el primer período esta relación se da en bajas altitudes. La pendiente y la cercanía a carreteras, en ambos períodos, mantuvieron una relación constante con la deforestación, mientras que la asociación con la cercanía a localidades fue mayor en el primer período (Figura 24).



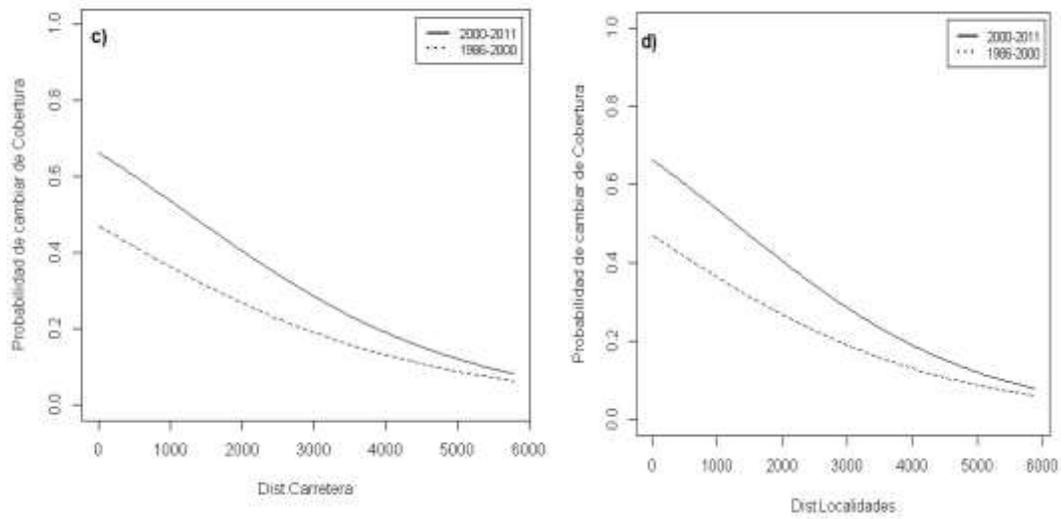
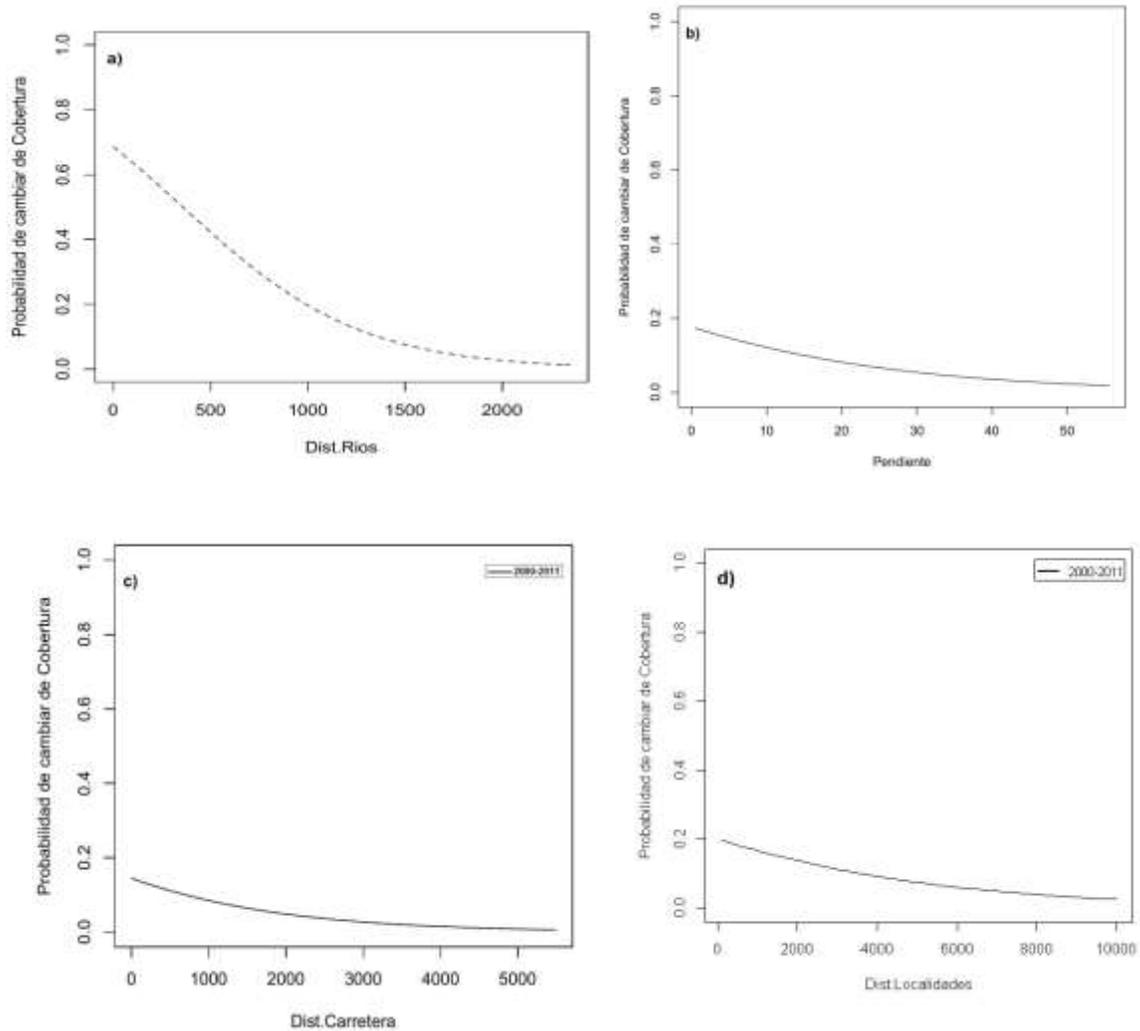


Figura 24. Relaciones logísticas entre las variables explicativas--a) pendiente; b) altitud; c) distancia a carreteras; d) distancia a localidades-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque de encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.6.2.1.3. Bosque de Pino-Encino

Finalmente, en la cobertura bosque de pino-encino, la variable que tendió a asociarse con la pérdida de este bosque fue la cercanía a ríos en el primer período. En el segundo período, se asoció con áreas de bajas pendientes y distancias cercanas a carreteras y localidades (Figura 25).



4.7.2.1. Variables Socioeconómicas (Demografía, Marginación, Economía y Migración)

4.7.2.1.1. Demografía

4.7.2.1.1.1. Bosque Tropical Seco

En el bosque tropical seco, en ambos períodos, fue posible observar que las poblaciones grandes tendieron a asociarse positivamente a la pérdida de cobertura, siendo en el segundo período cuando se presentó una asociación mayor en esta variable (Figura 26).

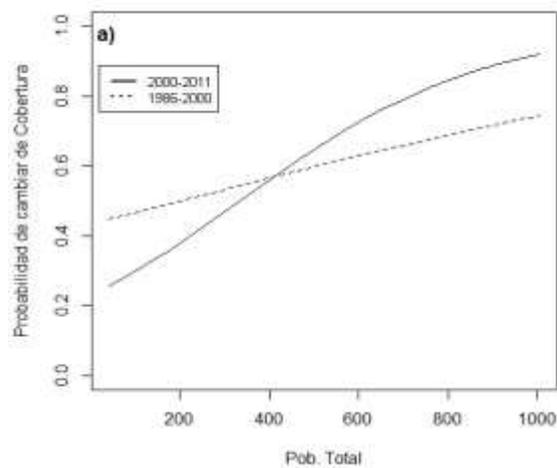


Figura 26. Relación logística entre la variable explicativa--a: Población total-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque tropical seco en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.7.2.1.1.2. Bosque de Encino

En el bosque de encino, en ambos períodos, las poblaciones pequeñas tendieron a asociarse positivamente con la pérdida de cobertura, esta asociación fue mayor en el segundo período (Figura 27).

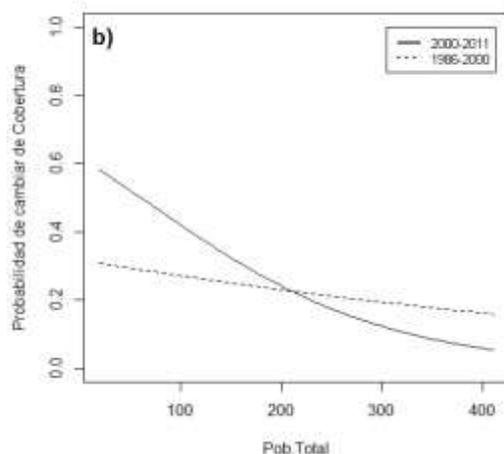


Figura 27. Relación logística entre la variable explicativa --b) Población total-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque de encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.7.3.1.1. Marginación

La marginación fue otro factor que tendió a asociarse con la pérdida de las tres coberturas forestales. La asociación de estas variables difirió por tipo de cobertura y período analizado.

4.7.3.1.1.1. Bosque Tropical Seco

En el bosque tropical seco la marginación presentó una asociación positiva con la deforestación en ambos períodos. La pérdida tendió a asociarse positivamente con la proporción de la población analfabeta, y en el primer período se presentó una asociación mayor. En el segundo período, otra variable que se asoció positivamente con la pérdida de cobertura fue la proporción de viviendas habitadas con piso de tierra, mientras que se estableció una asociación negativa entre la pérdida de cobertura y la proporción de población que tuvo acceso a servicios de salud (Figura 28).

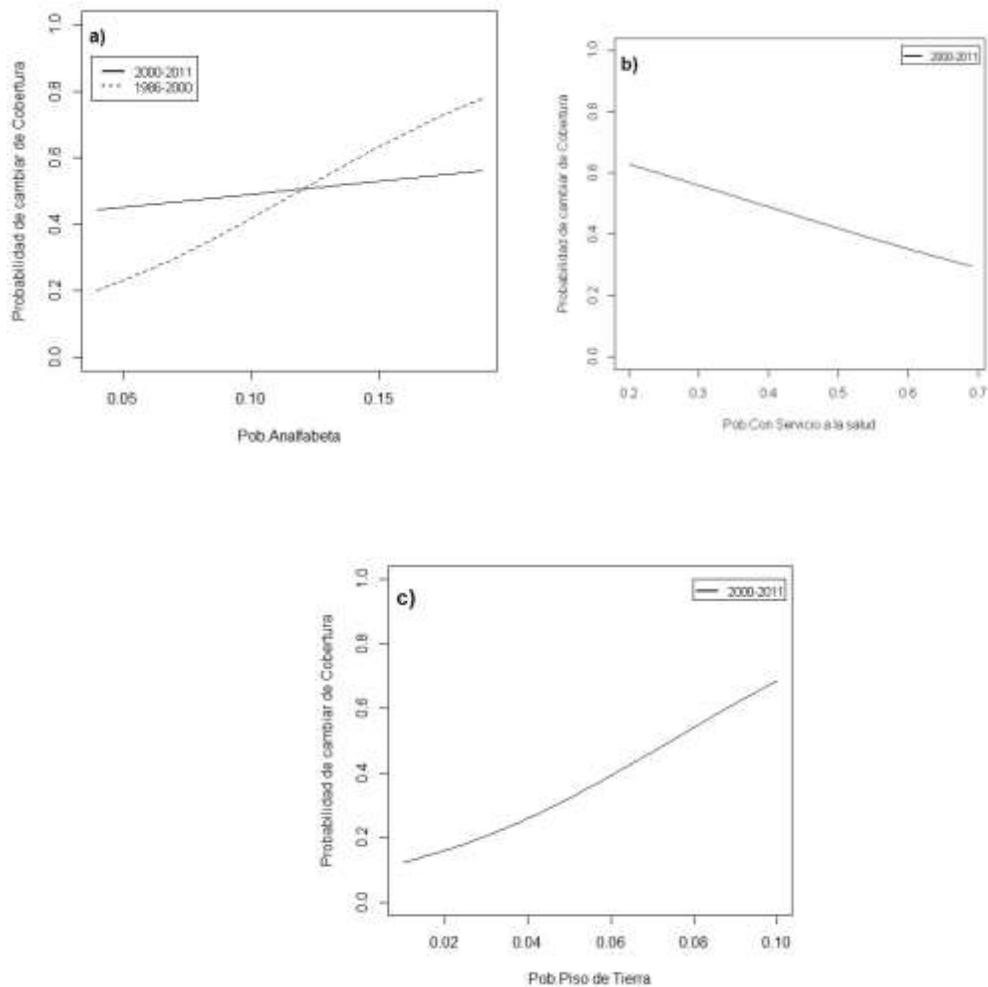


Figura 28. Relaciones logísticas entre las variables explicativas--a) proporción de población analfabeta; b) proporción de población que tuvo acceso a servicios de salud; c) proporción de viviendas habitadas con piso de tierra-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque tropical seco en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.7.3.1.1.2. Bosque de Encino

El bosque de encino fue otra de las coberturas que tendieron a asociarse con la marginación en ambos períodos. La pérdida tendió a asociarse positivamente con la proporción de población que habla lengua indígena y negativamente con la proporción de población analfabeta, la proporción de viviendas habitadas con piso

de tierra y la proporción de población que tuvo acceso a servicios de salud (Figura 29).

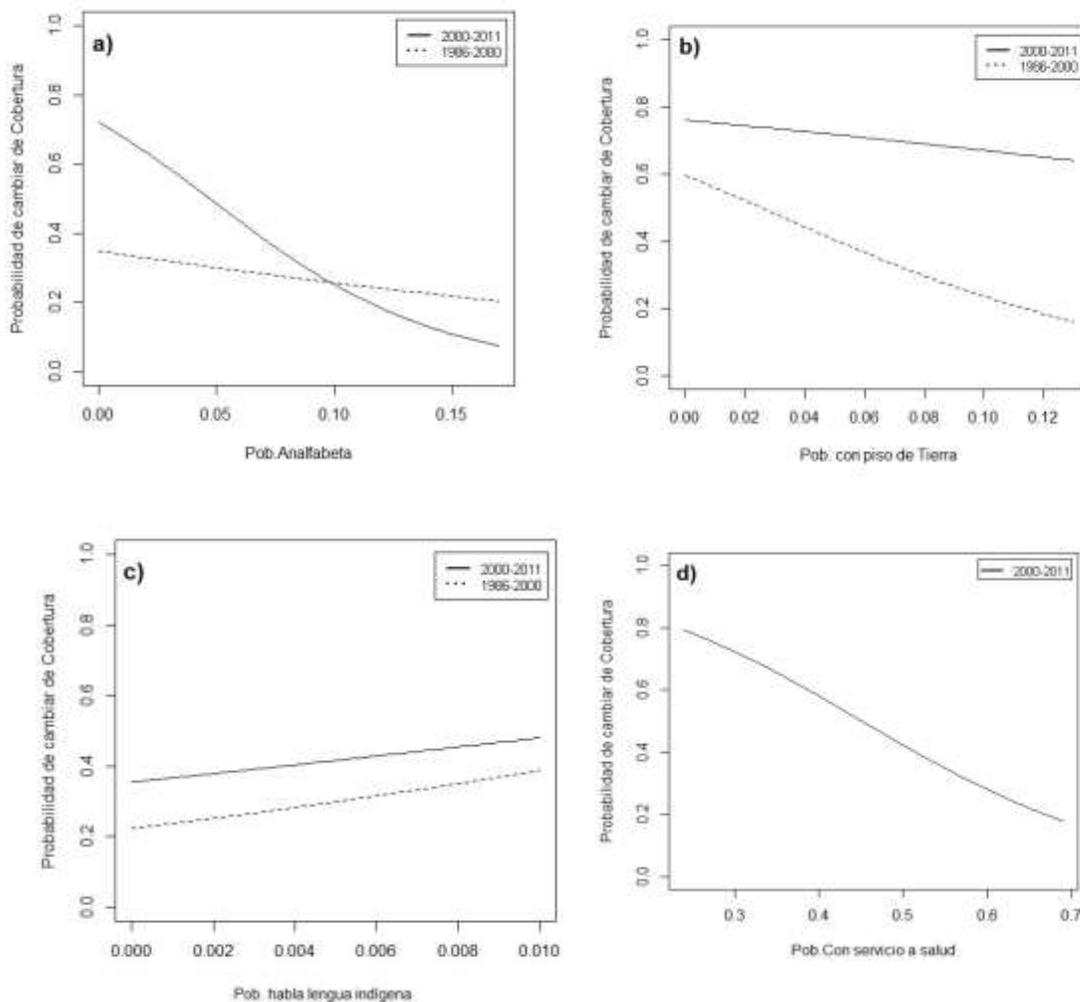


Figura 29. Relaciones logísticas entre las variables explicativas--a) proporción de población analfabeta; b) proporción de viviendas habitadas con piso de tierra; c) proporción de población que habla lengua indígena; d) proporción de población con servicios de la salud-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque de encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.7.3.1.1.3. Bosque de Pino-Encino (Período 2000-2011)

En el primer período la pérdida de bosque de pino-encino no presentó ninguna asociación con la marginación, pero en el segundo período, presentó una asociación positiva con la marginación. Las variables que se asociaron negativamente fueron la proporción de población que tuvo acceso a servicios de salud y la proporción de población analfabeta, mientras que se dio una asociación positiva con la proporción de viviendas habitadas con piso de tierra (Figura 30).

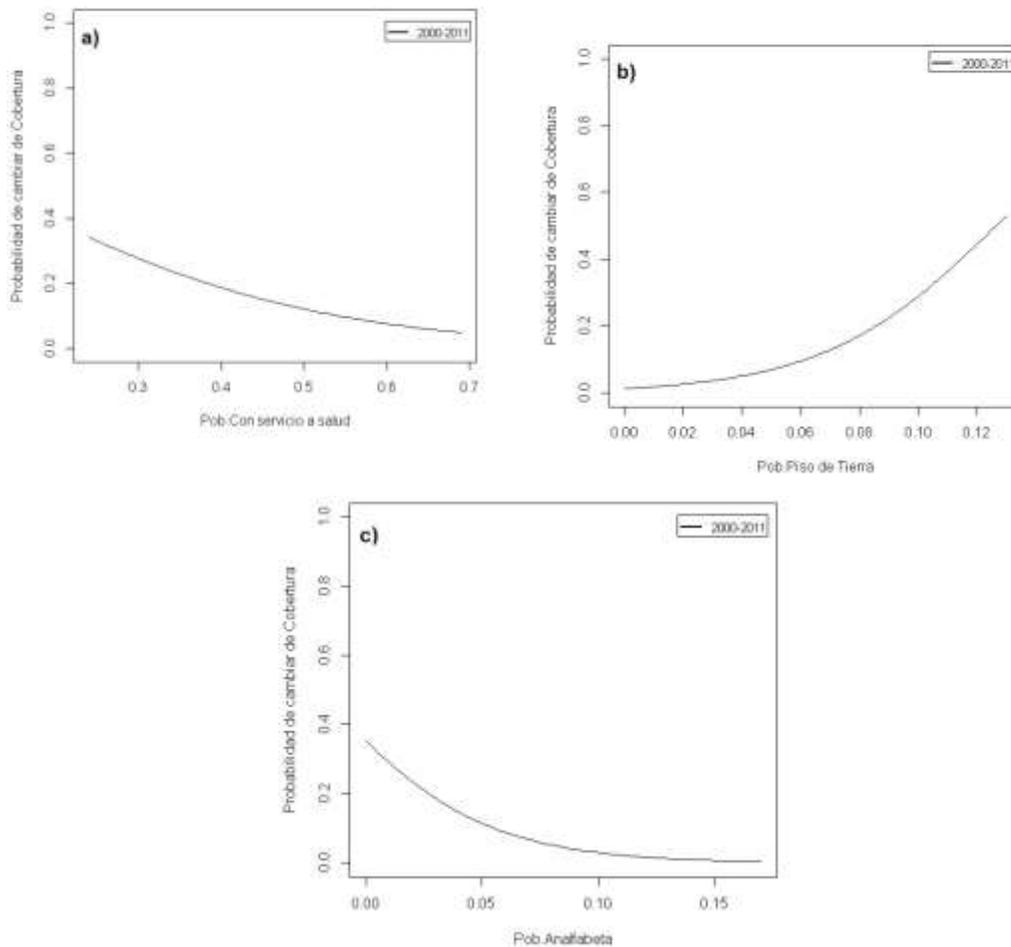


Figura 30. Relaciones logísticas entre las variables explicativas--a) proporción de población con acceso a servicios de salud; b) proporción de viviendas habitadas con piso de tierra c) proporción de población analfabeta-- y la probabilidad de cambio de la cobertura bosque de pino-encino en el período 2000-2011.

4.7.4.1.1. Economía

La población económicamente activa fue un factor socioeconómico importante para entender el proceso de deforestación de las tres coberturas forestales. Esta variable presentó diferencias para cada cobertura forestal y período analizado.

4.7.4.1.1.1. Bosque Tropical Seco

La pérdida del bosque tropical seco presentó diferencias entre el primer y segundo período. En el primer período tendió a asociarse negativamente con la proporción de población económicamente activa. Por el contrario, en el segundo período se relacionó positivamente con esta variable (Figura 31).

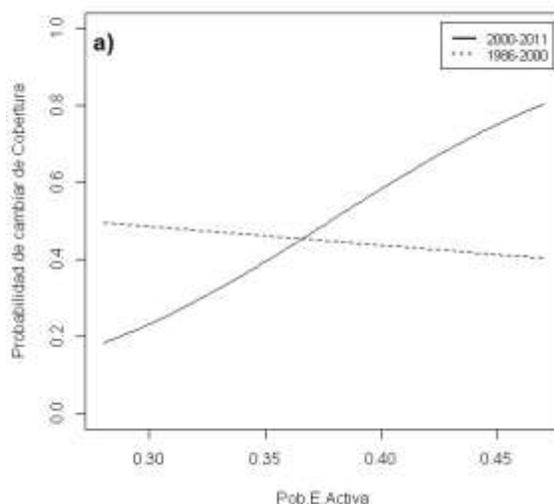


Figura 31. Relación logística entre la variable explicativa --a) proporción de población económicamente activa-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque tropical seco en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.7.4.1.1.2. Bosque de Encino

La pérdida cobertura del bosque de encino, en ambos períodos, tendió a asociarse negativamente con la proporción de población económicamente activa; en el segundo período la asociación entre ambas variables fue mayor (Figura 32).

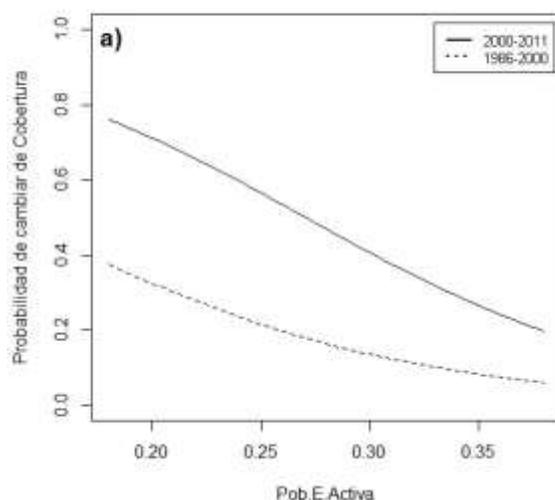


Figura 32. Relación logística entre la variable explicativa --a) proporción de población económicamente activa-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque de encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.7.4.1.1.3. Bosque de Pino-Encino

Finalmente la deforestación del bosque de pino-encino, en ambos períodos, tendió a asociarse positivamente con la población económicamente activa (figura 33).

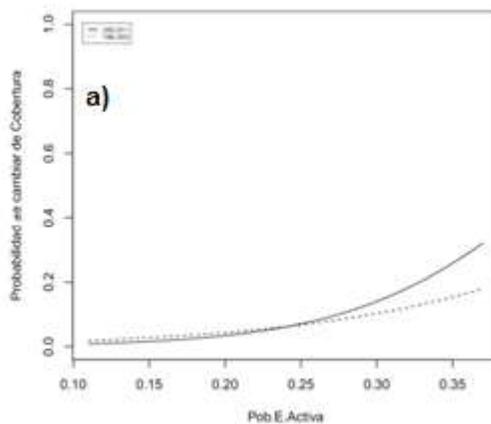


Figura 33. Relación logística entre la variable explicativa --a) proporción de población económicamente activa-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque de pino-encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

4.7.4.1.1. Migración

4.7.4.1.1. Bosque Tropical Seco y Bosque de Encino (Período 1986-2000)

En el bosque tropical seco y en el bosque de encino fue posible identificar que, en el primer período, la pérdida de cobertura tendió a asociarse negativamente con la proporción de población de 15 a 49 años (Figura 34).

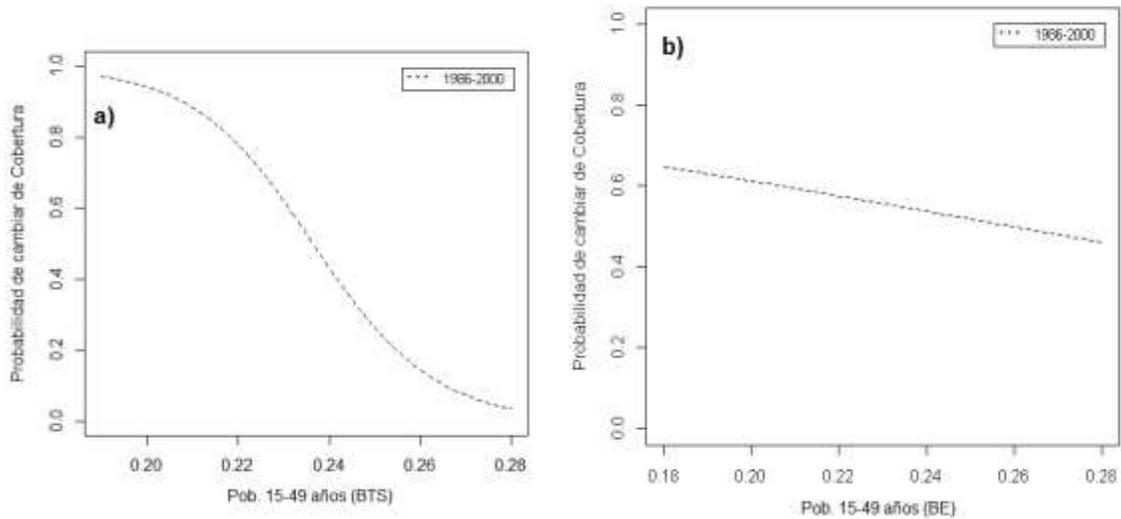


Figura 34. Relación logística entre la variable explicativa--proporción de población de 15 a 49 años-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque tropical seco (izquierda) y el bosque de encino (derecha) en el período 1986-2000.

4.7.4.1.2. Bosque de Pino-Encino

La pérdida de la cobertura bosque de pino-encino en el primer período tendió a asociarse negativamente con la proporción de población masculina. En el segundo período tendió a asociarse positivamente con la proporción de población de 15 a 49 años (Figura 35).

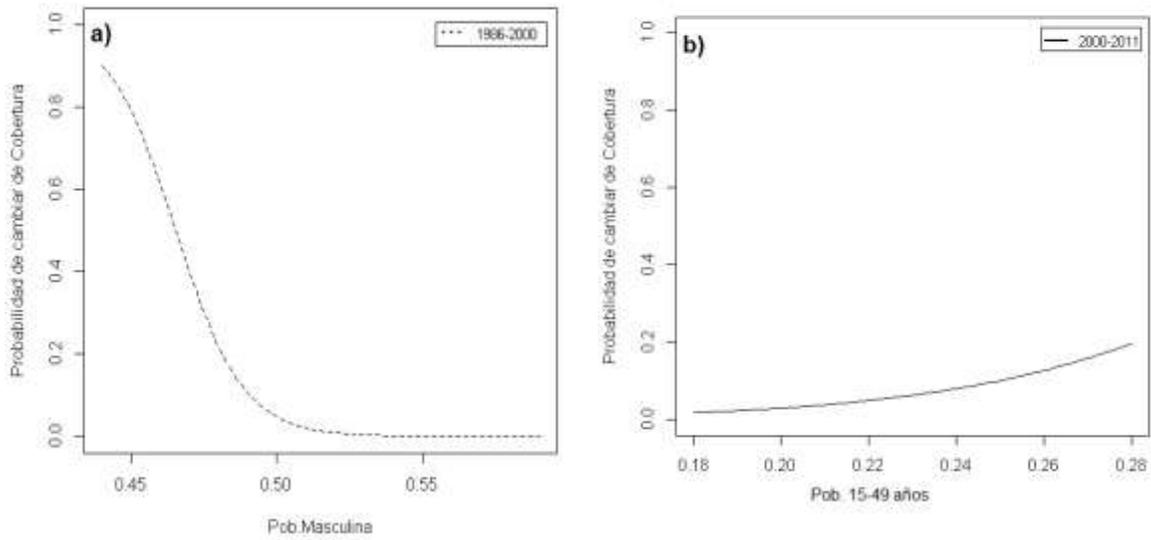


Figura 35. Relación logística entre las variables explicativas --a) población masculina; b) población de 15 a 49 años-- y la probabilidad de cambio de cobertura del bosque de pino-encino en los períodos 1986-2000 y 2000-2011.

A continuación se muestra un resumen de las variables ambientales y socioeconómicas que tendieron a relacionarse positiva o negativamente con el proceso de deforestación en los dos períodos analizados (Cuadro 13).

Cuadro 13. Resumen de las variables que se relacionaron con la pérdida de las coberturas forestales en los períodos 1986-2000 y 2000-2011. Códigos: - relación negativa sobre el cambio de cobertura; --: relación negativa fuerte sobre el cambio de cobertura;+: relación positiva sobre el proceso de cambio de cobertura; ++: relación positiva fuerte sobre el proceso de cambio de cobertura.

Indicador	Nombre de la variable	BTS		BE		BPE	
		1986-2000	2000-2011	1986-2000	2000-2011	1986-2000	2000-2011
Accesibilidad	Altitud	--	--	--			
	Pendiente	--	-	--	--		-
	Distancia a carreteras	-	--	--	--		-
	Distancia a localidades			--	-		-
	Distancia a ríos					--	
Demografía	Población	-	--	-	--		
Marginación	Población Analfabeta	++	+	-	--		--
	Población con servicio a la salud		-		--		--
	Proporción de viviendas con piso de tierra		++	--	-		++
	Población que habla indígena			+	+		
Economía	Población económicamente activa	-	++	--	--	+	+
Migración	Población masculina					--	
	Población de 15-49 años	--		-			++

En el cuadro 13 se puede observar que la accesibilidad fue un indicador importante para la deforestación de las coberturas bosque tropical seco, bosque de encino y bosque de pino-encino en los dos períodos analizados. Las bajas pendientes y la cercanía a carreteras fueron los factores que determinaron la pérdida de las tres coberturas analizadas; mientras que la cercanía a ríos fue un factor importante para la deforestación del bosque de pino-encino en el primer período. La marginación fue un factor importante para la pérdida de las coberturas bosque tropical seco y bosque de encino en ambos períodos. La población económicamente activa fue un factor que se asoció positivamente con la deforestación del bosque tropical seco en el segundo período y con la cobertura bosque de pino-encino en los dos períodos analizados; mientras que esta variable se relaciona de manera negativa con la cobertura bosque tropical seco en el primer período y el bosque de encino en los dos períodos analizados. La población de 15 a 59 años fue

un factor que se relacionó negativamente con la deforestación del bosque tropical seco y bosque de encino en el primer período y positivamente con la deforestación del bosque de pino-encino en el segundo período. La población masculina tendió a relacionarse negativamente con la deforestación del bosque de pino-encino en el primer período.

4.8. Modelación de los procesos de deforestación

4.8.1. Calibración del modelo

4.8.1.1. Determinación de los rangos para el cálculo de los pesos de evidencia

Durante el proceso de modelación se generó, para cada transición, el rango óptimo de valores de cada variable explicativa. Cada valor de rango corresponde a un punto de inflexión en el comportamiento de las variables. La Figura 36 muestra un ejemplo de los rangos de evidencia calculados para la transición bosque tropical seco a asentamientos humanos. Estos resultados fueron utilizados posteriormente como insumo de entrada para el cálculo de los pesos de evidencia.

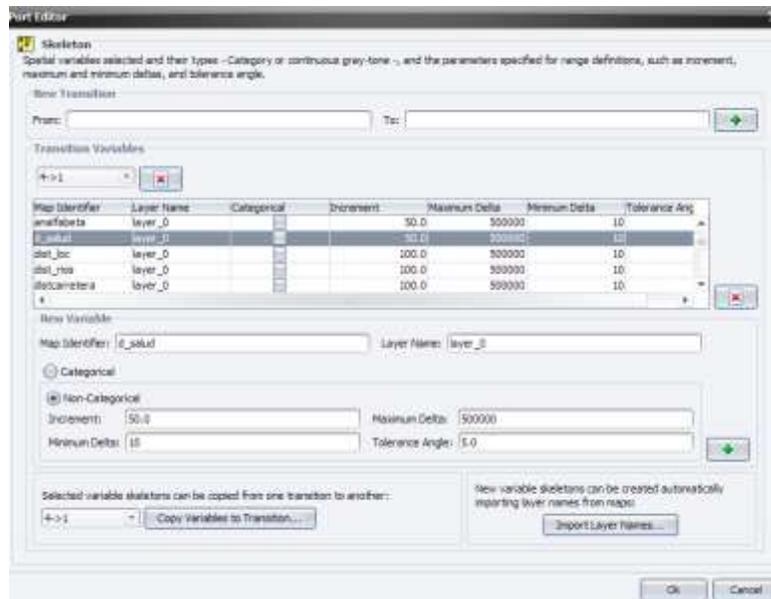
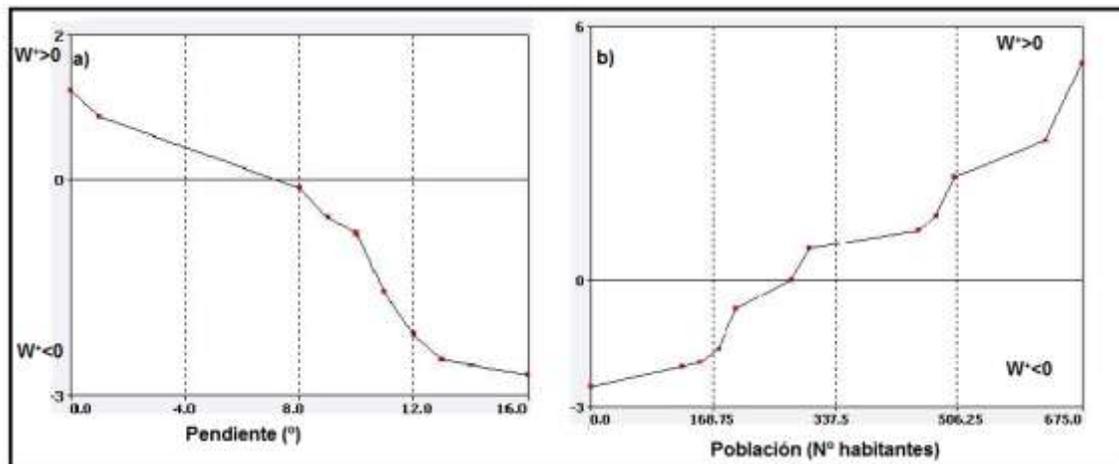


Figura 36. Ejemplo de cálculo de rangos de evidencia para la transición bosque tropical seco a asentamientos humanos en el período 1986-2000.

4.8.1.2. Pesos de evidencia

Los pesos de evidencia de cada rango correspondiente al análisis de las transiciones de las coberturas forestales bosque tropical seco, bosque de encino y bosque de pino-encino en el período de calibración (1986-2000) y en el período 2000-2011 se muestran en el Anexo 2. Los resultados arrojan los pesos de evidencia graficados y un archivo de texto que indica la transición y la “variable explicativa” con sus correspondientes pesos y rangos. En algunos casos, los pesos de evidencia fueron editados para corregir las puntuaciones que no fueron estadísticamente significativas. Los criterios para descartar las variables fueron básicamente por alta correlación con otras variables o efectos no significativos sobre el proceso de cambio de cobertura forestal. El Cuadro 14 muestra un resumen de las variables ambientales y socioeconómicas que se asocian a cada transición.



Peso de Evidencia

Significado de los pesos de evidencia

$W^* > 0$ La presencia del factor contribuye a la presencia de la transición

$W^* < 0$ La presencia del factor contribuye a la ausencia de la transición

Figura 37. Ejemplo de pesos de evidencia para la transición bosque tropical seco a asentamientos humanos en el período 1986-2000: a) pendiente; b) población total.

La Figura 37 muestra un ejemplo de los pesos de evidencias obtenidos para la transición bosque tropical seco a asentamientos humanos y su asociación con la variable pendiente y población total. Para el caso de la variable pendiente, se puede observar como las pendientes menores se asocian con pesos de evidencia mayores, es decir con mayores probabilidades de cambio. Con respecto a la variable socioeconómica “población total”, mayores valores se asociaron a mayores probabilidades de transición.

En las Figuras 38 y 39 se muestran algunos ejemplos de las variables que fueron modificadas o descartadas en el proceso de modelación.

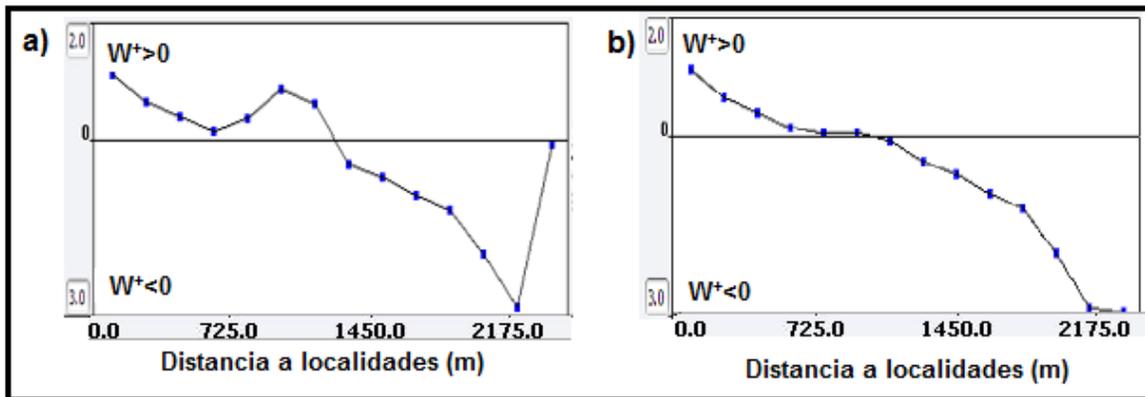
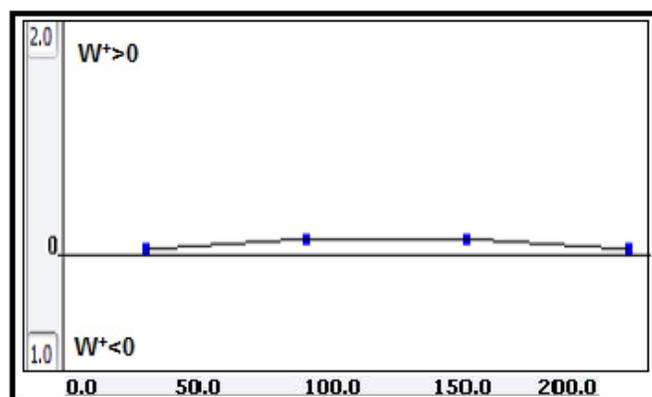


Figura 38. Ejemplo de modificación del peso de evidencia para la transición bosque tropical seco a agricultura de temporal (período 1986-2000): a) muestra el primer resultado del cálculo del peso de evidencia; b) muestra la misma variable con modificación ya que el último peso no tenía significancia estadística.



**Población que habla lengua indígena
(Nº habitantes)**

Figura 39. El gráfico muestra el resultado del cálculo del peso de evidencia para la transición BTS a pastizal inducido correspondiente a la variable “población de 5 años o más que habla alguna lengua indígena”; esta variable no tiene ninguna influencia en la transición, por lo tanto fue descartada.

Cuadro 14. Resumen de corrección de pesos de evidencia para el período 1986-2000.

Transición	Bosque Tropical Seco			Bosque de Encino			Bosque de Pino-Encino	
	A.Humanos	Pastizal Inducido	A.Temporal	A.Humanos	Pastizal Inducido	A.Temporal	A.Humanos	Pastizal Inducido
Pendiente	✓	↖	✓	✓	↖	✓	✓	✓
Altitud	↖	✓	✓		✓			
Tipo de Suelo								
altitud					✓			✓
Distancia a carreteras	↖	↖		✓	✓			
Distancia a localidades	✓	✓	✓	✓	↖		✓	
Población total	✓				↖			
Población analfabeta	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
Población con servicio a la salud	✓	✓						
Proporción de viviendas con piso de tierra		✓		✓	✓	✓		
Población económicamente activa	↖	✓	✓		↖	✓	↖	
Población masculina					✓		✓	
Población de 15 a 49 años		↖			✓	↖		
Peso de evidencia considerado	✓				↖			

Peso de evidencia modificado:

De acuerdo a los análisis de los Modelos Lineales Generalizados (MLG) y los pesos de evidencia, los resultados mostraron congruencia en la mayoría de las variables ambientales y socioeconómicas encontradas por ambos análisis. Las variables que no tuvieron congruencia, en ambos análisis, se muestran a continuación:

1) En la cobertura bosque tropical seco (BTS), en ambos períodos, la cercanía a localidades fue un factor importante que se asoció al proceso de deforestación de acuerdo con los pesos de evidencia. En los resultados de los MLG, en ambos períodos, esta variable presentó correlación con las demás variables ambientales por lo que fue descartada del modelo.

2) En la cobertura bosque de encino (BE), para los resultados de pesos de evidencia la cercanía a ríos fue un factor importante que se asoció a la transición a pastizales inducidos en el período 1986-2000. De acuerdo con los resultados de los MLG esta variable no fue estadísticamente significativa. En relación a las variables socioeconómicas en los resultados de los MLG la variable población que habla lengua indígena, en ambos períodos, presentó una baja asociación con la deforestación. De acuerdo con los resultados de pesos de evidencia, esta variable no presentó ninguna relación con la deforestación en ambos períodos. En el período 2000-2011, de acuerdo con los resultados de pesos de evidencia, las variables que se asociaron negativamente con la pérdida de bosque de encino fueron la población masculina para la transición agricultura de temporal y la población de 15-49 años en la transición a pastizal inducido; estas variables no presentaron ninguna asociación con la deforestación en el análisis de los MLG.

3) En el bosque de pino-encino (BPE), de acuerdo con los resultados de pesos de evidencia, en el período 1986-2000, la pendiente se asoció a la pérdida de bosque en la transición a asentamientos humanos y la distancia a localidades en la transición a pastizal inducido. En el período 2000-2011 la distancia a ríos fue otra variable que se asoció con la transición a agricultura de temporal; estas variables no presentaron asociación significativa en los análisis de los MLG.

Para las demás variables socioeconómicas, en ambos períodos, los resultados de MLG y pesos de evidencia tuvieron la misma relación.

4.8.1.3. Elaboración de un mapa de probabilidad de deforestación

Con base en los pesos de evidencia editados, el modelo puede calcular la probabilidad de ocurrencia de las transiciones bajo la influencia de las variables ambientales y socioeconómicas que se asociaron con los cambios de cobertura. De esta manera, el modelo puede identificar las áreas más probables a cambiar de cobertura.

Los mapas de probabilidad de cambio se muestran en las Figuras 40, 41, 42, 43,44, 45, 46, 47 y 48. Las áreas más propensas al cambio se encuentran en tonalidades de rojo, y las menos propensas al cambio se encuentran en tonalidades entre amarillo a verde.

En las tres coberturas forestales fue posible identificar que las áreas más probables a cambiar de cobertura se localizan en sitios donde las condiciones de accesibilidad son favorables; estas áreas, generalmente, se caracterizan por sus bajas pendientes y por distancias cortas a centros urbanos y ríos.

En la cobertura bosque tropical seco fue posible notar que para las transiciones a agricultura de temporal y pastizales inducidos, las probabilidades de cambio más altas se encuentran en la porción sureste y suroeste de la cuenca, mientras que las probabilidades de cambio más altas para la transición asentamientos humanos se localizan principalmente en la porción centro-sur de la cuenca (Figuras 40, 41 y 42).

En la cobertura bosque de encino se observó que para las transiciones a asentamientos humanos y pastizales inducidos, las probabilidades de cambio más altas se encuentran en la porción noreste de la cuenca, mientras que para la transición agricultura de temporal, se presentan en la porción sureste de la cuenca (Figuras 43, 44 y 45).

En la cobertura bosque de pino-encino fue posible identificar que para la transición a asentamientos humanos las probabilidades de cambio más altas se localizan en la parte noroeste y noreste de la cuenca. En cambio, para la transición a pastizal inducido las transiciones se localizan en el centro de la porción norte de la cuenca (Figuras 46 y 47).

4.8.1.4. Evaluación del modelo probabilístico

La evaluación de los modelos probabilísticos a través del estadístico de Característica de Operación Relativa (ROC) muestra que los resultados se encuentran dentro del rango de aceptabilidad en todas las transiciones analizadas (Figura 48). En las gráficas se muestra la relación entre las asertivas (predicciones correctas) y falsas alarmas (predicciones incorrectas). En la cobertura bosque tropical seco las transiciones mejor predichas fueron hacia las categorías asentamientos humanos (0.91), seguida de la agricultura de temporal (0.75) y pastizales inducidos (0.69). En la cobertura bosque de encino las transiciones mejor predichas fueron hacia los asentamientos humanos (0.92), seguida por la agricultura de temporal (0.71) y los pastizales inducidos (0.65). Mientras tanto, en la cobertura bosque de pino-encino, las transiciones mejor predichas fueron hacia las categorías asentamientos humanos (0.85) y pastizales inducidos (0.61).

En general, se puede decir que para todas las coberturas forestales la transición mejor predicha fue hacia la categoría asentamientos humanos y las predicciones fueron hacia la categoría pastizales inducidos.

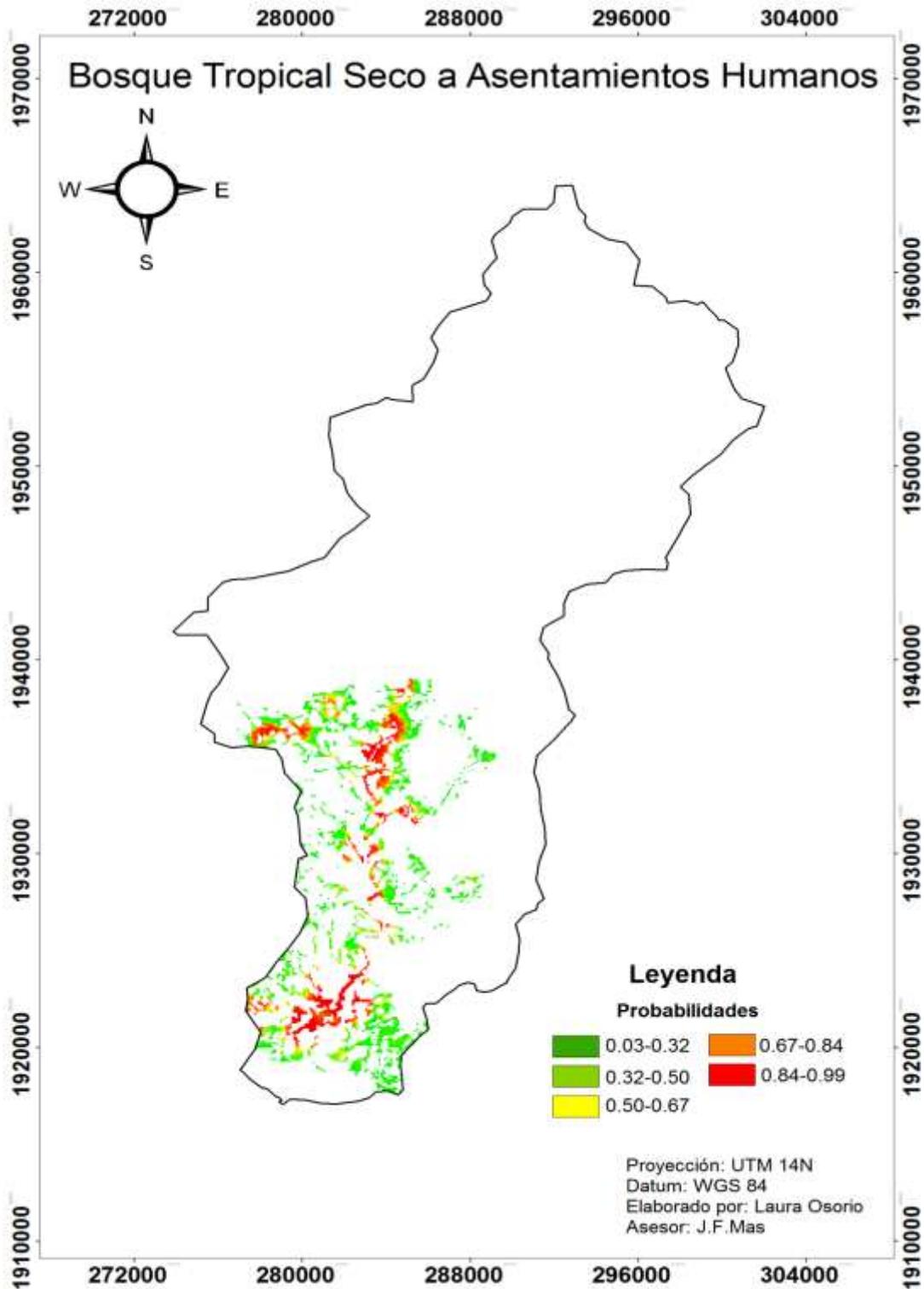


Figura 40. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque tropical seco a asentamientos humanos.

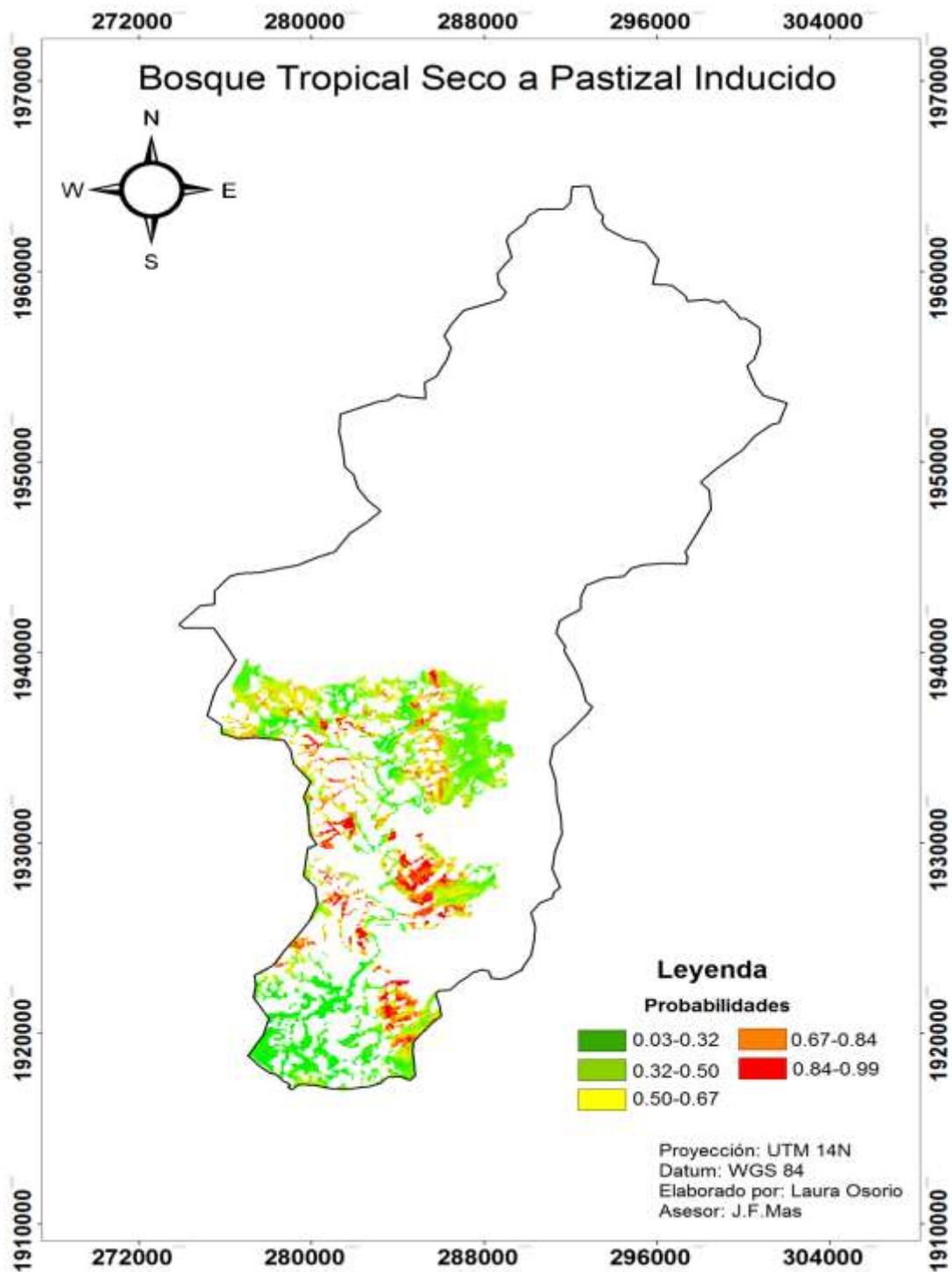


Figura 41. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque tropical seco al pastizal inducido.

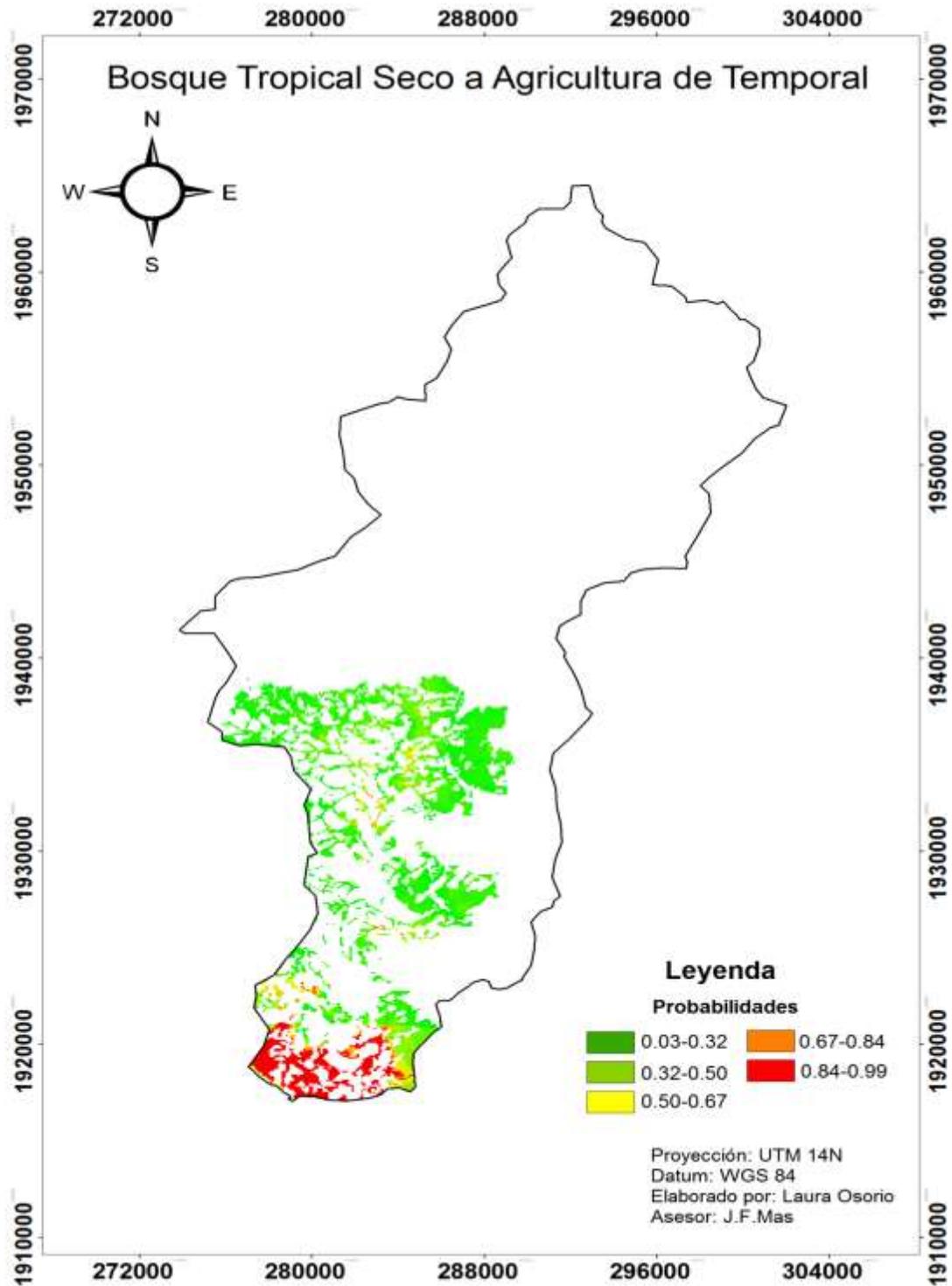


Figura 42. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque tropical seco a agricultura de temporal.

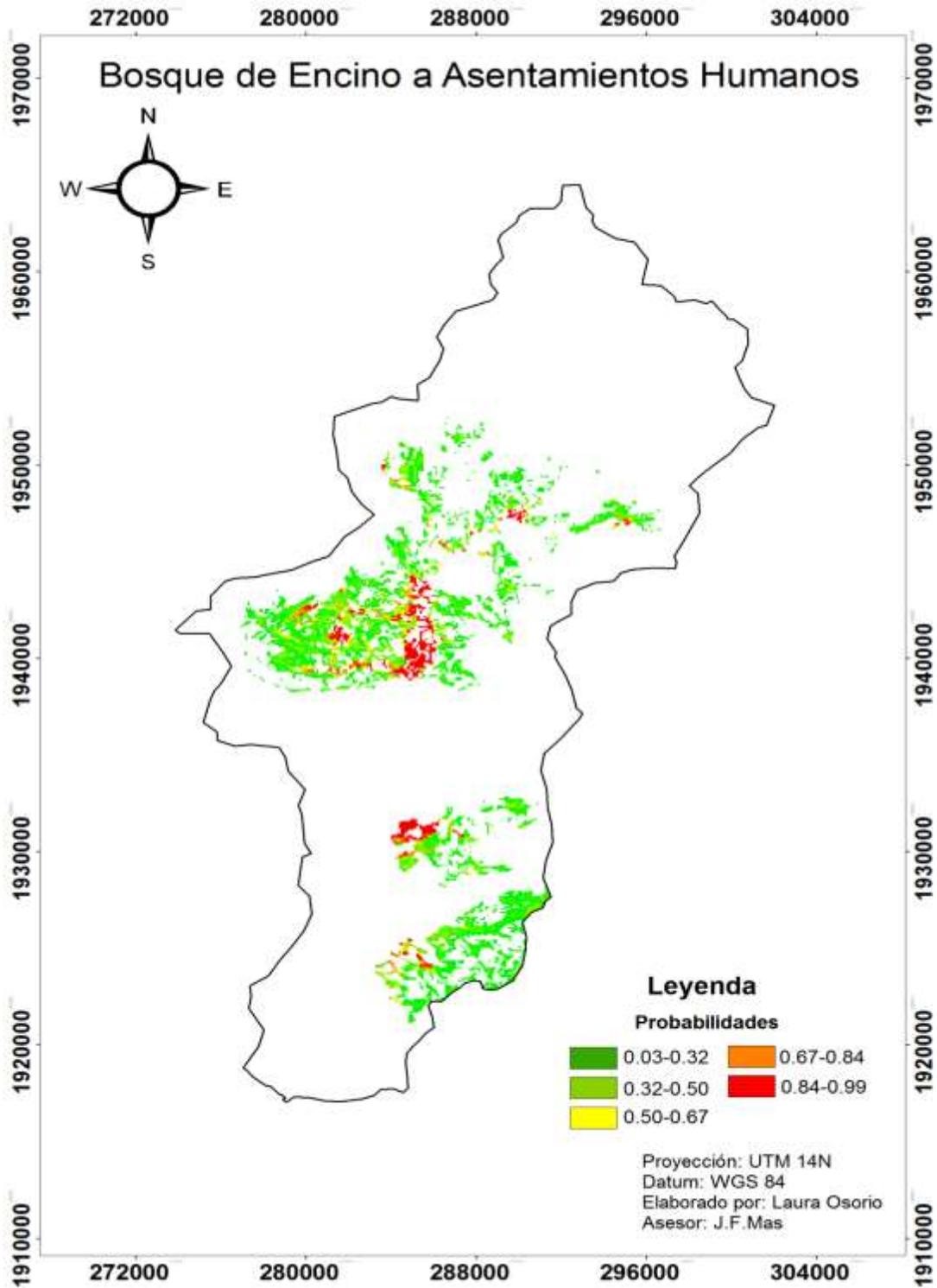


Figura 43. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de encino a asentamientos humanos.

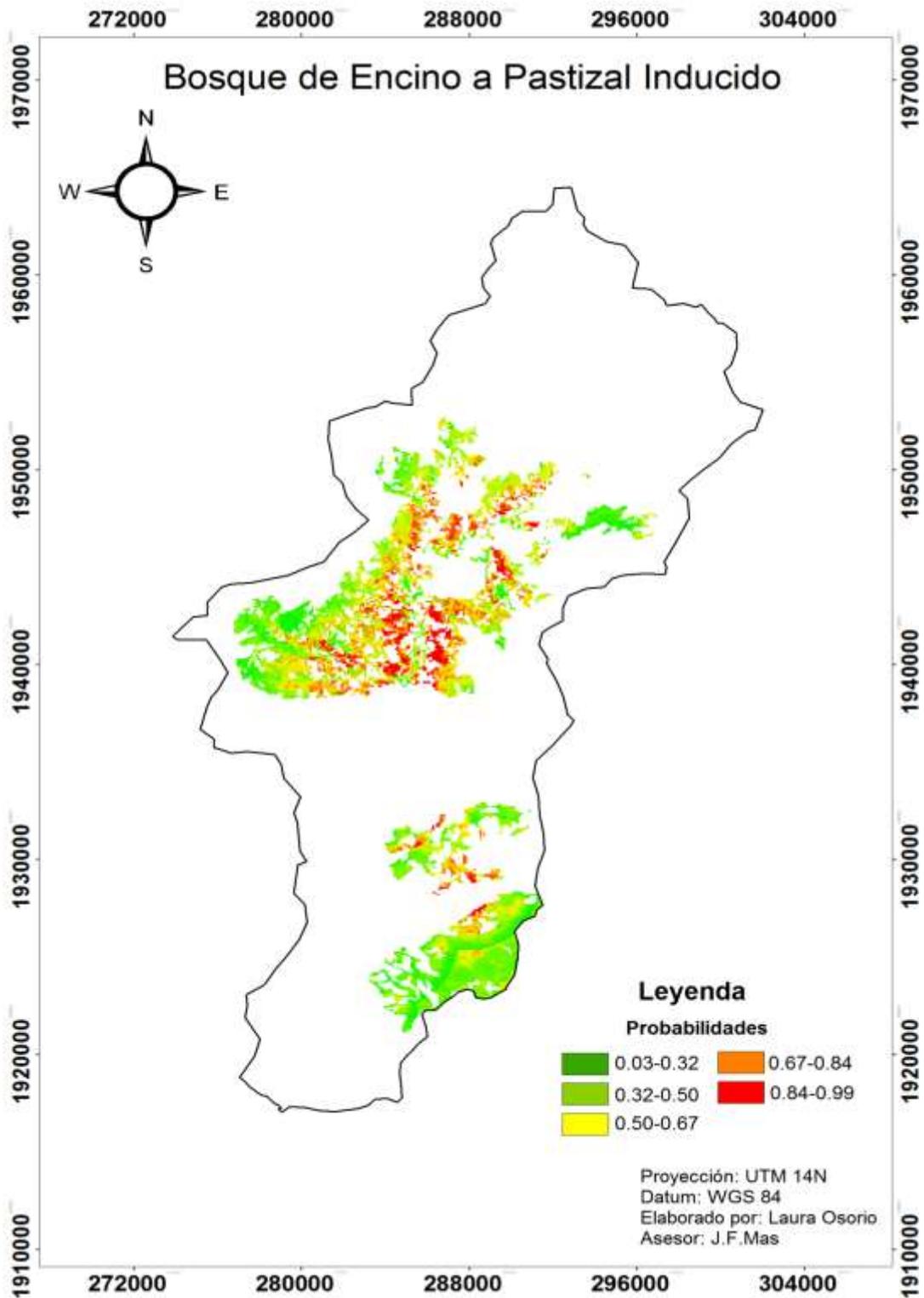


Figura 44. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de encino al pastizal inducido.

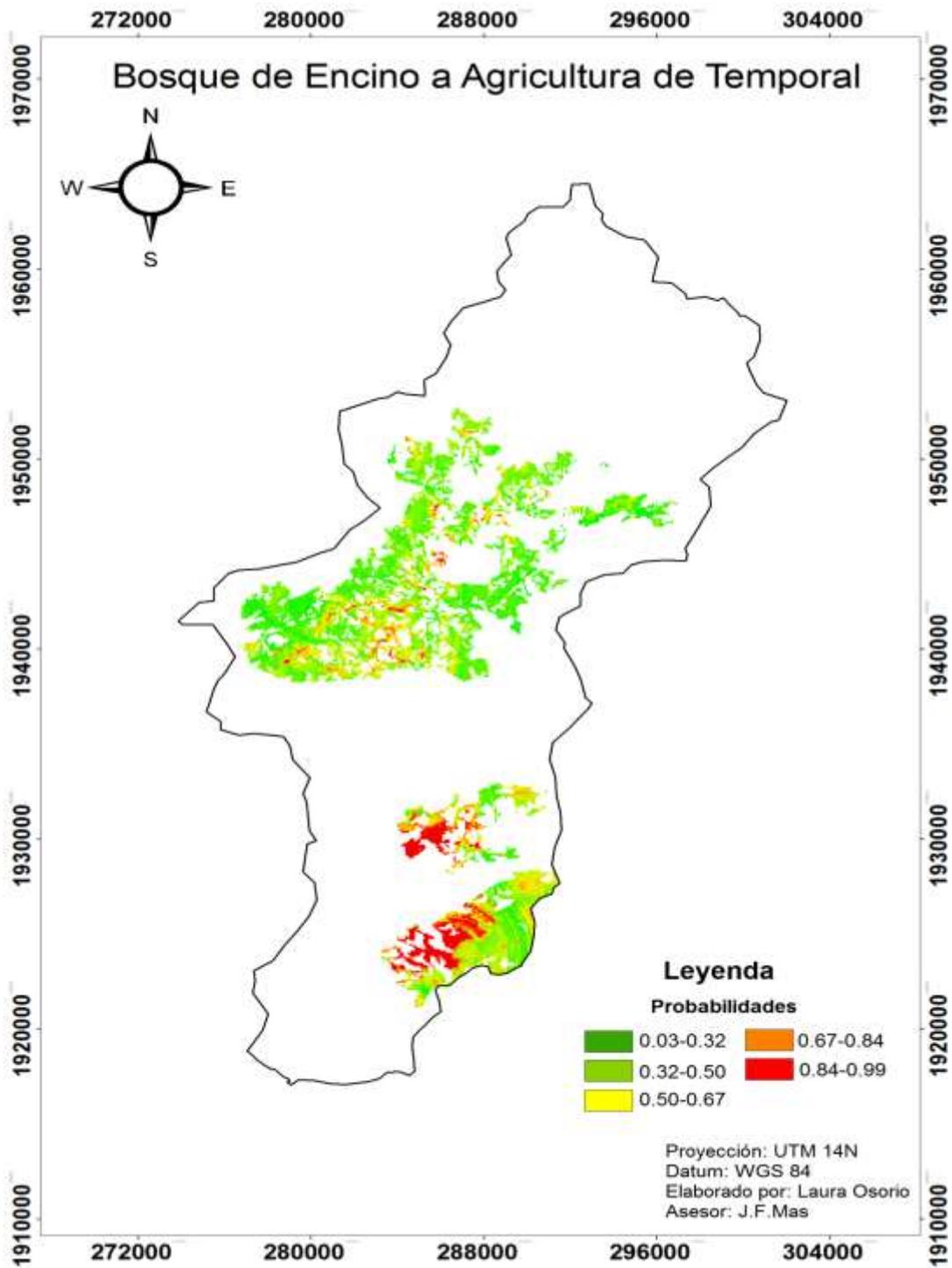


Figura 45. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de encino a agricultura de temporal.

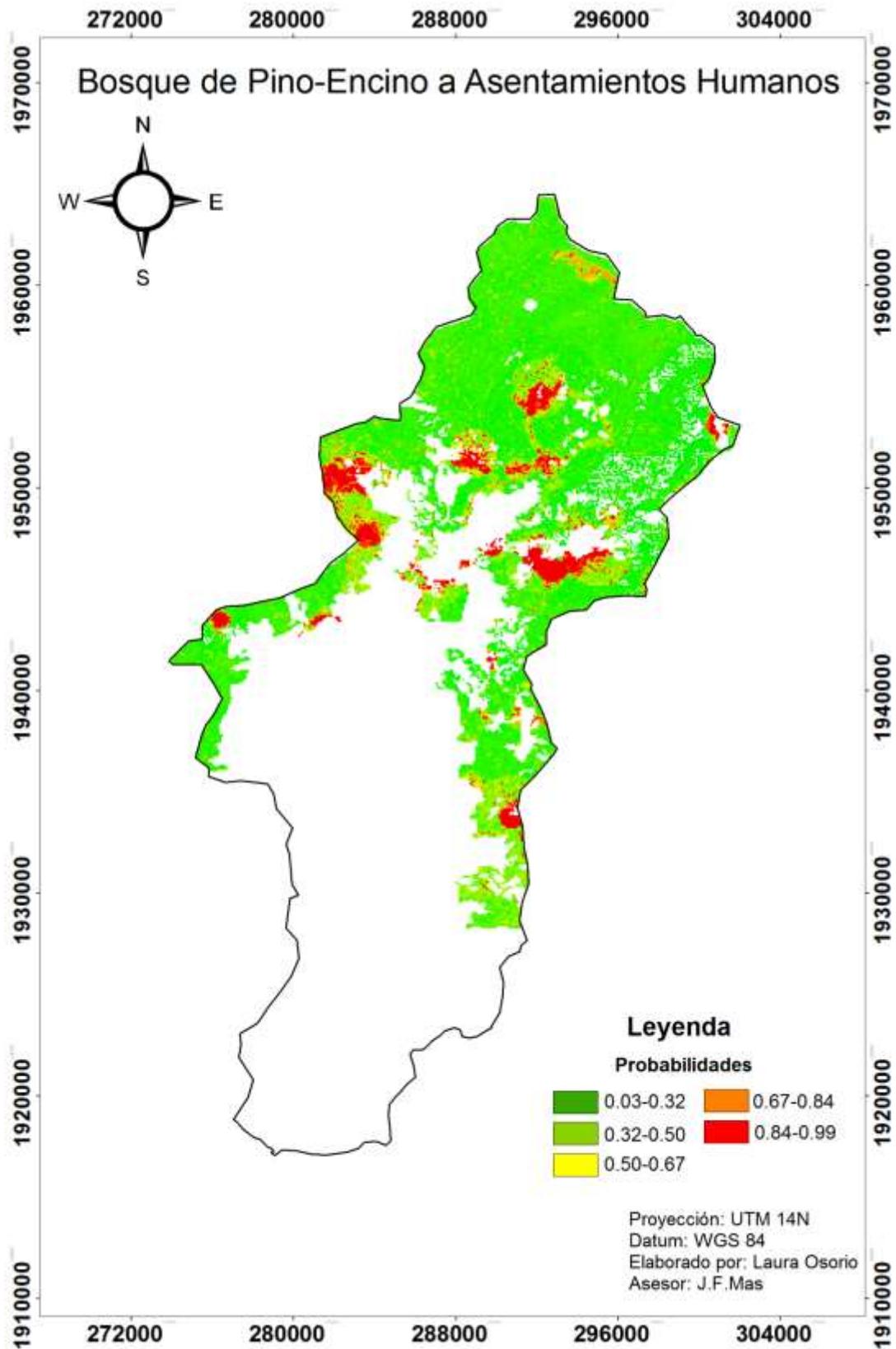


Figura 46. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de pino-encino a asentamientos humanos.

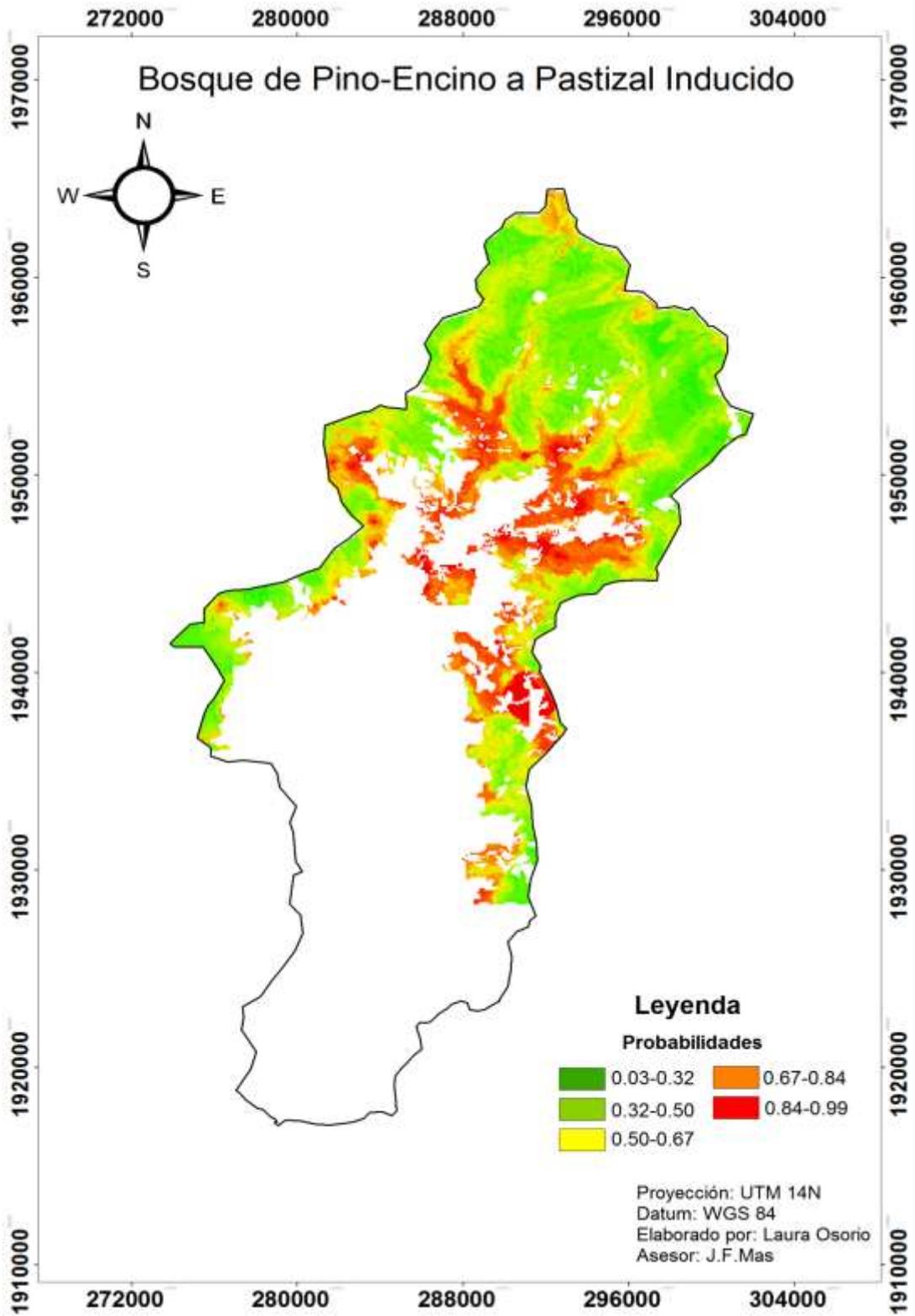
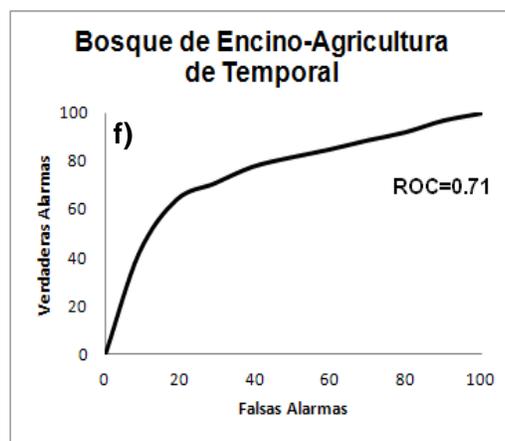
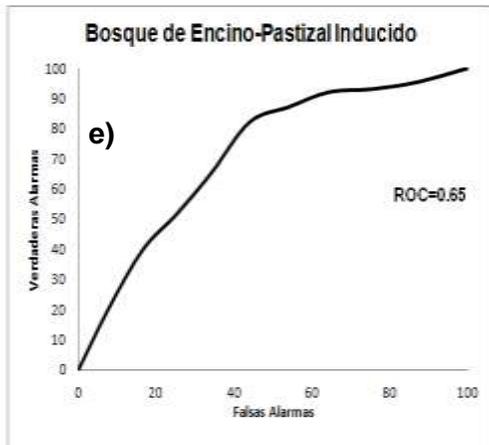
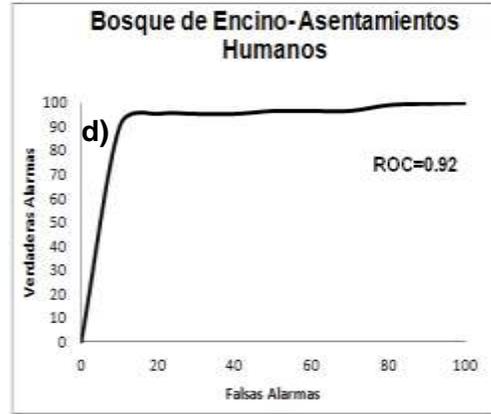
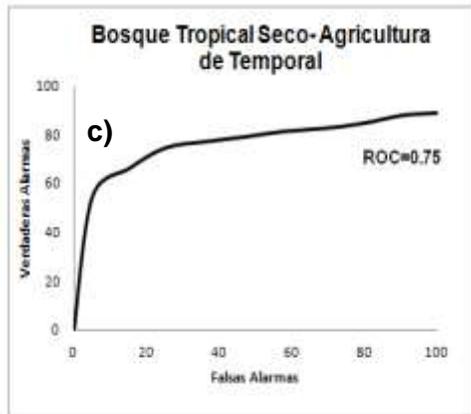
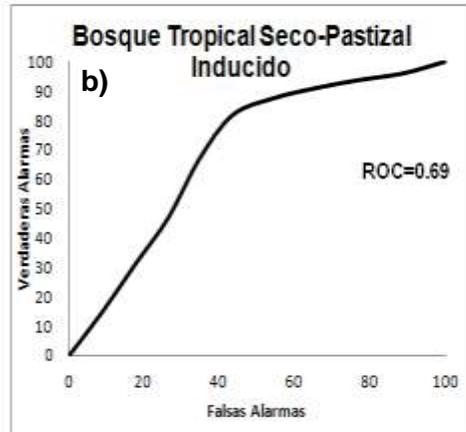
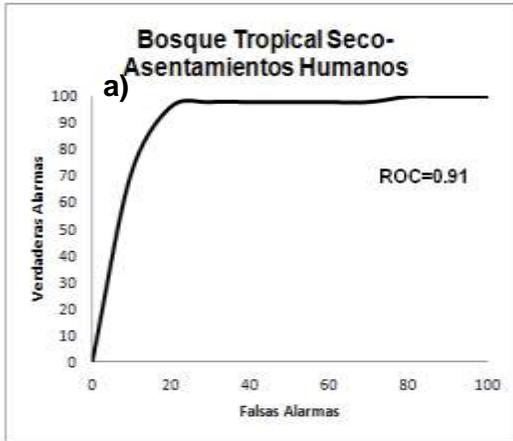


Figura 47. Mapa de probabilidad de cambio de la transición bosque de pino-encino a pastizal inducido.



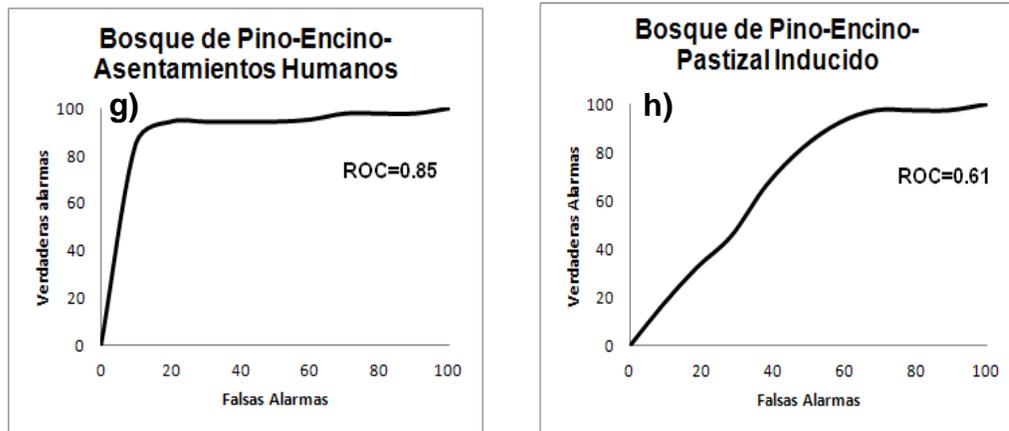


Figura 48. Resultados de la evaluación del estadístico ROC para las distintas coberturas forestales. La curva une vértices que indican la tasa de falsas alarmas vs la tasa de aciertos como superficie potencial de transición: a) bosque tropical seco a asentamientos humanos; b) bosque tropical seco a pastizal inducido c) bosque tropical seco a agricultura de temporal; d) bosque de encino a asentamientos humanos; e) bosque de encino a pastizal inducido; f) bosque de encino a agricultura de temporal; g) bosque de pino-encino a asentamientos humanos; y h) bosque de pino-encino a pastizal inducido.

5. Discusión

5.1. Fiabilidad de las distintas clasificaciones de cobertura/usos de suelo

La evaluación de la fiabilidad se basa en la comparación de la información del mapa e información muy confiable para un número limitado de sitios de verificación. En la evaluación de la fiabilidad de los mapas de coberturas/usos del suelo un problema crucial es la conciliación de los requisitos estadísticos (idealmente un gran número de sitios de verificación, seleccionados de manera aleatoria) y consideraciones más prácticas (reducción del número de sitios de verificación para reducir costos, dificultad para obtener información en áreas remotas, etc.), así como la dificultad para obtener información de referencia totalmente confiable. Stehman y Czaplewski (1998) distinguen dos etapas críticas para evaluar la fiabilidad: el diseño estadístico y la obtención de la información de los sitios de verificación.

En el diseño estadístico, el tamaño y el diseño de la muestra son consideraciones que se deben tener en cuenta cuando se evalúa la fiabilidad de los mapas de coberturas/usos del suelo. La selección adecuada del tamaño y diseño de la muestra es fundamental para generar una matriz de confusión representativa en las imágenes clasificadas (Merchant et al., 1994). En este sentido, Conglaton (1991) sugiere muestrear 50 sitios por categoría, y de 75 a 100 si el área de estudio es superior a 400,000 ha o si hay más de 12 categorías. Para la cuenca del río Coyuquilla, un total de 255 puntos con un mínimo de 50 sitios por categoría a través de un muestreo estratificado fueron generados para evaluar la fiabilidad de las distintas clasificaciones de coberturas/usos del suelo. El tipo de muestreo empleado (muestro probabilístico aleatorio estratificado) se considera apropiado para la zona de estudio ya que cada estrato, que corresponde a cada una de las categorías en el mapa, cubriendo un área pequeña o grande, presenta una probabilidad mayor a cero de ser muestreada (Mas et al., 2003).

En la obtención de la información de los sitios de verificación, las visitas de campo, serían lo ideal, sin embargo por cuestiones de costo y tiempo se recurre a menudo al uso de imágenes de muy alta resolución. No obstante, el

supuesto de todos los análisis es que la fotointerpretación es 100% correcta (Congalton, 1991), lo que no resulta cierto cuando la clase correspondiente a los sitios de verificación se determina con base en el análisis de fotografías aéreas (Biging et al., 1994; Congalton, 1991). Una correcta evaluación de fiabilidad requiere que la información usada como referencia sea precisa (Giles, 2004). Congleton y Green (1993) reportan que en el ejercicio de la evaluación de un mapa de bosques con base en la interpretación de fotografías aéreas, en 41% de los sitios de verificación, la fotointerpretación proporcionó una clase distinta según el foto-intérprete. Por lo tanto, en la evaluación de la fiabilidad es necesario considerar los diferentes factores que se asocian a la precisión de los resultados (Conglato, 1991).

Con base en los resultados de la evaluación de la fiabilidad, es necesario considerar los diferentes aspectos que se asociaron a la precisión de las distintas clasificaciones de coberturas/usos del suelo generadas en el estudio. La información usada como referencia y el esquema de clasificación son algunos de los factores que se pueden asociar a la fiabilidad de los resultados (Congalton, 1991). En la cuenca del río Coyuquilla se eligió como información de referencia imágenes de alta resolución tomadas del portal *Google Earth*, puesto que estas imágenes son información de elevada calidad (Umer et al., 2007). Las fechas tomadas como referencia presentaron cercanía temporal con los años clasificados, lo que permitió evaluar su fiabilidad. Otro aspecto que cabe mencionar es que todas las imágenes satelitales seleccionadas para el análisis fueron de la época de secas. Las imágenes de la estación secas son preferibles debido a que son menos afectadas por la presencia de nubes y la humedad (Kidane et al., 2012).

Es importante, en la evaluación de la fiabilidad, adquirir un sistema de clasificación de coberturas/usos del suelo para reducir el riesgo de cometer errores de fiabilidad. El sistema de clasificación depende de los objetivos del proyecto (Congalton, 1991). En este estudio, el esquema de clasificación se basó en el sistema clasificatorio del IFN realizado con base al reagrupamiento de las categorías de los mapas de coberturas/usos de suelo de INEGI (Mas et al., 2004). Se ha reportado que un sistema de clasificación con pocas categorías reduce

errores de clasificación derivadas de la interpretación de imágenes Landsat MSS (Ellis et al., 2010).

Los resultados de la fiabilidad de las distintas clasificaciones, en la zona, se encontraron dentro del rango de aceptabilidad usado en diversos estudios que emplean criterios espectrales y visuales para la interpretación de imágenes satelitales (Díaz-Gallegos et al., 2010). Los mapas de coberturas/ usos de suelo mejores interpretados correspondieron a la imagen SPOT 2011 (75.5% de fiabilidad global) seguido de la imagen Landsat ETM+ (73.0%) y, por último, la imagen Landsat MSS (71.7%). La clasificación de 1986 fue la que presentó menor fiabilidad global en comparación con las demás clasificaciones; esta reducción de la fiabilidad se debe a los píxeles mixtos de la imagen Landsat MSS (Haack, 1982) y a la baja resolución espacial (80m) con respecto a las demás imágenes Landsat ETM+ (30m) y SPOT (10m), lo que provoca confusión entre las diferentes categorías (Yang y Lo, 2002). Los resultados encontrados son similares a los encontrados por Dewan et al. (2008) quienes obtuvieron una menor precisión global en los mapas de coberturas/ usos del suelo derivados de la imagen Landsat MSS debido a las razones antes mencionadas.

5.2. Tasas de deforestación y matrices de cambio

El tema de la deforestación ha recibido mucha atención en los estudios de cambio de cobertura y uso de suelo debido a la alta tasa de cambio forestal y a la importancia ecológica de los bosques (Lambin et al., 2001; Ojima et al., 1994).

En la cuenca del río Coyuquilla se ha reportado una pérdida de cobertura forestal de 18% en el período 1979-2000 (Duran et al., 2011). En el presente estudio reportamos una pérdida de 16% durante el período 1986-2000 y una pérdida del 22% en el período 2000-2011 con una tasa anual de cambio de -1.3% y -2.4% respectivamente. De acuerdo con las estadísticas de cambio, en el período 1986-2000, las mayores tasas anuales se dieron en el bosque tropical seco (-3.71%), seguido del bosque de encino (-1.36%) y, por último, el bosque de pino-encino (-0.27%). En el período 2000-2011, se registró un aumento en las tasas anuales en la cobertura bosque de encino (-5.54%), seguido del bosque tropical seco (-4.53%) y el bosque de pino-encino (-0.98%). La tasa anual de pérdida del bosque tropical seco, en la zona de estudio, fue mayor que la reportada para Oaxaca, en el Pacífico Sur, en el período 1985-1995 (-1.2%) (Corona, 2008), superiores a las reportadas en los Álamos, Sonora en el período 1992-2000 (-1.7%; Luna, 2009), para Michoacán, en el centro occidente del Pacífico, durante el período 1975-1993 (-1%; Bocco et al., 2001), para la reportada en Morelos en el período 1973-1989 (-1.45%; Trejo y Dirzo, 2000), y para la Reserva de la Biosfera de Sierra de Manantlán, Jalisco en el período 1971-2000 (-0.3%; Farfán, 2008), pero más bajas que las reportadas en Jalisco en el centro-occidente Pacífico (-3.8%) (De Ita et al., 1991). Para la cobertura bosque de encino, en la zona de estudio, la tasa anual de pérdida fue más alta que la reportada en la Reserva de la Biosfera de Sierra de Manantlán, Jalisco en el período 1971-2000 (-0.4%). Por el contrario, en la cobertura bosque de pino-encino, la tasa de deforestación fue mayor en la Reserva de la Biosfera de Sierra de Manantlán (-0.1 %) que las encontradas en este estudio.

En relación a los usos del suelo, en el primer período, las mayores tasas anuales se dieron para la agricultura de temporal (12%), seguida por los pastizales inducidos (5.3%) y los asentamientos humanos (3.9%); sin embargo, en el

segundo período, se encontró una disminución significativa en la tasa anual de cambio de la categoría agricultura de temporal (1.45%) y un aumento en la tasa anual hacia los pastizales inducidos (5.45%) y los asentamientos humanos (6.13%). Una de las razones del aumento de las áreas destinadas a pastizal inducido fue que, en el período 1992-2000 y 2000-2010, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) a través del Programa de Producción Pecuaria Sustentable y Ordenamiento Ganadero y Apícola (PROGAN) otorgó en la región una concesión aproximada de \$8'467,608 y \$21'151,162 de pesos en el primer y segundo período respectivamente, lo que provocó la transformación hacia pastizales inducidos. Esto sustenta los resultados encontrados en el período 2000-2011, donde se encontraron mayores tasas de pérdida de cobertura forestal debido a la expansión ganadera. Además, los resultados coinciden con el estudio de Duran et al. (2010), quienes sostienen que la principal actividad que se relaciona con la pérdida de cobertura forestal ha sido la expansión ganadera, la cual se vincula a las políticas de repartición de tierras para actividades ganaderas que se otorgaron desde la fundación de algunas comunidades de la cuenca. Al respecto, los autores mencionan que la expansión ganadera presentó un incremento de 28 a 45% en un período de 21 años (1979-2000). De acuerdo a lo anterior, la ganderización actuó como factor de la deforestación en la cuenca, lo cual coincide con lo reportado por Durand y Lazos (2004), quienes mencionan que la cría de ganado es un factor que comúnmente se asocia con la deforestación en México. En este contexto, en la cuenca, la expansión de pastizales inducidos fue la transición más fuerte que afectó a la pérdida de las coberturas forestales en los dos periodos analizados. En el primer período, la cobertura bosque tropical seco fue la más afectada por esta actividad, un 32% fue transformado a pastizales inducidos; mientras que en el segundo período, la cobertura más transformada fue el Bosque de Encino, el 50% de su vegetación derivó a pastizales inducidos.

La actividad agrícola fue un factor importante en la dinámica de deforestación en la cuenca, sin embargo su impacto fue mayor en la cobertura bosque tropical seco, siendo el primer período donde se registraron mayores tasas anuales. Una

de las razones por las que se afecta más a esta cobertura se debe a la relativa facilidad con la que se puede desmontar el bosque tropical seco (dominado por árboles de baja estatura y diámetros pequeños), lo cual, aunado al poco reconocimiento que se tienen a sus especies útiles, así como a la marcada estacionalidad climática, lo hace más vulnerable a que, en época de secas, actividades como la roza, tumba y quema puedan reducir su cobertura hacia otros usos del suelo (Maass,1995).

Otro aspecto que cabe mencionar, es que durante el proceso de CCUS en la zona de estudio, se obtuvo un importante reemplazo de la categoría agricultura de temporal por los pastizales inducidos, en el primer período el 21% de la agricultura de temporal se transformó a pastizal inducido mientras que en el segundo período, el 47% fue convertida a pastizales inducidos. Una de las razones a su reemplazo se debe a los subsidios otorgados por PROGAN, los cuales tuvieron una mayor inversión en el período 2000-2010. Estos resultados concuerdan con los reportados por Corona (2008) donde reporta importantes reemplazos de agricultura por actividades relacionadas con la ganadería debido a que estas actividades fueron dependientes de los costos de producción, por lo que cuando los costos de agricultura aumentaron, los campesinos optaban por desarrollar actividades relacionadas con la ganadería, los cuales generaban bajos costos y altas ganancias. Esta relación además fue encontrada por lo reportado por Tudela (1992); Bonet et al. (2007) y por Wassenaar et al. (2007), quienes reportan que estos reemplazos se deben a los costos de oportunidad y las fluctuaciones en el mercado.

Frente a este panorama, los resultados mostrados sugieren que los procesos de cambio de cobertura y usos del suelo son dinámicos y complejos, debido a la intrincada interacción de factores biofísicos y socioeconómicos. Entender estas relaciones es crucial para el correcto entendimiento de la dinámica de los procesos de deforestación en las distintas regiones del país.

5.3. Variables ambientales y socioeconómicas que se asocian a la deforestación

En la actualidad se ha reconocido la necesidad de entender los factores que se asocian a los procesos de deforestación debido a las implicaciones ambientales que se generan, tales como el calentamiento global, la pérdida de biodiversidad, la degradación de suelos, la hidrología de cuencas e incluso sobre el bienestar humano (Lambin et al., 2001; Geist y Lambin 2001, 2002).

La explicación de los conductores de cambio requiere de marcos conceptuales que integren las interacciones de los procesos sociales y ambientales abordando eficazmente las cuestiones de escala (Campbell et al., 2005). Los factores ambientales (biofísicos) condicionan el uso del suelo, e incluyen propiedades del paisaje tales como el tipo de suelo, la pendiente, la altitud, la hidrología, el clima, así como la flora y fauna presente en una zona de estudio (Yu et al., 2011). Estos factores constituyen generalmente el contexto en el que el uso del suelo tiene lugar, en el sentido de las condiciones iniciales o de predisposición de los cambios de cobertura y uso del suelo (Lambin et al., 2000). Por su parte, los factores socioeconómicos juegan un papel decisivo directo en el cambio de cobertura forestal (Wu y Hobbs, 2002; Serra et al., 2008; Geist y Lambin, 2001), e incluyen información demográfica, social, económica, institucional y niveles de educación (Geist y Lambin, 2002; Yu et al., 2011). Sin embargo, el análisis de estos factores está limitado por la falta de datos espaciales explícitos y por las dificultades metodológicas en la integración de los datos sociales con los ambientales (Veldkamp y Lambin, 2001).

La cuenca del río Coyuquilla ha perdido el 37% de su cobertura forestal durante un período de 25 años (1986-2011). El estudio realizado por Duran et al. (2010) plantea que esa variación ha sido producto de la violencia desarrollada en la región y fallas en la gobernanza forestal. En este sentido, en el presente estudio identificamos las relaciones entre los factores ambientales y socioeconómicos y la deforestación del bosque tropical seco, bosque de encino y bosque de pino-encino. La asociación de estas variables con la deforestación varió para cada

cobertura forestal y en cada período analizado. La accesibilidad fue un indicador ambiental que permitió entender la relación entre las variables ambientales y la deforestación de las distintas coberturas forestales. La accesibilidad se ha reconocido como un factor importante en la pérdida de bosques (Dalle et al., 2005; Maeda et al., 2010; Schirpke et al., 2012), y está dada por un índice que representa la distancia a cualquiera de los senderos o caminos, importante para el acceso a los mercados (Vergurg y Veldkamp, 2004). Al respecto, Serneels y Lambin (2001) explican que la accesibilidad representada por la proximidad a los cuerpos de agua, la ubicación cercana de mercados, carreteras y la cercanía a pueblos han sido algunos de los factores relacionados con la pérdida forestal. En general, se puede decir que la pendiente, la distancia a localidades y la distancia a carreteras fueron las variables ambientales que se asociaron mayormente, en ambos períodos, a la pérdida de coberturas del bosque tropical seco y el bosque de encino. Adicionalmente, la pendiente y la distancia a las localidades se asociaron a la pérdida de bosque de pino-encino en ambos períodos. Otra de las variables que se asociaron con la transición de bosque de encino a pastizal inducido, en el período 1986-2000, fue la cercanía a ríos, siendo un factor importante para las actividades agropecuarias. La asociación de las variables pendiente (Nagendra y Tucker, 2003; Corona, 2008; Crk et al., 2009), cercanía a carreteras y centros urbanos (Gellrich y Zimmermann, 2006; Corona, 2008; Ellis et al., 2010) y cercanía a ríos (Fashu et al., 2007; Changhong et al., 2011) han sido reportados como los principales factores que se relacionan con la pérdida de cobertura forestal.

Respecto a las variables socioeconómicas, indicadores tales como la demografía (población total), la migración (proporción de población de 15-49 años y proporción de población masculina) y de la marginación (proporción de población analfabeta, proporción de viviendas habitadas con piso de tierra, de población con acceso a servicios de salud y proporción de población económicamente activa) contribuyeron a explicar el proceso de deforestación en la zona de estudio.

La relación entre la población y la deforestación, en muchos casos, no es la principal causa de deforestación (Lambin et al., 2001). Sin embargo, se ha

reportado que la asociación de esta variable tiene un efecto mayor en escalas regionales (Pineda et al., 2010). Esta variable se asoció positivamente con la deforestación del bosque tropical seco y el bosque de encino en ambos períodos. En la cobertura bosque tropical seco, las poblaciones grandes tendieron a asociarse a su pérdida de cobertura. Por el contrario, en la cobertura bosque de encino, las poblaciones pequeñas tendieron a relacionarse con su pérdida de cobertura. Estas diferencias se deben a que, en la zona de estudio, las áreas donde se distribuye el bosque tropical seco presentan mejores vías de comunicación con respecto a la cobertura bosque de encino, condiciones que promovieron la concentración de la población en el bosque tropical seco. Esta relación se ha reportado por Figueroa et al. (2009), quienes mencionan una relación positiva entre la población y la conversión forestal en un estudio socioeconómico del proceso de cambio de cobertura forestal en las Reservas de la Biosfera de México, debido a la alta densidad de carreteras y vías de comunicación.

La migración es otro factor que se debe considerar en el análisis de los procesos de deforestación (Pineda et al., 2010). Los flujos migratorios (campo-ciudad, entre ciudades y a nivel internacional) se han reconocido como una estrategia de sobrevivencia de los hogares que genera el abandono de tierras (Pérez, 2010); esto a su vez se ha relacionado con la recuperación de vegetación secundaria (Galicia et al., 2008). En el presente estudio fue posible identificar importantes recuperaciones de vegetación. El bosque tropical seco recuperó un 8% de su cobertura mientras que el bosque de encino y bosque de pino-encino recuperaron aproximadamente un 3.5% de su cobertura forestal durante un período de 14 años (1986-2000). En este sentido, identificamos que este período se caracterizó por una disminución en la proporción de población de 15 a 49 años y una disminución en la proporción de población masculina, lo que sugirió un evento de migración, importante para la recuperación de vegetación. Esta relación se ha reportado por Corona (2008), Díaz et al. (2010) y Yackulic et al (2011), quienes reportan importantes recuperaciones de vegetación ante la falta de oportunidades económicas, lo que provoca el desarrollo de vegetación secundaria.

La marginación ha sido considerada como otro factor que se relaciona con la pérdida de bosques (Pineda et al., 2010). La marginación se define como un fenómeno estructural que se manifiesta tanto en la dificultad para propagar el avance técnico en el conjunto de la estructura productiva y en las regiones del país, y como en la exclusión de grupos sociales del proceso de desarrollo y disfrute de sus beneficios (CONAPO, 1995). Los indicadores sociales que repercuten en el grado de marginación son: el analfabetismo, la proporción de viviendas habitadas con piso de tierra, la proporción de población sin acceso a servicios de salud y la proporción de población económicamente inactiva, entre otros (CONAPO, 2006). En este contexto, en el presente estudio analizamos la relación entre estas variables socioeconómicas y la deforestación de las coberturas bosque tropical seco, bosque de encino y bosque de pino-encino. Fue posible identificar que en el bosque tropical seco y en el bosque de encino, en ambos períodos, la deforestación ocurrió en áreas marginadas donde se presentó analfabetismo y limitación en el acceso a los servicios de salud. Durán et al (2011) reporta que en estas coberturas, se presenta un alto grado de marginación, lo que provoca que la actividad ganadera se concentre en estas zonas.

En la cobertura bosque de pino-encino las áreas deforestadas no presentaron una asociación positiva con la marginación en el período 1986-2000, Por el contrario, en el período 2000-2011, las áreas deforestadas ocurrieron en donde la población no tenía acceso a servicios de salud y la población que no participó en la producción económica. Esta relación posiblemente se debe a que el uso que se le da a la cobertura bosque de pino-encino es de carácter comercial (Rzedowski, 2006), y en el primer período las condiciones económicas de los pueblos marginados no exigían el empleo de estos bosques; mientras que en el segundo período, el recurso fue empleado por los pueblos marginados. Aunado a esto, Duran et al. (2011) menciona que las condiciones biofísicas en las que se encuentra este bosque como las altas pendientes, impiden la accesibilidad, por lo que no existe una elevada deforestación en la cuenca; esto sustenta los resultados encontrados donde el bosque de pino-encino fue la cobertura menos deforestada.

5.4. Modelación de los procesos de deforestación

En el ámbito de los procesos de CCUS uno de los retos en la investigación es proyectar las condiciones futuras y desarrollar planes estratégicos con el propósito de mitigar los efectos que tienen los procesos de deforestación (Lourdes et al., 2011). En este sentido, la modelación de los procesos de deforestación, especialmente si se realizan de manera espacialmente explícita, representa una técnica importante para la proyección y visualización alternativa de los futuros usos del suelo que pueden ser resultado de decisiones sociales o políticas (Verburg et al., 2002). A pesar de que, por definición, un modelo no puede abarcar todos los aspectos de la realidad, éstos proveen una alternativa para predecir, con base en datos concretos, los procesos potenciales de cambio de las coberturas forestales. El requisito principal de un modelo es que los datos que sean introducidos sean precisos (Veldkamp y Lambin, 2001). De este modo, la integración de factores ambientales tales como la accesibilidad, se ha considerado útil en diversos estudios para predecir los futuros usos del suelo (Merten y Lambin 1997; Etter et al., 2006). Por ejemplo, la utilización de variables como la cercanía a carreteras, la presencia de bajas pendientes (Laurance et al., 2002; Linkie et al., 2004; Mas et al., 2004; Etter et al., 2006) y la distancia a ciudades (Merten y Lambin 1997; Etter et al., 2006) han permitido predecir las áreas probables a ser deforestadas. Por otra parte, las variables socioeconómicas han desempeñado un papel decisivo en los CCUS (Wu and Hobbs, 2002; Serra et al., 2008), por lo que su inclusión en el proceso de modelación es esencial para predecir los futuros usos del suelo (Lee et al., 2008). En el presente estudio, las variables ambientales y socioeconómicas introducidas en el período de calibración (1986-2000) fueron capaces de predecir los futuros CCUS del siguiente período (2000-2011), de acuerdo con los resultados de la evaluación del estadístico ROC. Los datos mostrados representan una alternativa de los posibles futuros CCUS; sin embargo, este tipo de modelos presenta una limitación en no asignar una escala temporal precisa a las predicciones de conversión forestal (Etter et al., 2006), es decir carecen de exactitud temporal en las predicciones de cambio de cobertura/uso de

suelo; esta limitación se debe a que los modelos basan sus predicciones en imágenes satelitales con coberturas estáticas, es decir, escasa multitemporalidad; contar con datos multitemporales podría precisar los sitios de mayor ocurrencia de cambio de cobertura forestal (Etter et al., 2006). Lo anterior proporcionaría mayor soporte y precisión a los modelos en las predicciones de deforestación, y permitiría precisar las variables ambientales y socioeconómicas que favorecen los cambios de cobertura. No cabe duda que hace falta realizar más estudios en torno a las variables socioeconómicas que promueven la deforestación y el CCUS. Se requiere también, enfocar esfuerzos en la recolección recurrente de información socioeconómica para precisar las variables que influyen en la deforestación y los cambios de cobertura forestal.

El análisis y modelación de los procesos de deforestación debe ser prioridad para las instancias institucionales y gubernamentales, pues no sólo permite analizar los recursos forestales, sino también observar las tendencias de los diferentes cambios de cobertura y usos de suelo, los cuales pueden ser útiles para la conformación de planes de manejo, ordenamiento territorial, conservación y aprovechamiento de recursos naturales.

6. Conclusiones

El análisis y modelación de los procesos de deforestación debe ser una prioridad para los tomadores de decisiones pues no sólo permite observar las tendencias de los futuros usos del suelo sino también permite proponer medidas encaminadas a la conservación y manejo adecuado de los ecosistemas. La cuenca del río Coyuquilla ha experimentado una importante pérdida de cobertura forestal, ya que el 36% de su cobertura se ha perdido durante un período de 24 años (1986-2010). En el primer período estudiado, las mayores tasas de pérdida se presentaron para la cobertura bosque tropical seco, seguida del bosque de encino y, por último, el bosque de pino-encino. En el segundo período, las mayores tasas de pérdida se dieron para la cobertura bosque de encino seguido del bosque tropical seco y el bosque de pino-encino. La ganadería fue la principal actividad que provocó la pérdida de las coberturas forestales. Existe una estrecha relación entre los factores ambientales (biofísicos), socioeconómicos y la pérdida de cobertura forestal. Las variables ambientales que se asociaron con la pérdida de las coberturas forestales, en ambos períodos, fueron la pendiente, la cercanía a localidades y la cercanía a carreteras. Respecto a los factores socioeconómicos, los indicadores de marginación como la tasa de analfabetismo y la limitación del acceso a los servicios de salud, en ambos períodos, fueron los principales factores que se asociaron a la pérdida de las coberturas de bosque tropical seco y bosque de encino, mientras que en el bosque de pino-encino la marginación tuvo una asociación positiva sólo en el segundo período.

La modelación de los procesos de deforestación se ha presentado como una alternativa de proyección y visualización de los futuros usos del suelo. En este sentido, los resultados de la predicción de los modelos resultaron ser precisos para la localización de los futuros CCUS de acuerdo con la evaluación del estadístico ROC. Estos datos sugirieron que las áreas más probables a experimentar CCUS se encuentran donde las condiciones de accesibilidad son favorables, es decir, en áreas de bajas pendientes y con distancias cercanas a carreteras y centros urbanos.

Una de las ventajas del método propuesto es la posibilidad de volverlo generalizable para cualquier región del país, dado que las bases de datos utilizadas existen a nivel nacional. También permiten identificar las áreas más probables a ser deforestadas, de manera que los tomadores de decisiones podrán enfocar esfuerzos para la implementación de políticas apropiadas hacia la atención y prevención de los procesos de deforestación.

Entre las principales limitantes que tiene el método propuesto en este trabajo es que no toma en cuenta procesos de degradación forestal (aún no existe una definición oficial de la degradación forestal) que probablemente es un proceso más importante que la deforestación para diversas cuestiones ambientales, como la emisión de carbono por ejemplo; por lo que sería interesante incluir este proceso en este tipo de estudios, el problema principal es la dificultad de monitorear y cartografiar la degradación forestal.

Otra limitante se refiere al hecho de que no se consideren otras variables biofísicas o sociales que pudieran estar asociadas a la deforestación de los bosques, como es el caso de los factores políticos, los cuales pueden tener un efecto mayor sobre la pérdida de bosques.

El estudio sugiere la integración de análisis cualitativos, ya que a través de ellos es posible entender de manera más integrada los factores que se asocian a los procesos de deforestación. En estos análisis sería posible entender las diferentes prácticas y conocimientos que diferentes participantes han tenido sobre el manejo de los bosques y, con ello, diseñar y rediseñar políticas encaminadas a la conservación y restauración de ecosistemas, considerando el conocimiento local.

7. Literatura citada

- Bartra, A., Cobo, R., Espinoza, G., García, C., Meza, M., Paz-Paredes, L., 2000. Crónicas del sur. Utopías Campesinas en Guerrero. México: Ediciones ERA.
- Bocco, G., Mendoza M., Masera., 2001. La dinámica del cambio de uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México 18-38.
- Burnham KP., Anderson DR., 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach, 2ed. Springer, New York.
- Card, D. H., 1982. Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. Photogramm. Engineering Remote Sensing 48, 431–439.
- Cienfuegos, P. 2001. [Entrevista con Felipe Arriaga: Historia de la Costa Grande de Guerrero]. Grabación en audio Marzo 2001. Disponible en línea: <http://archive.org/details/HistoriasDeLaCostaGrandeDeGuerreroFelipeArriaga>
- Consejo Nacional De Población (CONAPO)., 1995. Anexo Metodológico A, In: Indicadores socioeconómicos e Índice de marginación municipal 1990, CONAPO, México.
- Cotler, H., 2010. Las Cuencas Hidrológicas de México. Diagnóstico y Priorización. Semarnat INE-FGRA. México.
- Dewan M., Yamaguchi Y., 2008. Using remote sensing and GIS to detect and monitor land use and land cover change in Dhaka Metropolitan of Bangladesh during 1960–2005. 150, 237–249. Environmental Monitoring and Assessment, 150,237-249.
- Eastman, R., 2009. Idrisi Taiga, Guide to GIS and Image Processing, manual version 16.02, Clark University 342-431.
- Ellis, T., Spruce P., Swann J., Smoot C., Hilbert., 2010. An assessment of coastal land-use and land-cover change from 1974–2008 in the vicinity of Mobile Bay, Alabama. Journal of Coastal Conservation 15,139–149.
- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., Possingham, H., 2006. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. Agriculture, Ecosystems and Environment 114, 369–386.
- FAO., 1996. Forest Resources Assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes. Forestry Paper No. 130, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- FAO., 1996. World livestock production systems: current status, issues and trends, por Seré, C. y Steinfeld.

- FAO., 2001. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000 (FRA 200), Informe principal. Documento de Montes 140.
- Farfán, M., Mas F., Osorio L., 2012. Interpolating Socioeconomic Data for the Analysis of Deforestation: A Comparison of Methods. *Journal of Geographic Information System* 4, 358-365.
- Farley, K.A., Ojeda-Revah, L., Atkinson, E.E., Eaton-González, B.R., 2012. Land Use Policy Changes in land use, land tenure, and landscape fragmentation in the Tijuana River Watershed following reform of the ejido sector. *Land Use Policy* 29, 187–197.
- Foley, J. a, Defries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chapin, F.S., Coe, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E. a, Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J. a, Prentice, I.C., Ramankutty, N., Snyder, P.K., 2005. Global consequences of land use. *Science* 309, 570–584.
- Food and Agriculture Organization., 1996. Forest resources assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO Forestry Paper 130. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.htm>.
- Galicia, L., Zarco-Arista, A.E., Mendoza-Robles, K.L., Palacio-Prieto, J.L., García-Romero, A., 2008. Land use/cover, landforms and fragmentation patterns in a tropical dry forest in the southern Pacific region of Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography* 29, 137–154.
- Giardina, C.P. et al., 2000. The effects of slash burning on ecosystem nutrients during the land preparation phase of shifting cultivation. *Plant and Soil* 220, 247–260.
- Haack, B.N., 1982. Landsat: A tool for development. *World Development* 10, 899–909.
- Hecht, S.B., 1992. Logics of livestock and deforestation: the case of Amazonia. In: Downing, E.T. (Ed.), *Development or Destruction: The Conversion of Tropical Forest to Pasture in Latin America*. Westview Press, Boulder, Colorado 405-417.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB., 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera Edición.
- Jensen, John R., 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 316-317.
- Karancsi Z., 2010. Agriculture: Deforestation. *Anthropogenic Geomorphology* (5). 95-112
- Kidane, Y., Stahlmann, R., Beierkuhnlein, C., 2012. Vegetation dynamics, and land use and land cover change in the Bale Mountains, Ethiopia. *Environmental monitoring and assessment* 184, 7473–89.

- Lambin, E F., Geist, H., 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* 52, 143-150.
- Lambin, E., Turner, B.L., Helmut J., Geist, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W.; Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Xiubin Li., Moran, E., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G., Svedin, U., Veldkamp, T., Vogel, C., Jianchu, Xu., 2001. The causes of land-use and landcoverchange: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11, 261 –269.
- Laurance, W.F., Albernaz, A.K., Schroth, G., Fearnside, P.M., Bergen, S., Venticinque, E.M., Da Costa, C., 2002. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography* 29, 737–748.
- Linkie, M., Smith, R.J., Leader-Williams., 2004. Mapping and predicting deforestation patterns in the lowlands of Sumatra. *Biodiversity Conservation*. 13, 1809–1818.
- Luna, Soria. H., 2009. Modelación de la deforestación y cambio de uso del suelo de la Selva Baja Caducifolia en dos municipios del noroeste del Pacífico Mexicano. Tesis para obtener el grado de Maestro en Geografía. Posgrado en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maass, J., Balvanera, P., Castillo, A., Daily, G., Mooney, Ehrlich, P., Quesada, M., Miranda, A., Jaramillo V., García-Oliva, F., Martínez-Yrizar, A., Cotler, H., López-Blanco, J., Pérez-Jiménez A., Búrquez, A., Tinoco C., Ceballos G., Barraza L., Ayala, R., Sarukhán, J., 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* 10, 17-23.
- Maass, J.M., Cotler, H., 2008. Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas En: Cotler, H. (ed.). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* 2, 41-64.
- Maass, J.M., H, Cotler., 2007. Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas En: Cotler H. (Comp.). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental (Segunda Edición)*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México D.F. 41-58.
- Mas. J.F., A. Flamenco., 2011. Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México, *GeoTrópico* 5, 15-37.
- Masera O.R., 1996. Deforestación y degradación forestal en México. *Documentos de Trabajo*. 19. GIRA. A.C. Pátzcuaro, México.
- Merchant, J. W., Yang, L., Yang, W., 1994. Validation of continental scale land cover data bases developed from AVHRR data. In: *Proceedings of Pecora 12 land information from space-based systems*. *International Journal of Remote Sensing* 4, 63–72.

- Nagendra H., Southworth J., Tucker C., 2003. Accessibility as a determinant of landscape transformation in western Honduras: Linking pattern and process. *Landscape Ecology* 18,141–158.
- Ojima, D. S., Galvin K.A., Turner, B. L., 1994. The global impact of land use change. *BioScience* 44, 300–304.
- Pineda Jaimes, N.B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Plata Rocha, W., 2009. Análisis de cambio de uso del suelo en el estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas* 69, 33-52.
- Pontius Jr., Schneider, L.C., 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85, 239–248.
- Puyravaud J.P., 2003. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 117, 593-596
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México D.F., México.
- Soares Filho, B., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G. C., Vera Diaz, M., Rivero, S., Solorzano, L. Voll, E., 2004. Simulating the Response of Land-Cover Changes to Road Paving and Governance Along a Major Amazon Highway: The Santarém Cuiabá Corridor”. *Global Change Biology* 25, 745-764.
- Soares-Filho B.S., Pennachin, C. L., Cerqueira, G. DINAMICA., 2002. A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling* 154, 235-236.
- Sorensen, T., Mcloughlin, P.D., Hervieux, D., Dzus, E., Nolan, J., Boutin, S., The, S., Management, W., May, N., Nolan, J., Wynes, B.O.B., Boutin, S., 2013. Determining Sustainable Levels of Cumulative Effects for Boreal Caribou. *The Journal of Wildlife Management* 72, 900–905.
- Stehman, S., Czaplewski, R., 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: fundamental principles. *Remote Sensing of Environment* 64, 331–344.
- Trejo, I., Dirzo, R., 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest : a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation* 94, 133–142.
- Turner II, B.L., Skole, D.L., Sanderson, S., Fischer, G., Fresco, L.O., Leemans, R., 1995. Land-use and land-cover change. Science/Research Plan. Stockholm and Geneva: IGBP Report No. 35 and HDP Report No. 7, 132.
- Turner, A.B.L., Meyer, W.B., Skole, D.L., 1994. Global Land-Use/Land-Cover Change: Towards an Integrated Study. *Ambio* 23, 91–95.
- Umer, M., Lamb, H. F., Bonnefille, R., Lezine, A. M., Tiercelin, J.J., Gibert, E., Cazet, J. P., Watrin, J., 2007. Late Pleistocene and Holocene vegetation history of the Bale Mountains, Ethiopia. *Quaternary Science Review*

- Van Vliet, N., Mertz, O., Heinimann, A., Langanke, T., Pascual, U., Schmook, B., Adams, C., Schmidt-Vogt, D., Messerli, P., Leisz, S., Castella, J.-C., Jørgensen, L., Birch-Thomsen, T., Hett, C., Bech-Bruun, T., Ickowitz, A., Vu, K.C., Yasuyuki, K., Fox, J., Padoch, C., Dressler, W., Ziegler, A.D., 2012. Trends, drivers and impacts of changes in swidden cultivation in tropical forest-agriculture frontiers: A global assessment. *Global Environmental Change* 22, 418–429.
- Velázquez, A., Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., Palacio, J., 2001. Patronos y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica, UNAM* 62, 21–37.
- Veldkamp, A., Verburg, P.H., 2004. Modelling land use change and environmental impact. *Journal of environmental management* 72, 1–3.
- Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R. Espaldon, V., Sharifah Mastura, S.A., 2002. Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: the CLUE-S Model, *Environmental Management* 30, 391-405.
- Wassenaar, T., Gerber, P., Verburg, P.H., Rosales, M., Ibrahim, M., Steinfeld, H., 2007. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change* 17, 86–104.
- Wu J., Hobbs R., 2002. Key issues and research priorities in landscape ecology: An idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology* 17, 355–365.
- Yackulic, C.B., Fagan, M., Jain, M., Jina, A., Lim, Y., Marlier, M., Muscarella, R., Adame, P., Defries, R., Uriarte, M., 2011. Biophysical and Socioeconomic Factors Associated with Forest Transitions at Multiple Spatial and Temporal Scales. *Ecology and Society* 16, 15–21.
- Yang, X., Lo, C. P., 2002. Using a time series of satellite imagery to detect land use and cover changes in the Atlanta, Georgia. *International Journal of Remote Sensing* 23, 1775–1798.
- Yu, W., Zang, S., Wu, C., Liu, W., Na, X., 2011. Analyzing and modeling land use land cover change (LUCC) in the Daqing City, China. *Applied Geography* 31, 600–608.
- García, R., 2012. “Los desplazados de la laguna” en la Jornada Guerrero. [En Línea]. Diciembre 2012. Disponible en: <http://www.lajornadaguerrero.com.mx/2012/12/14/index.php?section=opinion&article=002a1soc>
- Díaz, L., 2012. “La sierra de Guerrero, el reino de talamontes, narcos, paramilitares...” en la Revista Proceso. [En Línea]. Noviembre 2012. Disponible en: <http://www.proceso.com.mx/?p=326434>

- Singh A., 1989. Review Article: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *Journal of Remote Sensing* 10, 989-1003
- Tudela, F., 1990. Recursos Naturales y Sociedad en el Trópico Húmedo Tabasqueño. *Medio Ambiente y Desarrollo en México* 1, 149–189.
- Sarukhán, J., Maass, J.M., 1990. Bases ecológicas para un manejo sostenido de los ecosistemas: el sistema de cuencas hidrológicas. En: Leff, E. (ed.), *Medio ambiente y desarrollo en México* 1, 81-114. UNAM (CIIH)-Porrúa. México.
- De Ita, C., Sarukhán, J., Maass, J. M., 1991. Land-Use Patterns on a Tropical Deciduous Forest Ecosystem on the Pacific Coast of Jalisco, Mexico, manuscrito no publicado.
- Congalton, R., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing Environmental* 37, 35–46.
- Congalton, R. G., Green K., 1993. A practical look at the sources of confusión in error matrix generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59, 641-644.
- Maass, J. M., 1995. Tropical deciduous forest conversion to pasture and agriculture. Bullock, H. A. Mooney, and E. Medina, editors. *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge University Press, Cambridge, UK 399–422.
- Maass, J.M., 1995. Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture. In: Bullock, S., Mooney, H.A., Medina, E. (Eds.), *Seasonally Dry Tropical Forests*. Cambridge University Press, Cambridge 399–422
- Mertens, B., Lambin, E.F., 1997. Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon: spatial disaggregation of diverse deforestation processes. *Applied Geography*. 17, 143–162.
- Mertens, B., Lambin, E.F., 2000. Land-Cover-Change Trajectories in Southern Cameroon. *Annals of the Association of American Geographers* 90, 467–494.
- Camacho, J., 2000. Montiel y Cabrera: campesinos, ecologistas, presos y torturados en *Revista Este País* [En Línea] N° 116. Noviembre 2000. Disponible en: http://estepais.com/inicio/historicos/116/8_medio%20ambiente_montiel_gre enpeace
- Veldkamp A., Lambin. E., 2001. Predicting Land use change and Land cover change. *Agriculture Ecosystems and Environment* 85, 1-6.
- Serneels, S., Lambin, E.F., 2001. Proximate causes of land-use change in Narok District, Kenya: a spatial statistical model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85, 65–81.
- Pérez, M. 2001. “Levantam la suspensión de aprovechamiento forestal a ejidos de Petatlán y Coyuca de Catalán” en *La Jornada*. Abril 2001, p. 33.

- Bartra, A., 2001. "En defensa del bosque" en suplemento mensual Ojarasca, La Jornada [En Línea] N° 47. Marzo 2001. Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2001/03/20/oja47-guerrero.html>.
- R 2. 5.1, R Development Core Team., 2007. A language and environment for statistical computing. R. Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Geist, H.J., Lambin, E., 2002. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience* 52, 143–150.
- Batistella, M., Robeson S., Moran E., 2003. Settlement design, forest fragmentation, and landscape change in Rondonia, Amazonia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69, 805–812.
- Lambin, E.F., Geist, H.J., Lepers, E., 2003. Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources* 28, 205–241.
- Mas, J.F., Díaz-Gallegos, J.R., Vega, A., 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas : una revisión Assessment of the thematic reliability of maps and classified images: a review. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 51, 53–72.
- Lambin, E.F., Geist, H.J., 2003. Regional Differences in Tropical Deforestation. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 45, 22–36.
- Giles, F., 2004. Thematic Map Comparison : Evaluating the Statistical Significance of Differences in Classification Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 70, 627–633.
- Pontius, R., Shusas, E., McEachern, M., 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 101, 251-269.
- Verburg P.H., Veldkamp A., 2004. Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales. *Landscape Ecology* 19, 77-98
- Mas, J.F., Puig, H., Palacio, J.L., López, A.S., 2004. Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. *Environmental Model. Software* 19, 461-471.
- Campbell, D.J., Lusch, D.P., Smucker, T. ., Wangui, E.E., 2005. Multiple Methods in the Study of Driving Forces of Land Use and Land Cover Change: A Case Study of SE Kajiado District, Kenya. *Human Ecology* 33, 763–794.
- Rzedowski, J., 2006. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México
- Gellrich, M., Zimmermann, N.E., 2007. Investigating the regional-scale pattern of agricultural land abandonment in the Swiss mountains: A spatial statistical modelling approach. *Landscape and Urban Planning* 79, 65–76.

- Tang, F., Chen, X., Luo, G., Lin, Q., Liu, H., 2007. A contrast of two typical LUCC processes and their driving forces in oases of arid areas: A case study of Sangong River Watershed at the northern foot of Tianshan Mountains. *Science in China Series D: Earth Sciences* 50, 65–75.
- Velázquez, A. 2008. La dinámica de la cubierta forestal de México. Página de la Sociedad Mexicana de Física (<http://www.smf.mx/C-Global/webCubFor.htm>).
- Lee, C.L., Huang, S.L., Chan, S., 2008. Biophysical and system approaches for simulating land-use change. *Landscape and Urban Planning* 86, 187–203.
- Corona, Nuñez, R.O., 2008. Dinámica espacio-temporal de los conductores sociales, políticos y económicos de la deforestación y de los cambios de uso/cobertura del suelo a escala local en el bosque tropical caducifolio del sur de Oaxaca, México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Posgrado en ciencias biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Serra, P., Pons, X., Saurí, D., 2008. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography* 28, 189–209.
- Zeledon, E.B., Kelly, N.M., 2009. Understanding large-scale deforestation in southern Jinotega, Nicaragua from 1978 to 1999 through the examination of changes in land use and land cover. *Journal of environmental management* 90, 2866–72.
- Farfán, M. A., 2009. De la percepción remota a lo social: Deforestación y conservación (1971-2000) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco. Tesis de Maestría en Geografía (Orientación Manejo Integrado del Paisaje), Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mas, J.F., Velázquez, A., Couturier, S., 2009. La evaluación de los cambios de cobertura / uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental* 1, 23–39.
- Crk, T., Uriarte, M., Corsi, F., Flynn, D., 2009. Forest recovery in a tropical landscape: what is the relative importance of biophysical, socioeconomic, and landscape variables? *Landscape Ecology* 24, 629–642.
- Takada, T., Miyamoto, A., Hasegawa, S.F., 2010. Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications. *Landscape Ecology* 25, 561-572.
- Maeda, E.E., Clark, B.J.F., Pellikka, P., Siljander, M., 2010. Modelling agricultural expansion in Kenya's Eastern Arc Mountains biodiversity hotspot. *Agricultural Systems* 103, 609–620.

- Díaz-Gallegos, J. R., Mas J. F., Velázquez A., 2010. Trends of tropical deforestation in Southeast Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography* 31, 180-196.
- Lourdes, L., Karina, Z., Pedro, L., Héctor, M., Néstor, M., 2011. A dynamic simulation model of land cover in the Dulce Creek Basin, Argentina. *Procedia Environmental Sciences* 7, 194–199.
- Durán, E., Bray, D.B., Velázquez, A., Larrazábal, A., 2011. Multi-Scale Forest Governance, Deforestation, and Violence in Two Regions of Guerrero, Mexico. *World Development* 39, 611–619.
- Durán, E., Bray, DB., Velázquez, A., Larrazabal A., 2011. Multi-scale Forest Governance, Deforestation, and Violence in Two Regions in Mexico. *World Development* 39, 611–619.
- Schirpke, U., Leitinger, G., Tappeiner, U., Tasser, E., 2012. SPA-LUCC: Developing land-use/cover scenarios in mountain landscapes. *Ecological Informatics* 12, 68–76.

8. Anexos

Anexo 1: Matrices de transición

Matriz de Transición (1986-2000; ha)	Asentam. Humanos	Pastizal Inducido	Agricultura Temporal	Bosque Tropical Seco	Bosque de Encino	Bosque de Pino-Encino
Asentam. Humanos	112	---	---	---	---	---
Pastizal Inducido	36	4609	297	472	231	194
Agricultura Temporal	---	100	335	9	26	---
Bosque Tropical Seco	36	5080	1166	7823	---	---
Bosque de Encino	10	1784	565	---	9668	---
Bosque de Pino-Encino	9	1196	---	---	---	25403

Matriz de Transición (2000-2011; ha)	Asentam. Humanos	Pastizal Inducido	Agricultura Temporal	Bosque Tropical Seco	Bosque de Encino	Bosque de Pino-Encino
Asentam. Humanos	192	---	---	---	---	---
Pastizal Inducido	62	11132	561	190	552	275
Agricultura Temporal	32	1117	914	106	170	24
Bosque Tropical Seco	58	2719	836	4692	---	---
Bosque de Encino	14	5005	327	---	4581	---
Bosque de Pino-Encino	16	2773	128	---	---	22682

Matriz de probabilidad (1986-2000)	Asentam. Humanos	Pastizal Inducido	Agricultura Temporal	Bosque Tropical Seco	Bosque de Encino	Bosque de Pino-Encino
Asentam. Humanos	100.00	---	---	---	---	---
Pastizal Inducido	0.61	78.94	5.09	8.09	3.95	3.32
Agricultura Temporal	---	21.34	71.26	1.89	5.51	---
Bosque Tropical Seco	0.26	36.01	8.27	55.46	---	---
Bosque de Encino	0.12	14.83	4.70	---	80.40	---
Bosque de Pino-Encino	0.11	4.50	---	---	---	95.40

Matriz de probabilidad (2000-2011)	Asentam. Humanos	Pastizal Inducido	Agricultura Temporal	Bosque Tropical Seco	Bosque de Encino	Bosque de Pino-Encino
Asentam. Humanos	100	---	---	---	---	---
Pastizal Inducido	0.48	87.17	4.39	1.48	4.32	2.15
Agricultura Temporal	1.34	47.26	38.69	4.49	7.20	1.03
Bosque Tropical Seco	0.69	32.74	10.07	56.50	---	---
Bosque de Encino	0.12	50.43	3.30	---	46.15	---
Bosque de Pino-Encino	0.14	10.83	0.50	---	---	88.61

Anexo 2: Modelación de los procesos de deforestación

En esta sección se presentan los pesos de evidencia para las variables ambientales y socioeconómicas que se asocian a los cambios de las coberturas: bosque tropical seco (BTS), bosque de encino (BE) y bosque de pino de encino (BPE) para los períodos 1986-2000 y 2000-2011, a través del método de pesos de evidencia.

VARIABLES AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS QUE SE ASOCIAN AL CAMBIO DE COBERTURA DEL BTS EN EL PERÍODO 1986-2000

Transición Bosque Tropical Seco (BTS) a Asentamientos Humanos:

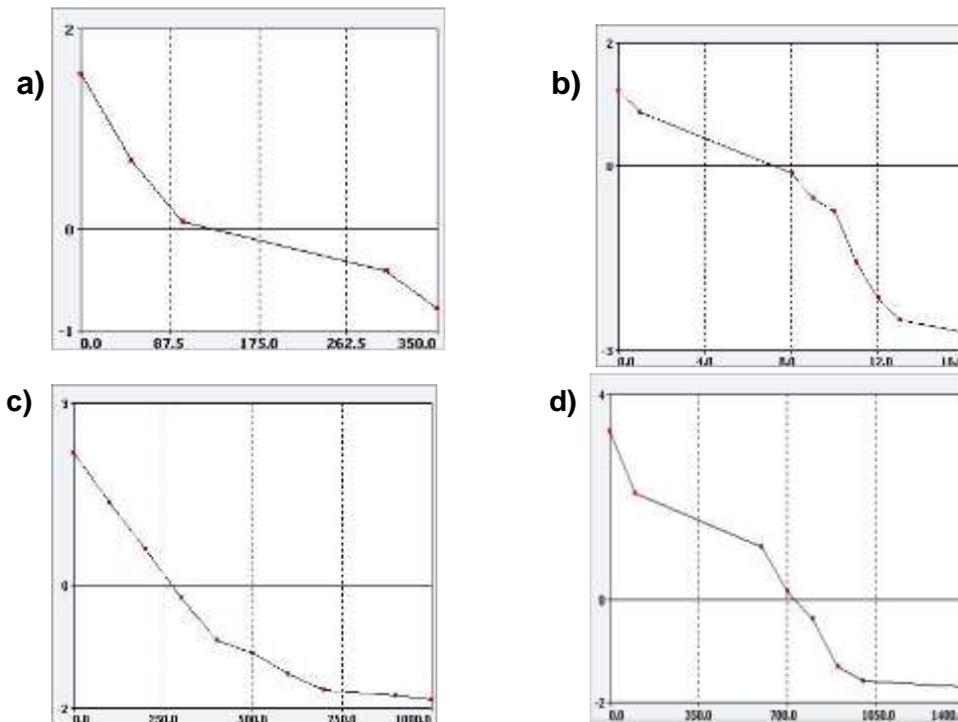


Figura 49. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BTS a asentamientos humanos en el período 1986-2000; a) altitud; b) pendiente c) distancia a carreteras; y d) distancia a localidades.

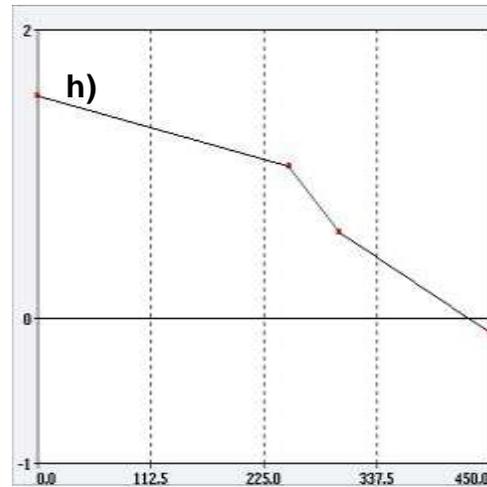
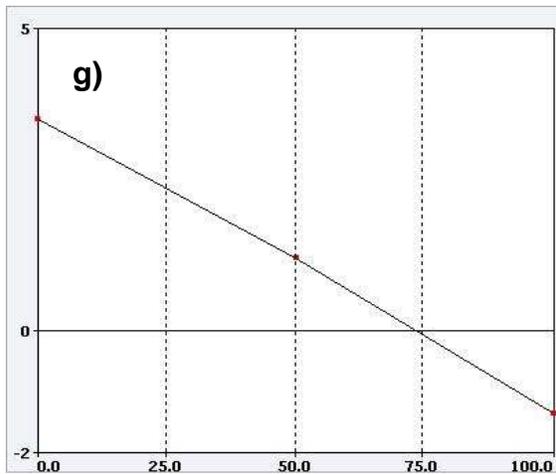
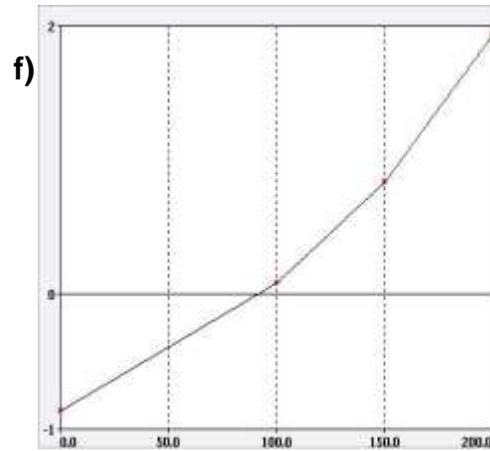
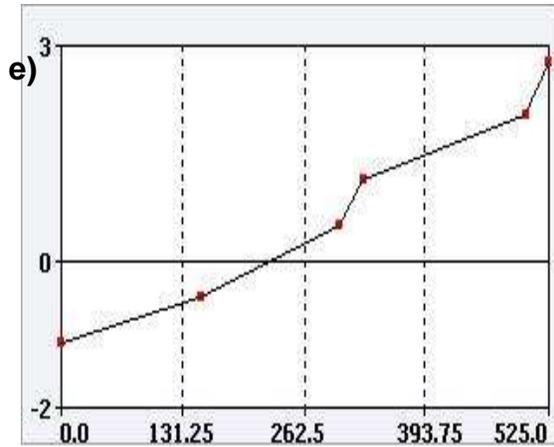


Figura 50. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BTS a asentamientos humanos en el período 1986-2000; e) población total; f) población analfabeta; g) población con acceso a servicios de salud; y h) población económicamente activa.

Transición Bosque Tropical Seco (BTS) a Pastizal Inducido:

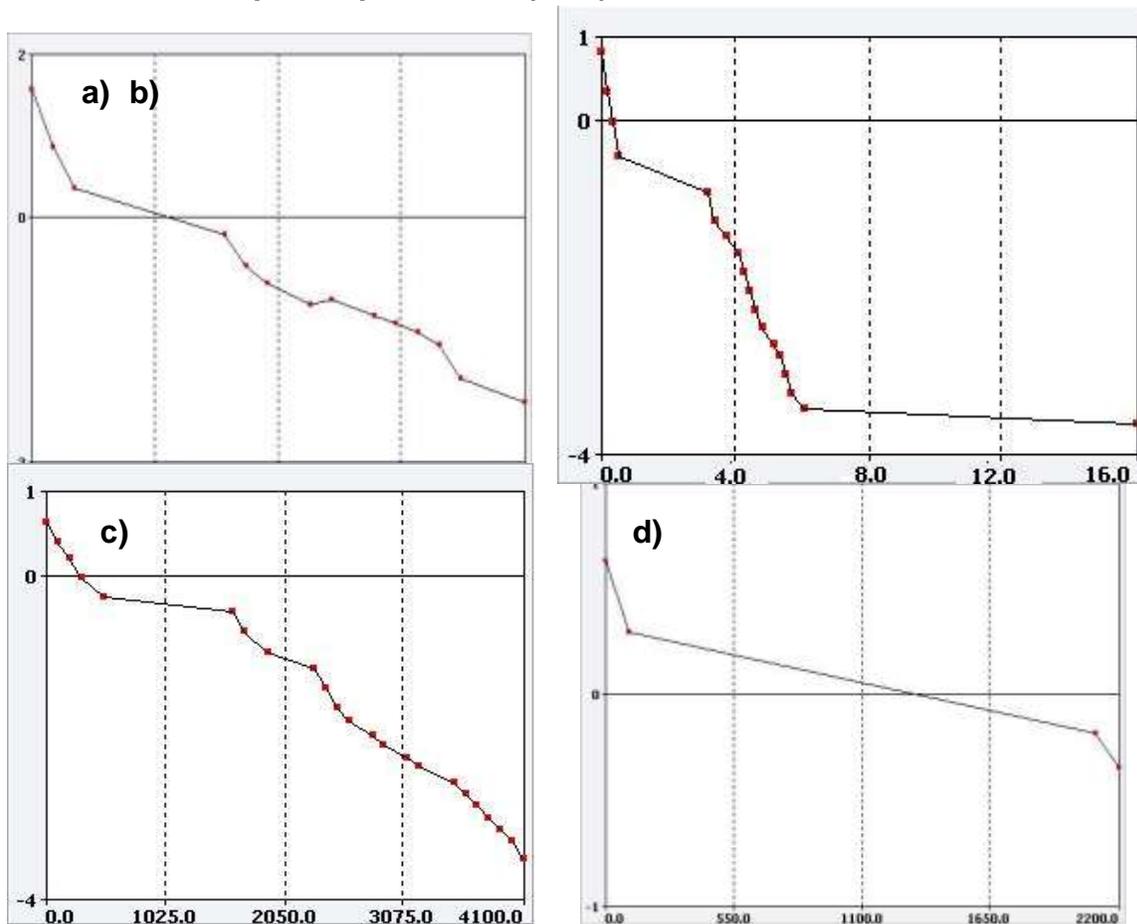


Figura 51. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BTS a pastizal inducido en el período 1986-2000; a) altitud; b) pendiente; c) distancia a carreteras; y d) distancia a localidades.

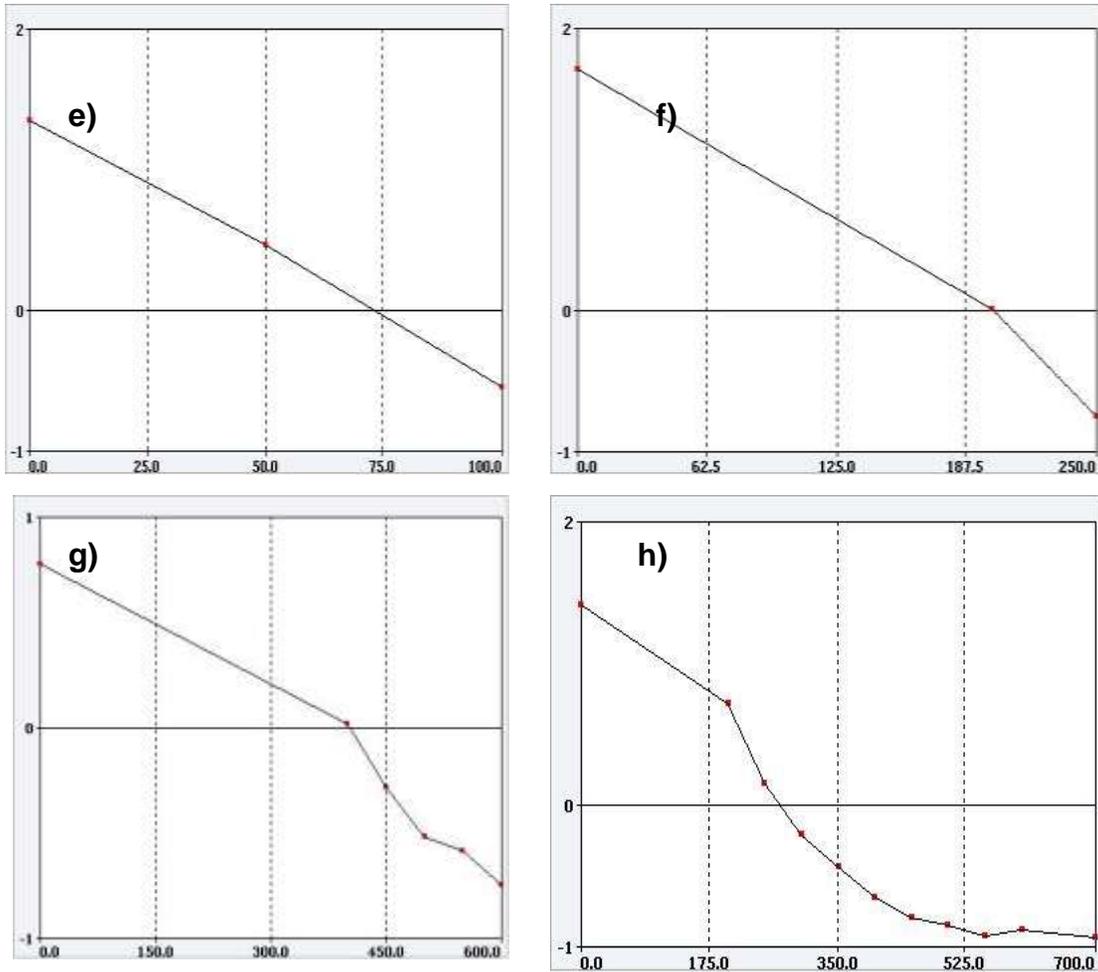


Figura 52. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BTS a pastizal inducido en el período 1986-2000; e) población con acceso a servicios de salud; f) población económicamente activa; g) población de 15-49 años; y h) proporción de viviendas con piso de tierra.

Transición Bosque Tropical Seco (BTS) a Agricultura de Temporal

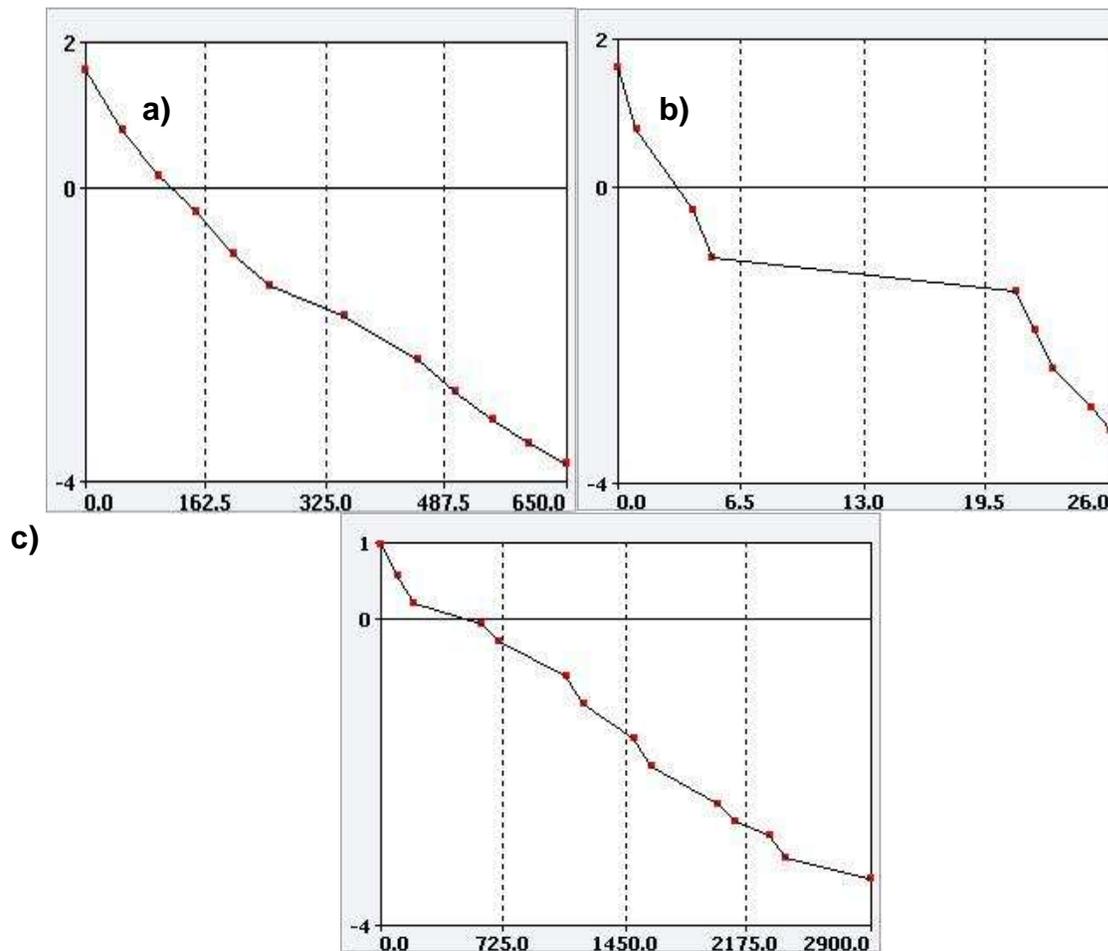


Figura 53. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BTS a agricultura de temporal en el período 1986-2000; a) altitud; b) pendiente; y c) distancia a localidades.

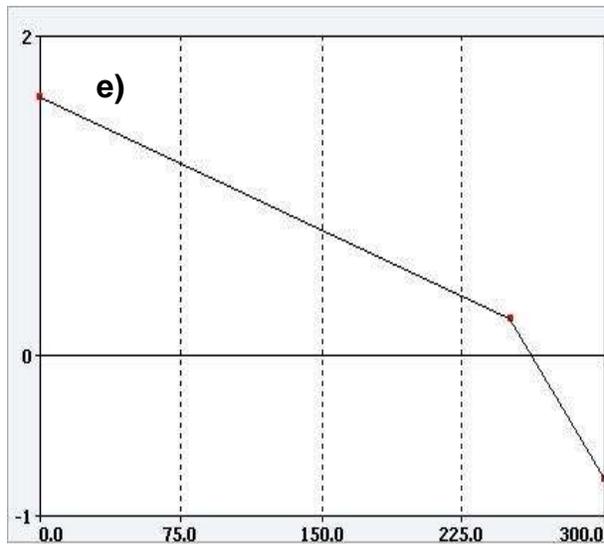
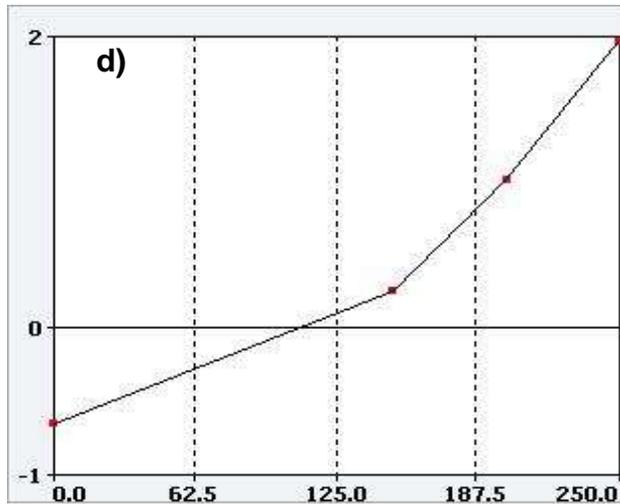


Figura 54. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BTS a agricultura de temporal en el período 1986-2000; d) población analfabeta; y e) población económicamente activa.

Variables ambientales y socioeconómicas que se asocian a los cambios de cobertura del BE en el período 1986-2000.

Transición Bosque de Encino (BE) a Asentamientos Humanos

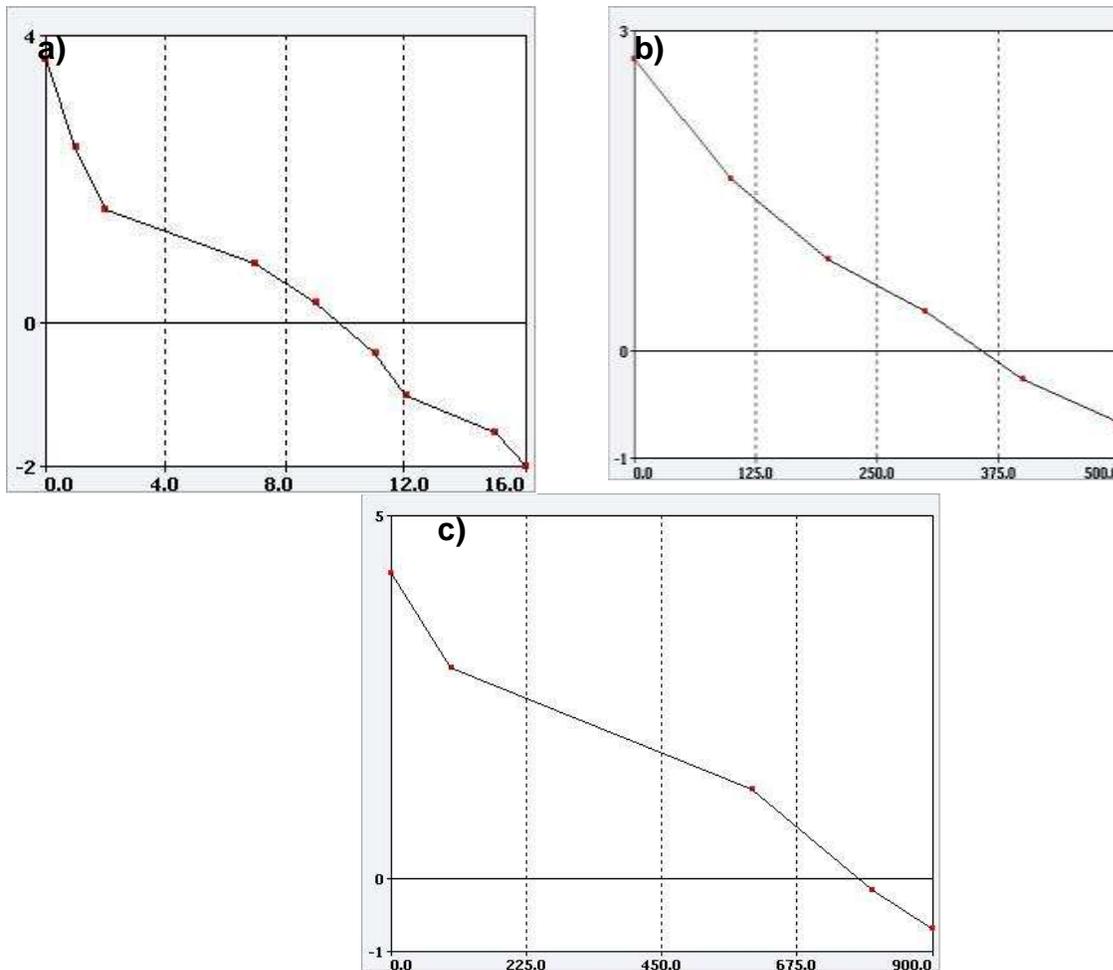


Figura 55. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BE a asentamientos humanos en el período 1986-2000; a) pendiente; b) distancia a carreteras; y c) distancia a localidades.

e)

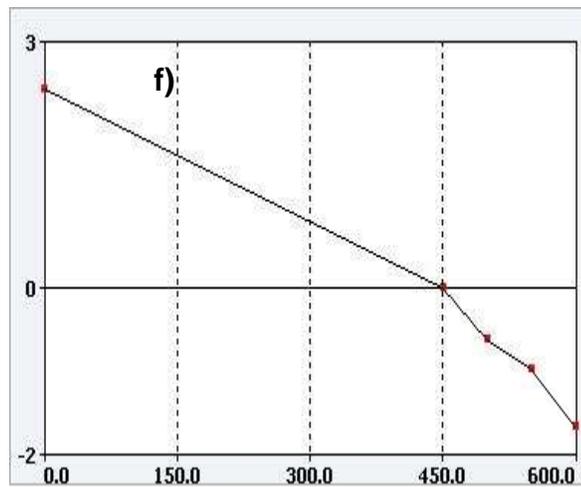
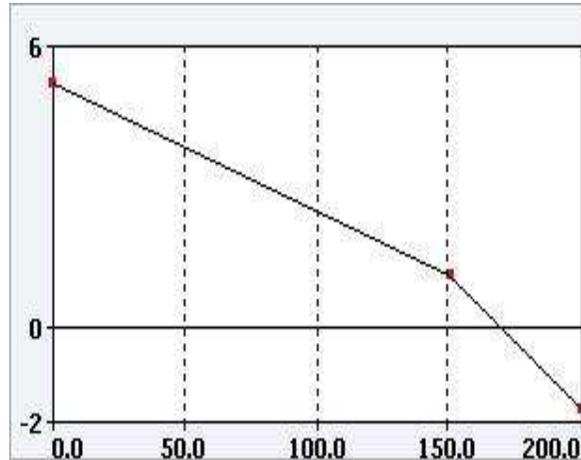


Figura 56. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BE a asentamientos humanos en el período 1986-2000; e) población analfabeta; f) proporción de viviendas con piso de tierra.

Transición Bosque de Encino (BE) a Pastizal Inducido

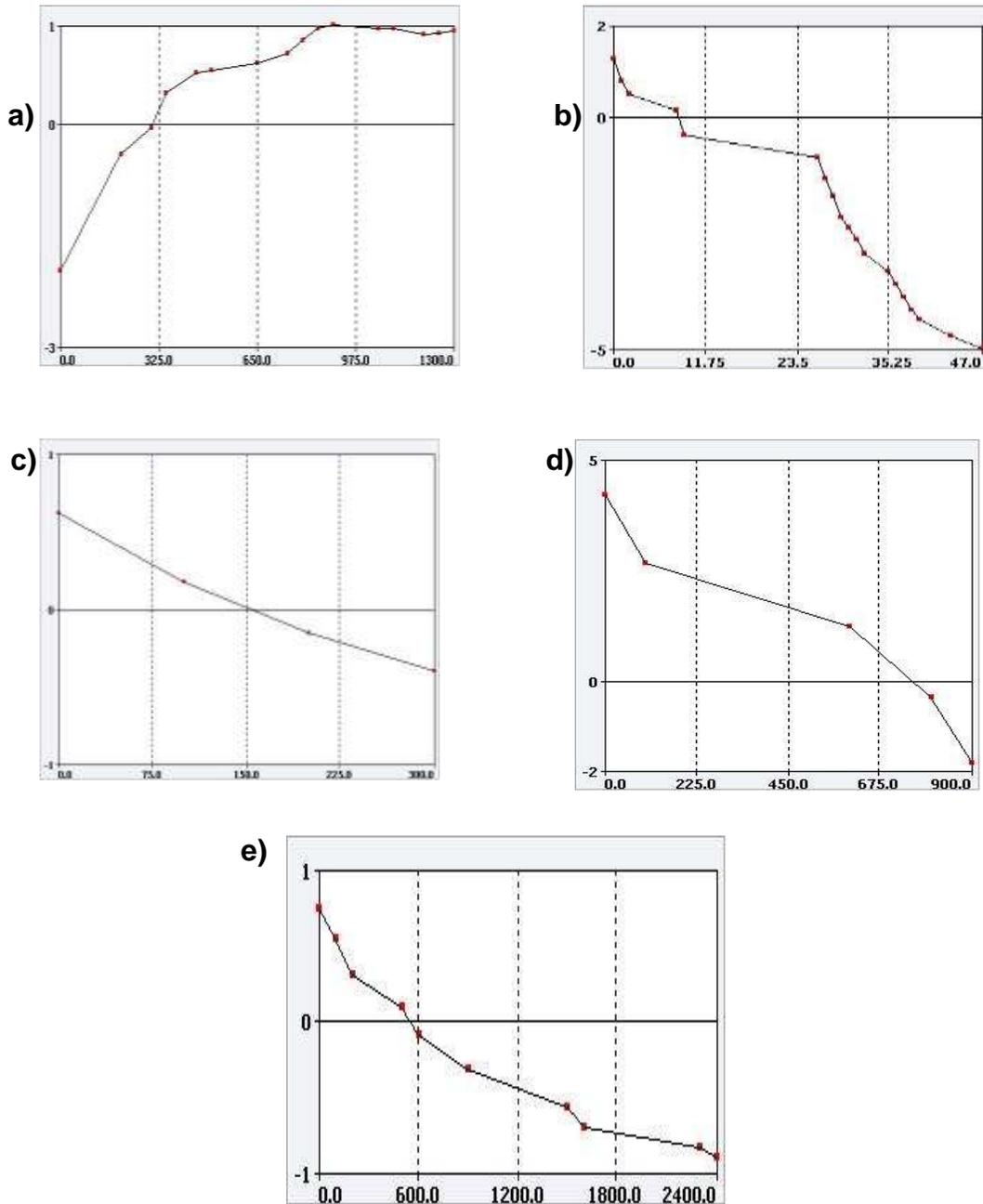


Figura 57. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BE a pastizal inducido para el período 1986-2000; a) altitud; b) pendiente; c) distancia a carreteras; d) distancia a localidades; y e) distancia a ríos.

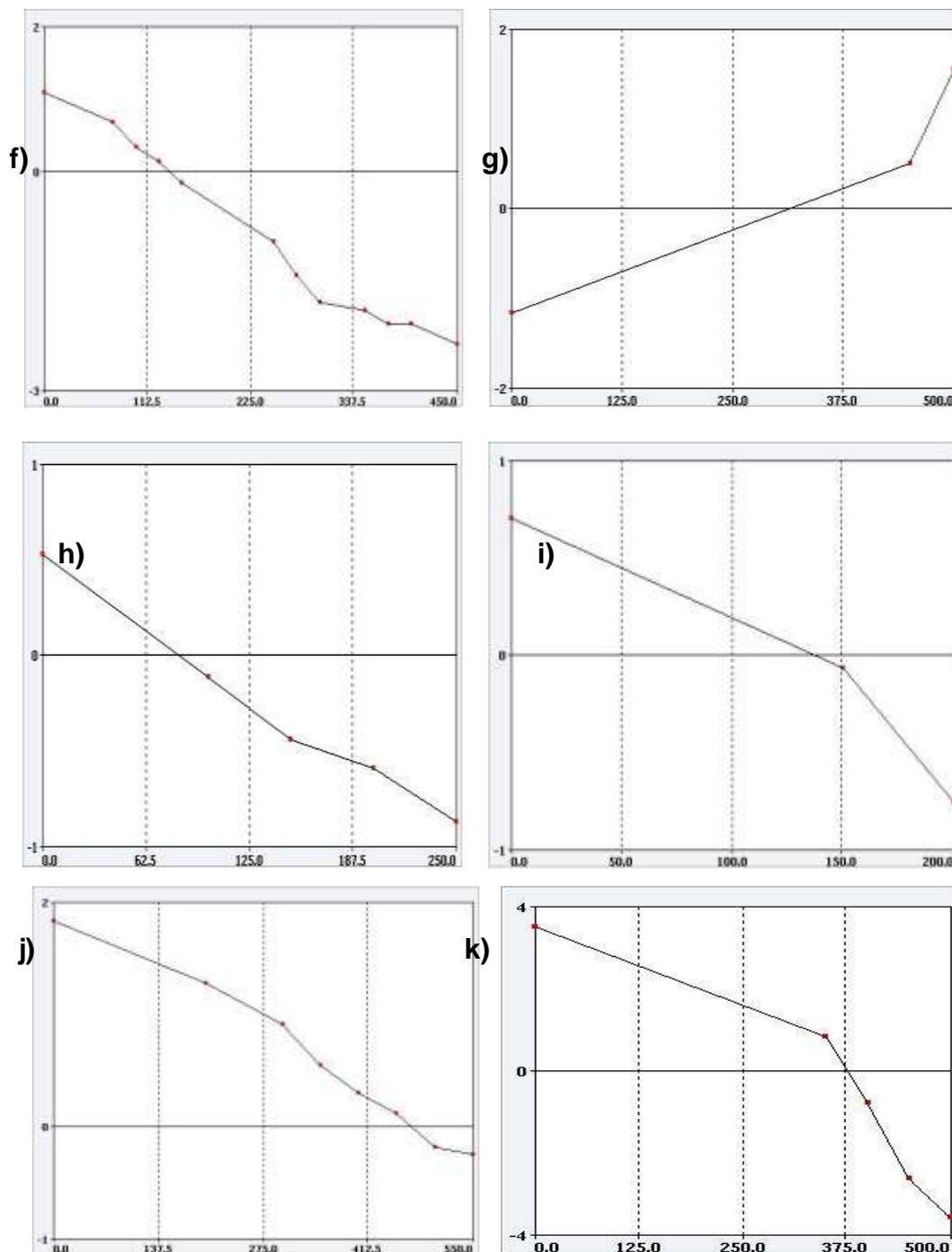


Figura 58. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BE a pastizal inducido en el período 1986-2000; f) población, g) población masculina; h) población analfabeta; i) población económicamente activa; j) proporción de viviendas con piso de tierra; k) población de 15-49 años.

Transición Bosque de Encino (BE) a Agricultura de Temporal

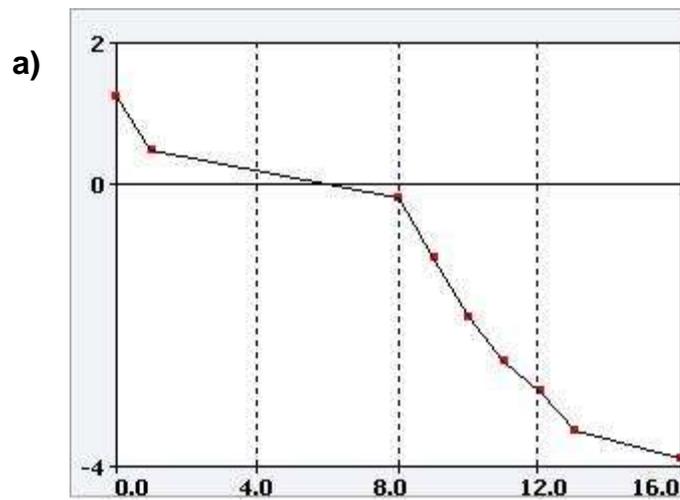


Figura 59. Pesos de evidencia para la variable ambiental que se asocia al cambio de cobertura del BE a agricultura de temporal en el período 1986-2000; a) pendiente.

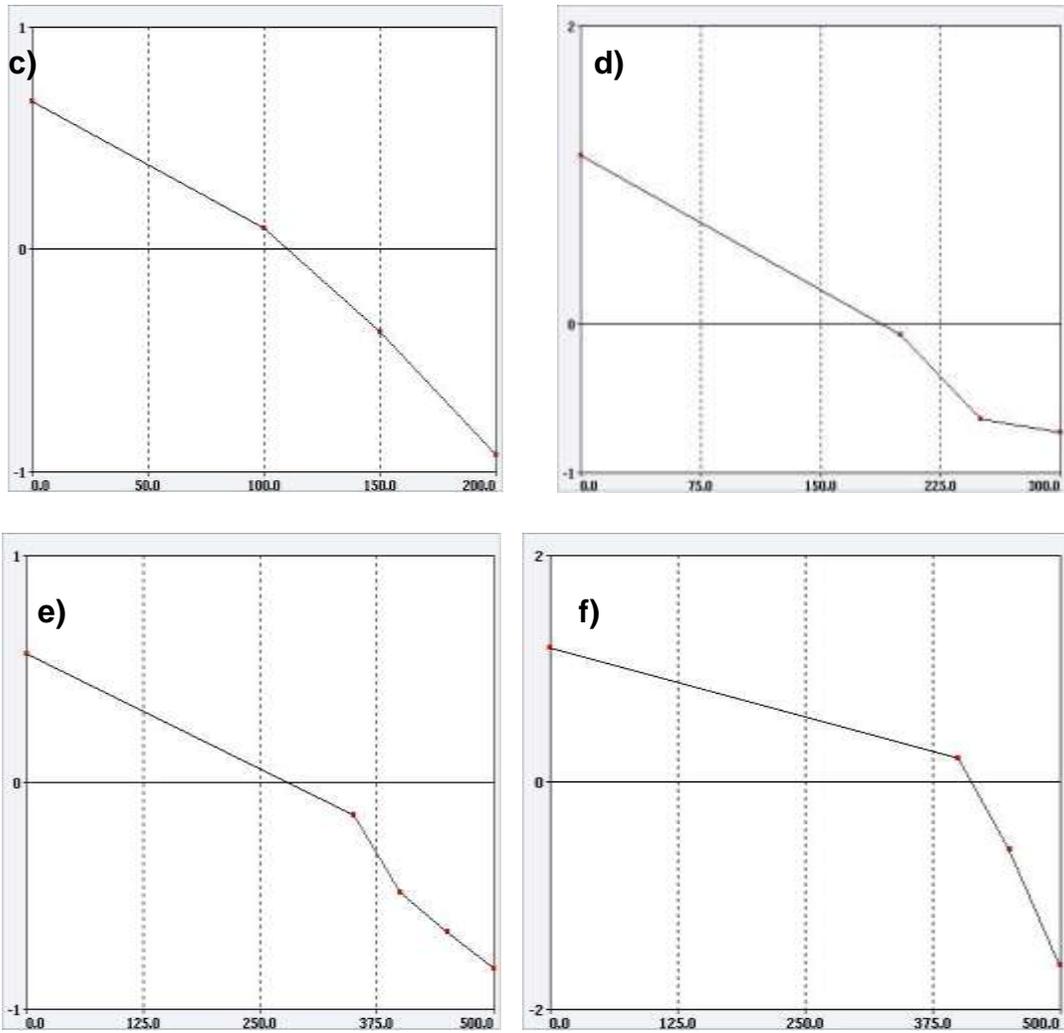


Figura 60. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BE a agricultura de temporal en el período 1986-2000; c) población analfabeta; d) población económicamente activa; e) población de 15-49 años; y f) proporción de viviendas con piso de tierra.

VARIABLES AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS QUE SE ASOCIAN A LOS CAMBIOS DE COBERTURA DEL BPE EN EL PERÍODO 1986-2000.

Transición Bosque de Pino-Encino (BPE) a Asentamientos Humanos

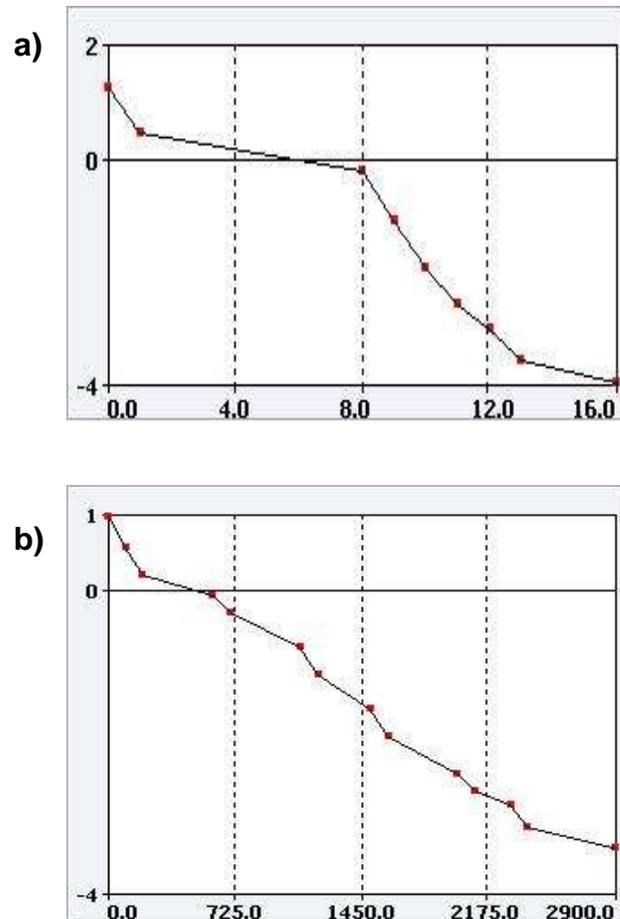


Figura 61. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BPE a asentamientos humanos en el período 1986-2000; a) pendiente; y b) distancia a localidades.

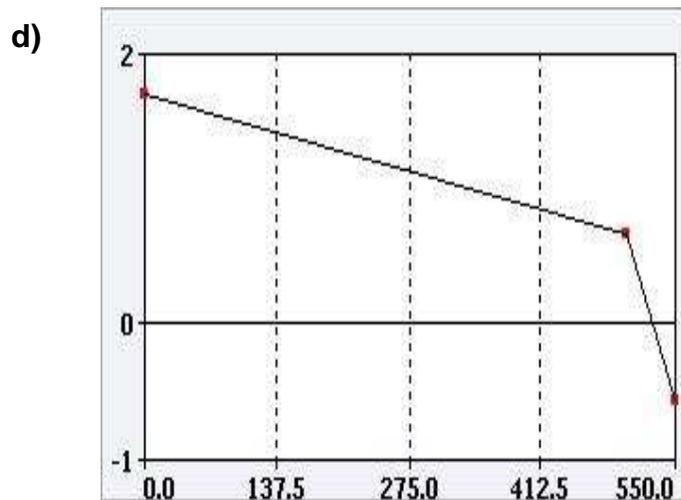
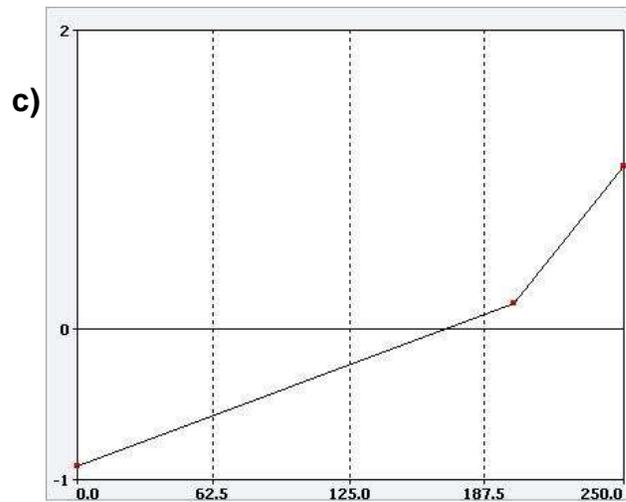


Figura 62. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BPE a asentamientos humanos en el período 1986-2000; c) población económicamente activa; y d) población masculina.

Transición Bosque de Pino-Encino (BPE) a Pastizal Inducido

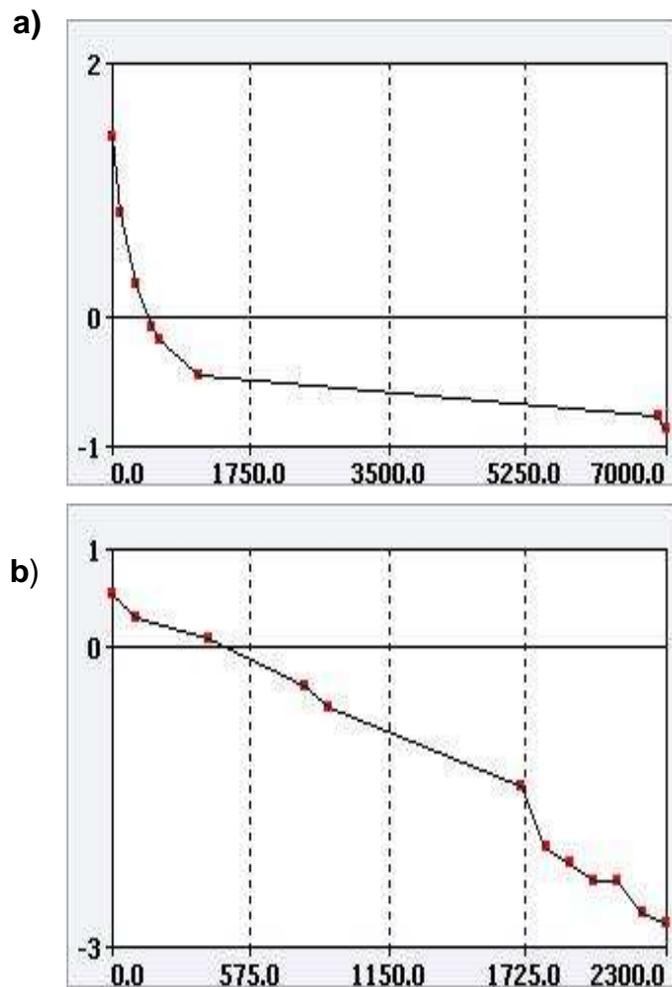
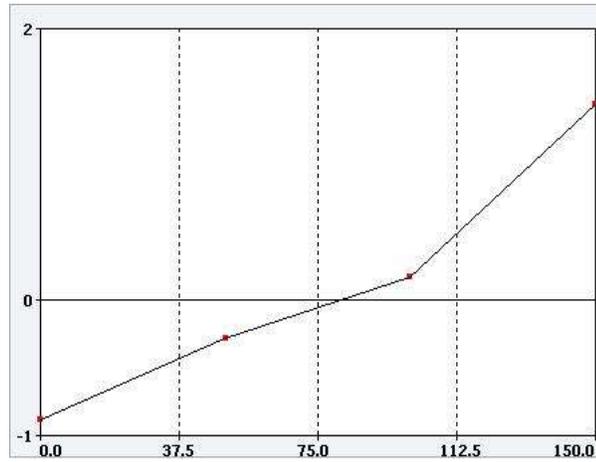


Figura 63. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BPE a pastizal inducido en el período 1986-2000; a) distancia a localidades, y b) distancia a ríos.

c)



d)

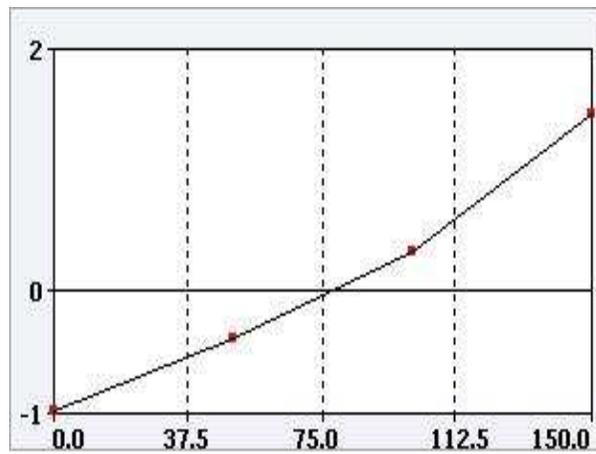


Figura 64. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BPE a pastizal inducido en el período 1986-2000; c) población analfabeta; y d) población económicamente activa.

VARIABLES AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS QUE SE ASOCIAN A LOS CAMBIOS DE COBERTURA DEL BTS EN EL PERÍODO 2000-2011

Transición Bosque Tropical Seco (BTS) a Asentamientos humanos

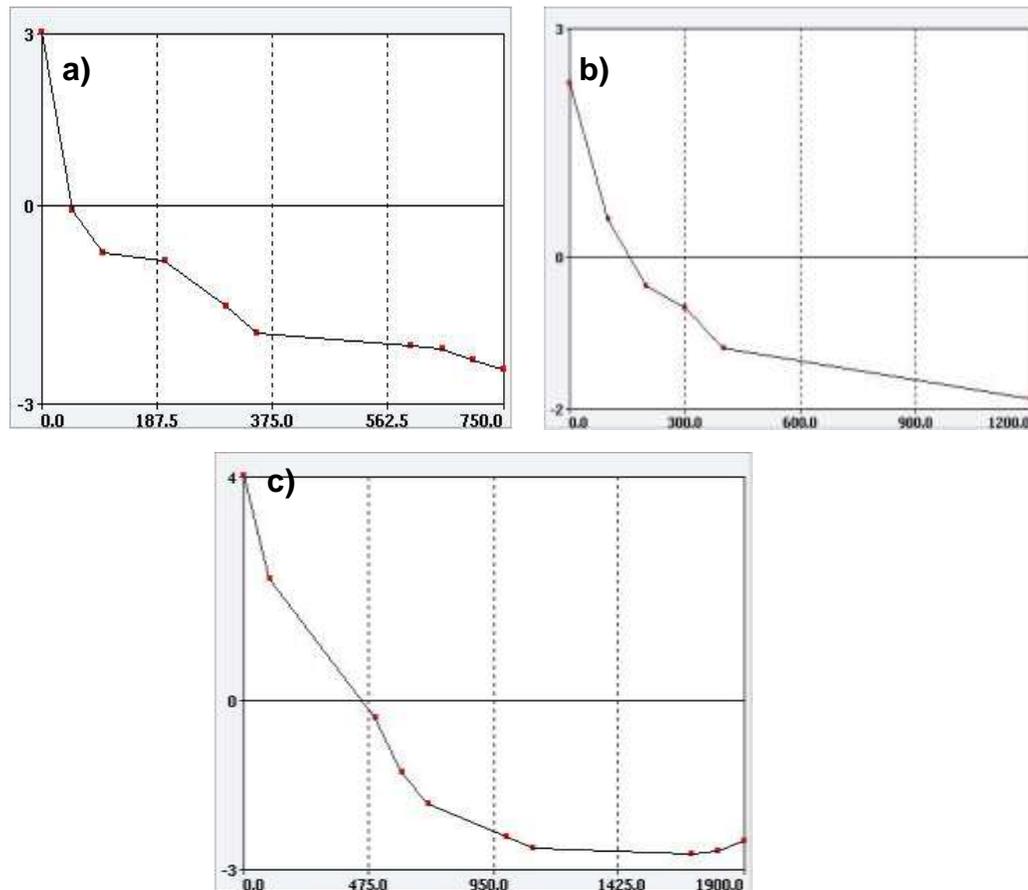


Figura 65. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BTS a asentamientos humanos en el período 2000-2011; a) altitud; b) distancia acarreteras; y c) distancia a localidades.

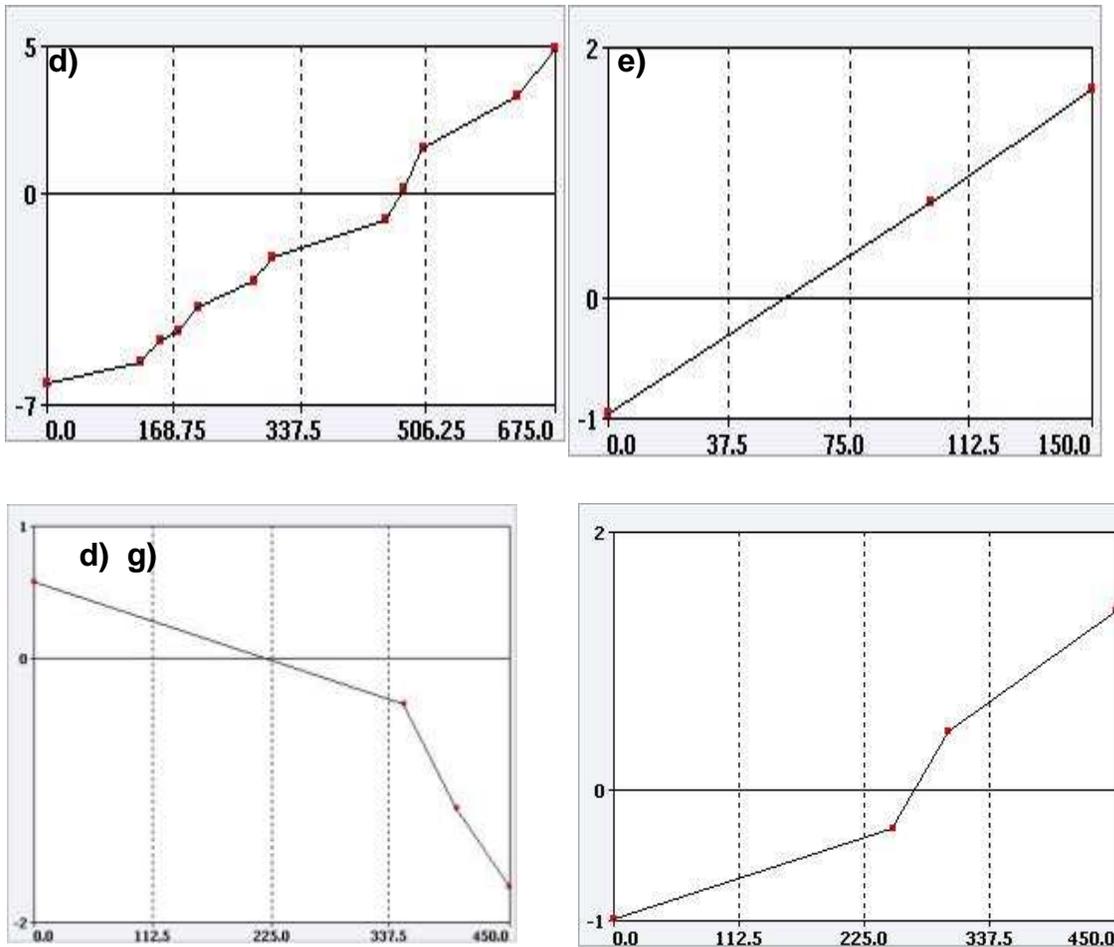


Figura 66. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BTS a asentamientos humanos en el período 2000-2011; d) población; e) población analfabeta; f) población con acceso a servicios de salud; y g) población económicamente activa.

Transición Bosque Tropical Seco (BTS) a Pastizal Inducido

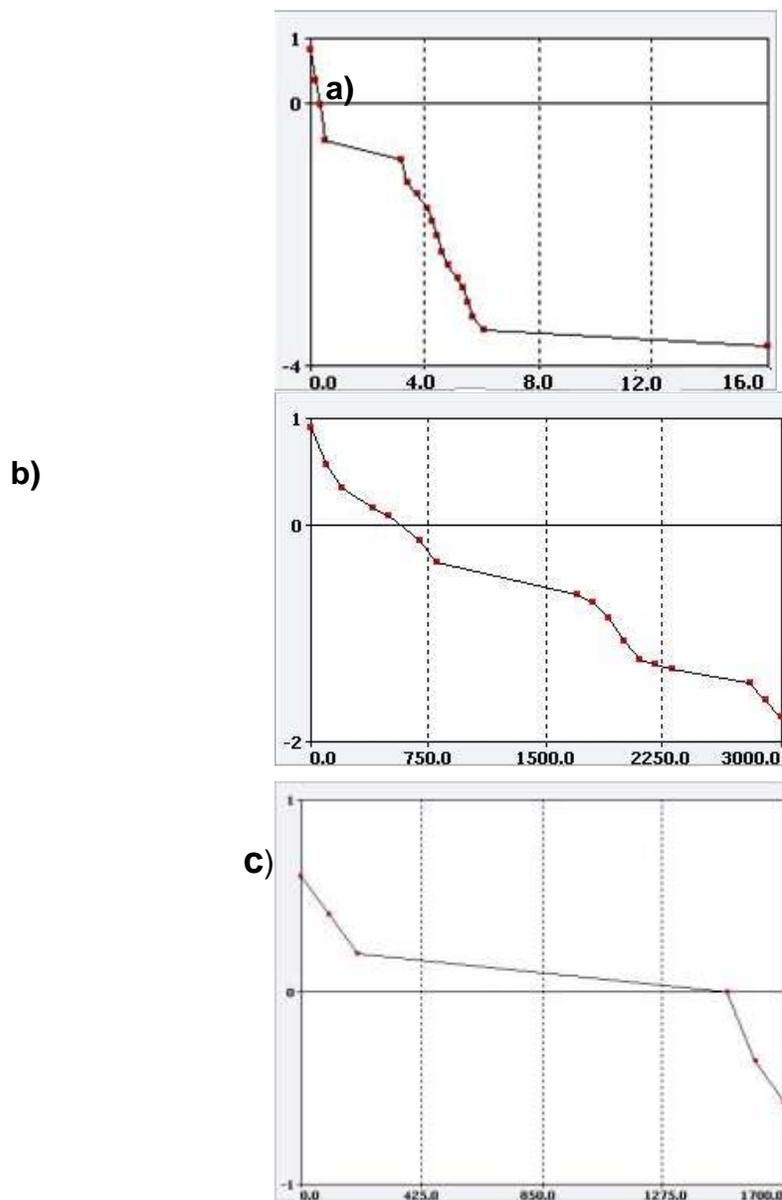


Figura 67. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BTS a pastizal inducido en el período 2000-2011; a) pendiente; b) distancia a carreteras; y c) distancia a localidades.

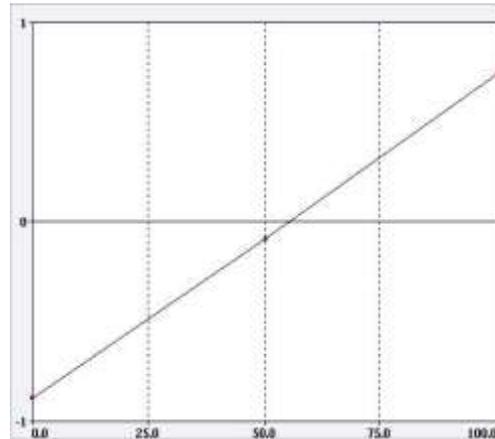
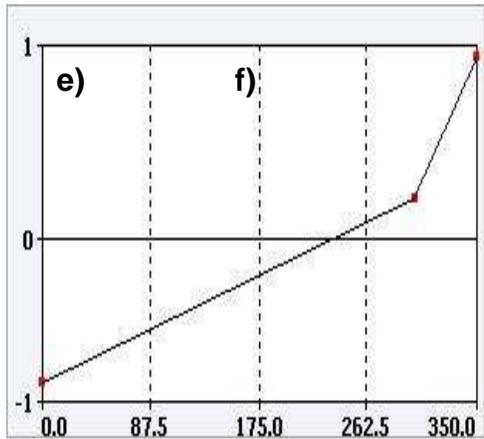
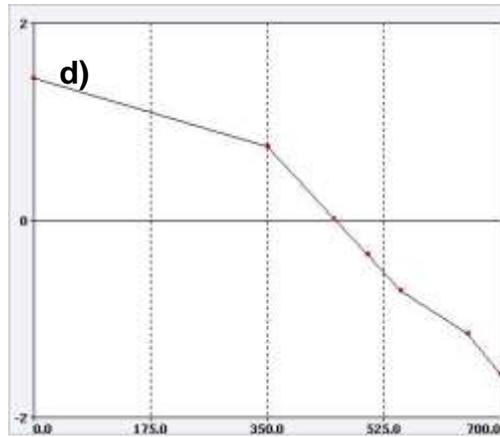


Figura 68. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BTS a pastizal inducido en el período 2000-2011; d) población con acceso a servicios de salud; e) población económicamente activa; y f) proporción de viviendas con piso de tierra.

Transición Bosque Tropical Seco (BTS) a Agricultura de temporal

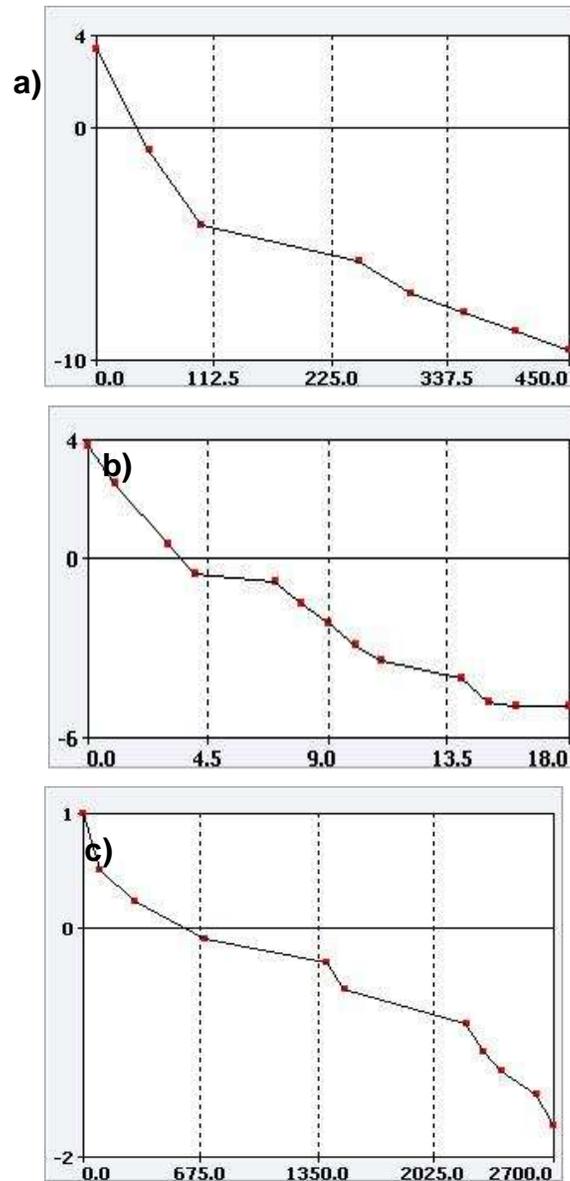


Figura 69. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BTS a agricultura de temporal en el período 2000-2011; a) altitud; b) pendiente; y c) distancia a localidades.

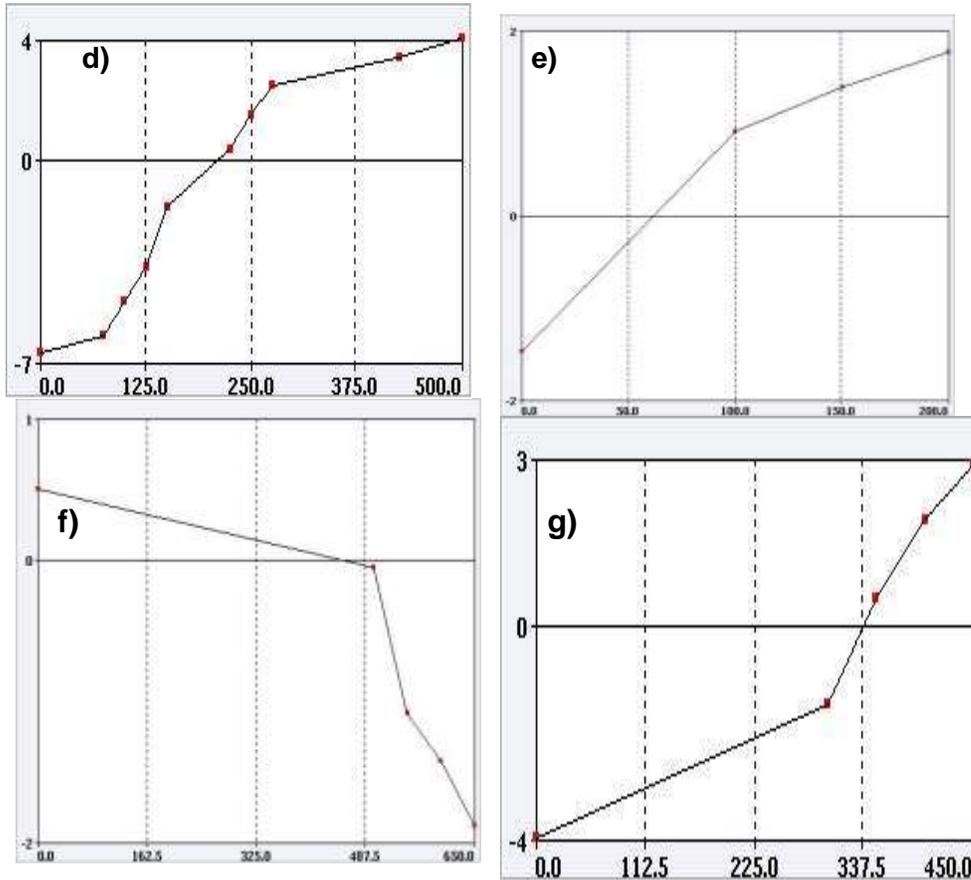


Figura 70. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BTS a agricultura de temporal en el período 2000-2011; d) población; e) población analfabeta; f) población con acceso a servicios de salud; y g) población económicamente activa.

VARIABLES AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS QUE SE ASOCIAN A LOS CAMBIOS DE COBERTURA DEL BE EN EL PERÍODO 2000-2011

Transición Bosque de Encino (BE) a Asentamientos humanos

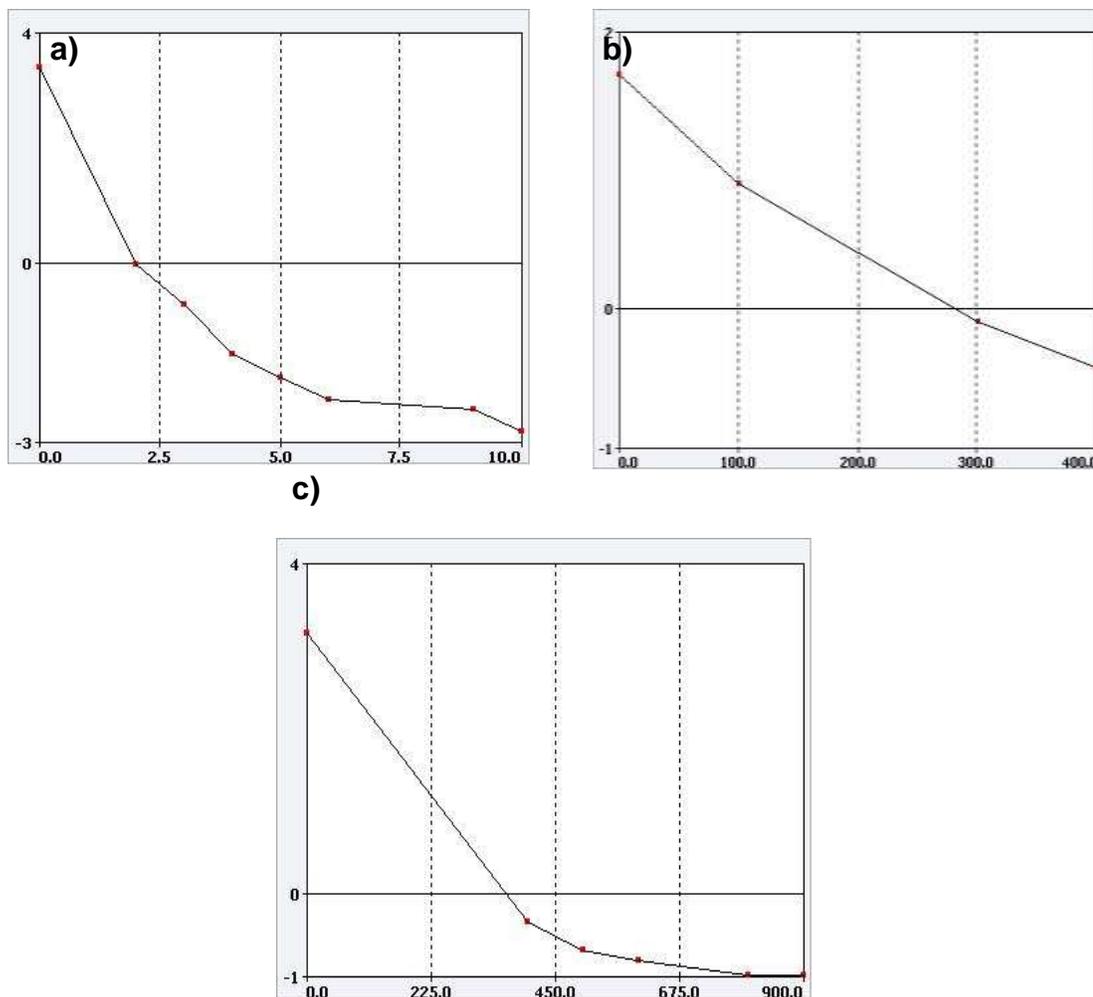


Figura 71. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BE a asentamientos humanos en el período 2000-2011; a) pendiente; b) distancia a carreteras; y c) distancia a localidades.

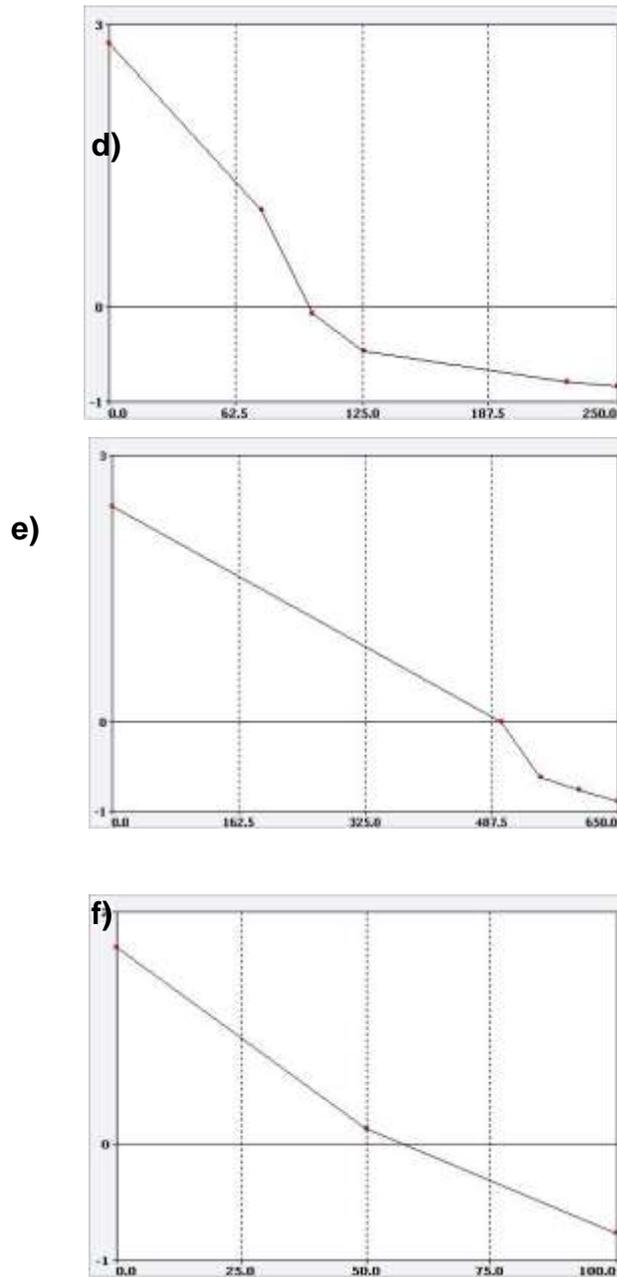


Figura 72. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BE a asentamientos humanos en el período 2000-2011; d) población; e) población con derecho a salud; f) proporción de viviendas con piso de tierra.

Transición Bosque de Encino (BE) a Pastizal inducido

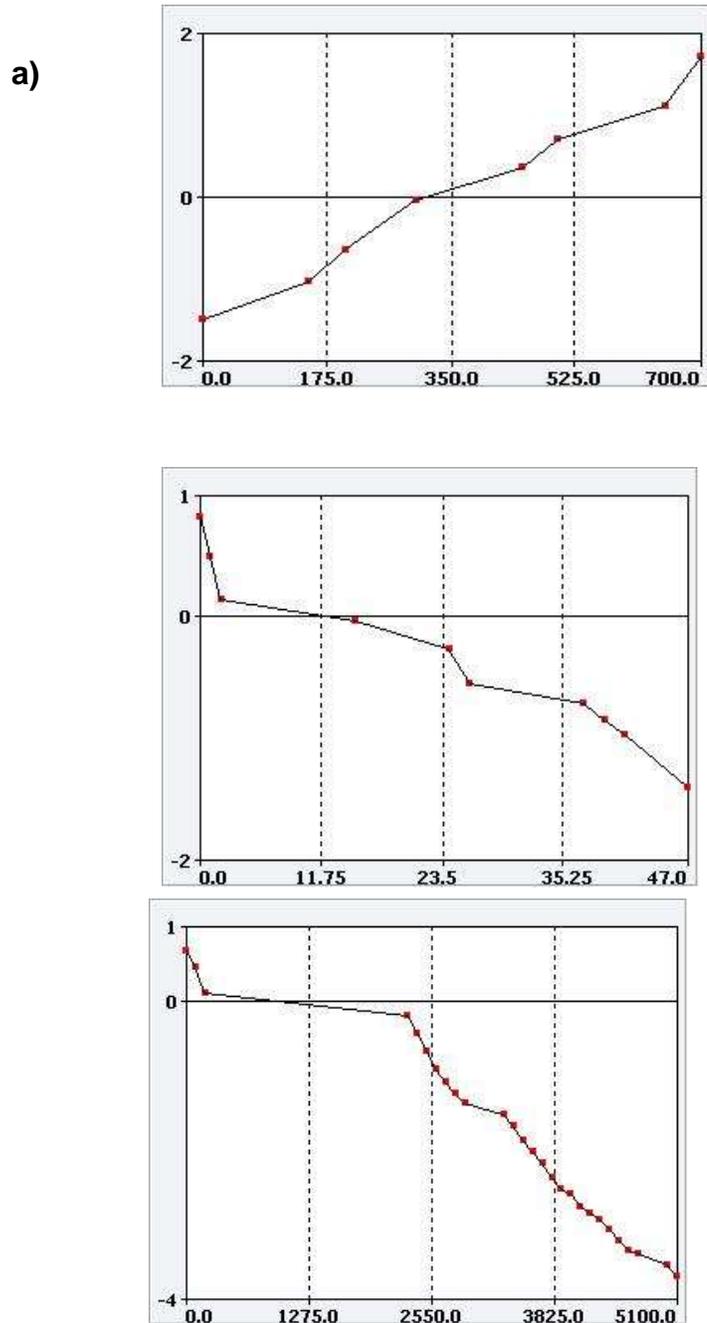


Figura 73. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BE a pastizal inducido el período 2000-2011; a) altitud; b)pendiente;b) distancia a localidades;y c) distancia a carreteras.

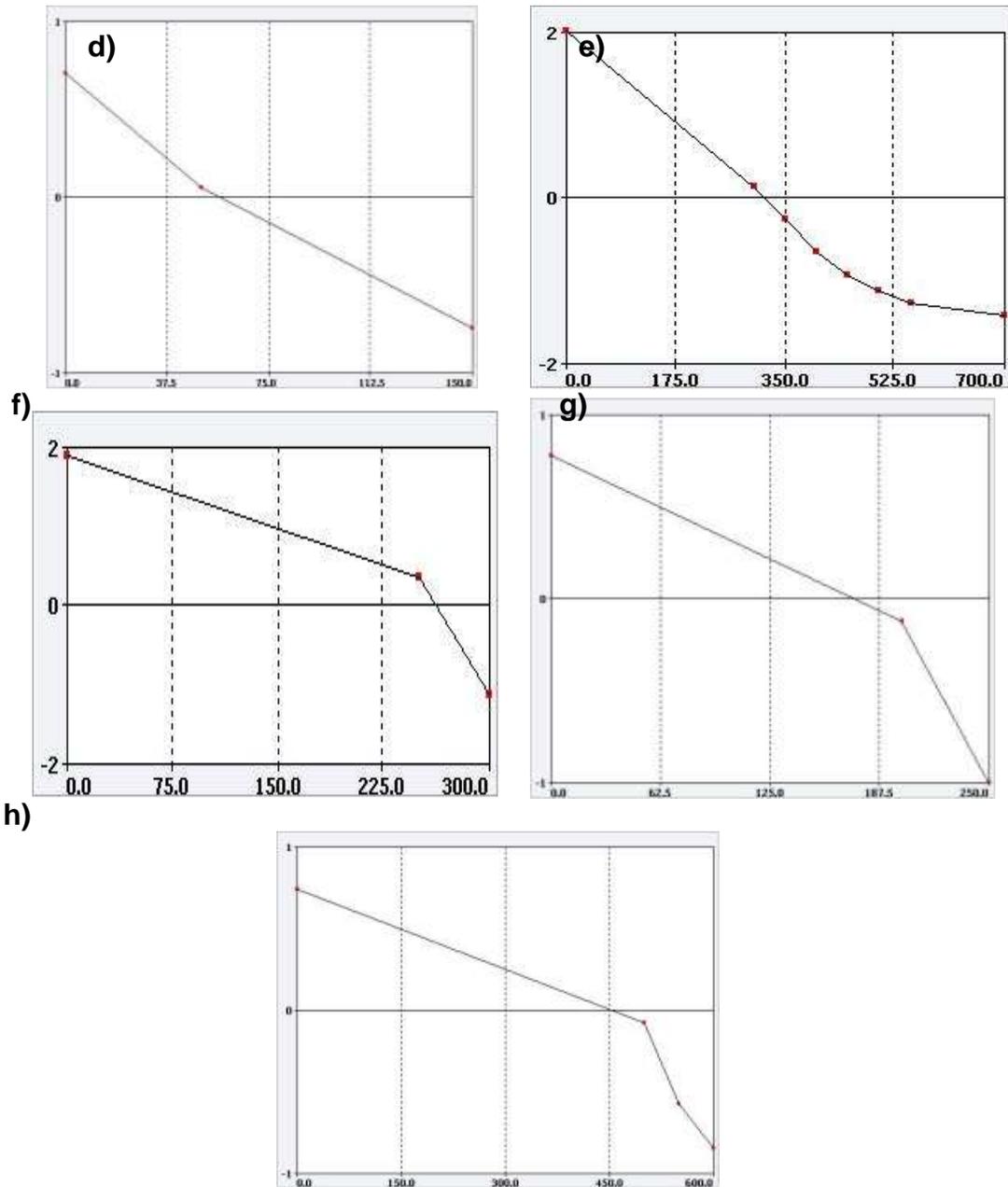


Figura 74. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BE a pastizal inducido el período 2000-2011; d) población analfabeta; e) población con acceso a servicios de salud; f) población económicamente activa; g) población de 15-49 años; y h) proporción de viviendas con piso de tierra.

Transición Bosque de Encino (BE) a Agricultura de temporal

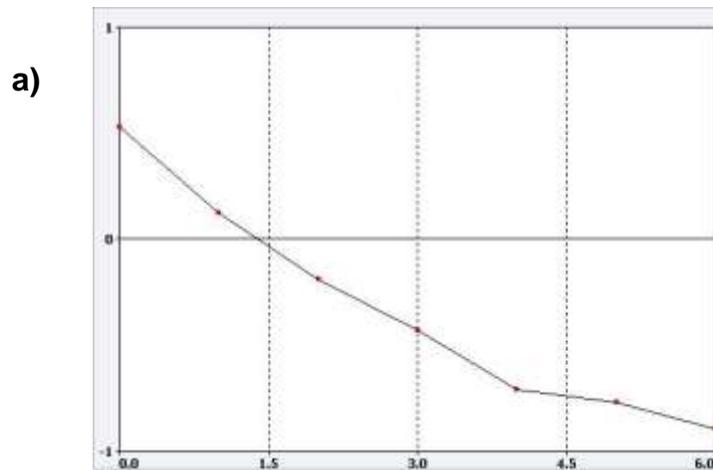


Figura 75. Pesos de evidencia para la variable ambiental que se asoció al cambio de cobertura de BE a agricultura de temporal el período 2000-2011; a) pendiente.

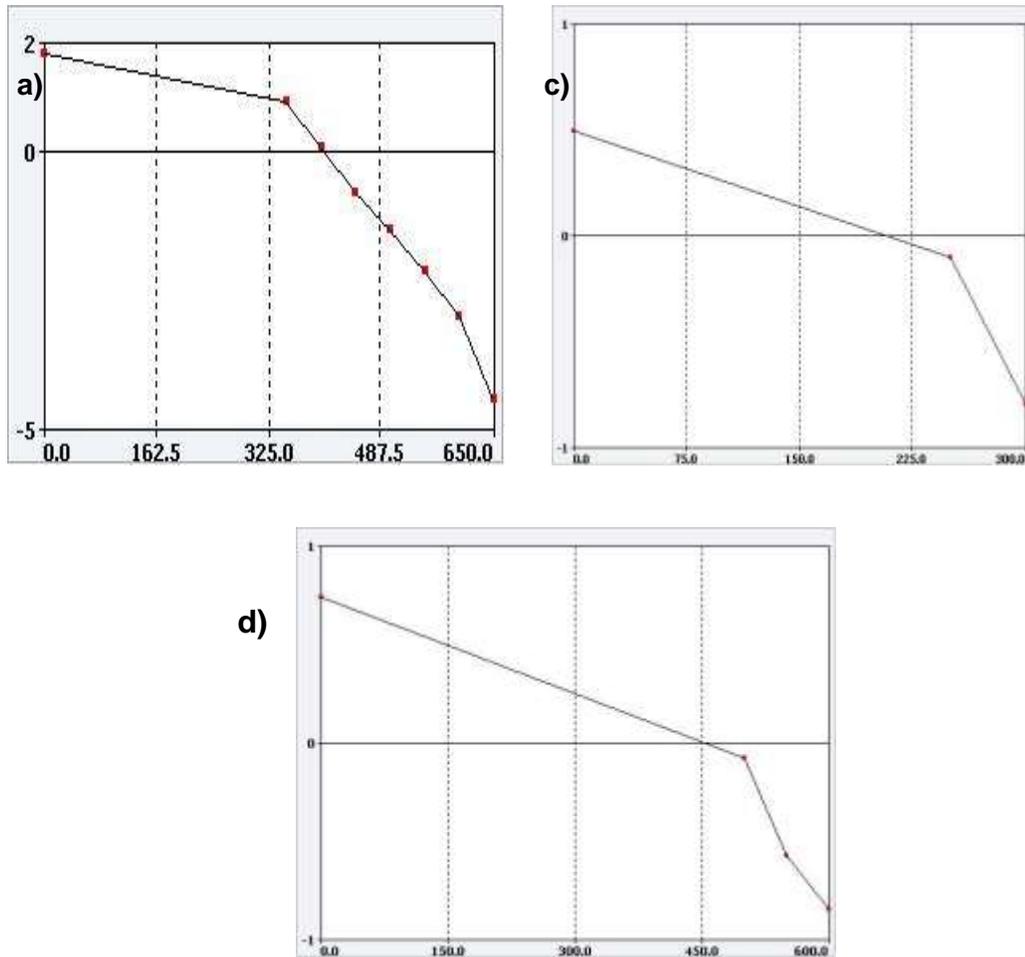


Figura 76. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BE a agricultura de temporal el período 2000-2011; c) población con acceso a servicios de salud; d) población económicamente activa; y e) población masculina.

VARIABLES AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICAS QUE SE ASOCIAN A LOS CAMBIOS DE COBERTURA DEL BPE EN EL PERÍODO 2000-2011

Transición Bosque de Pino-Encino a Asentamientos humanos

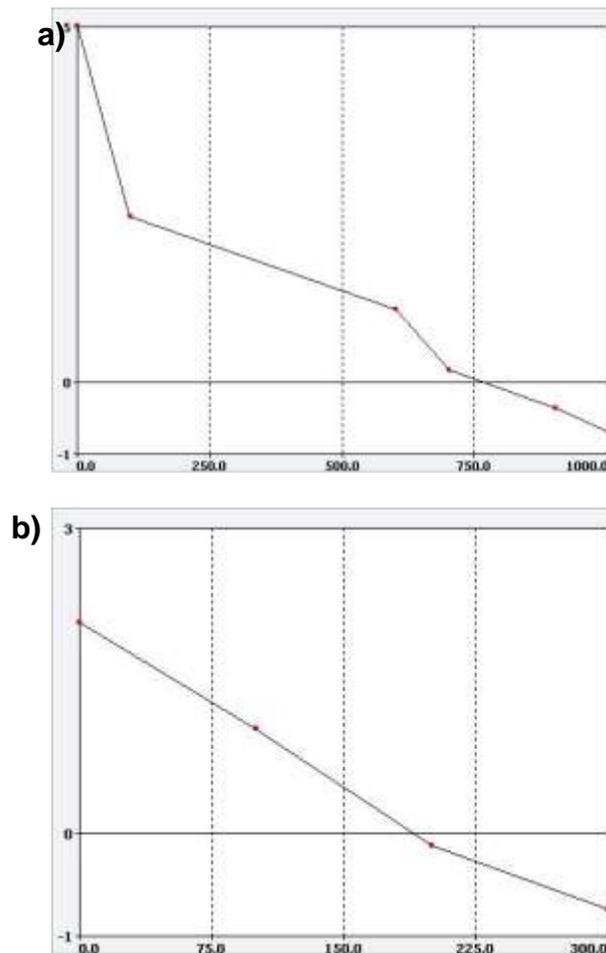
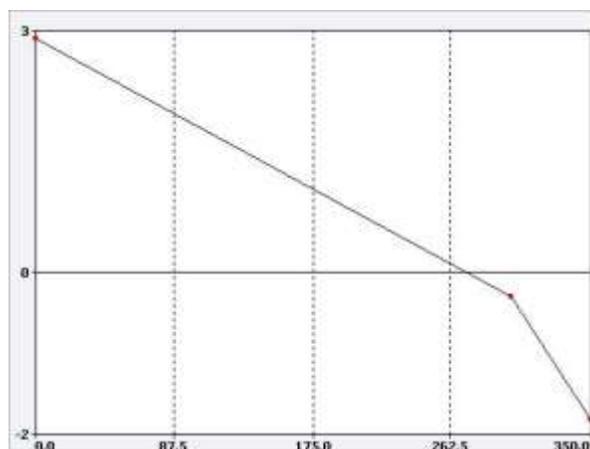


Figura 77. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BPE a asentamientos humanos el período 2000-2011; a) distancia a carreteras; y b) distancia a localidades.

c)



d)

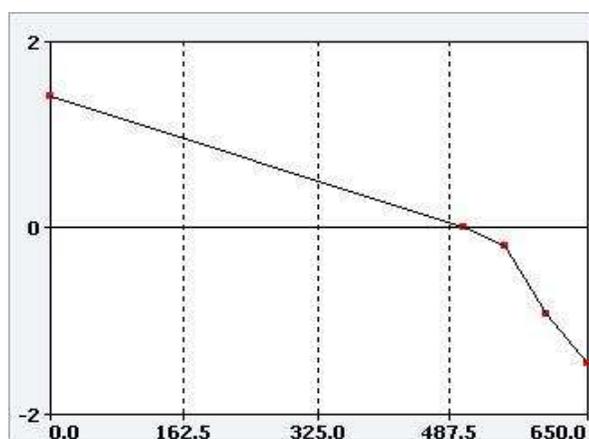


Figura 78. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BPE a asentamientos humanos el período 2000-2011; c) población económicamente activa; y d) población con acceso a servicios de salud.

Transición Bosque de Pino-Encino a Pastizal inducido

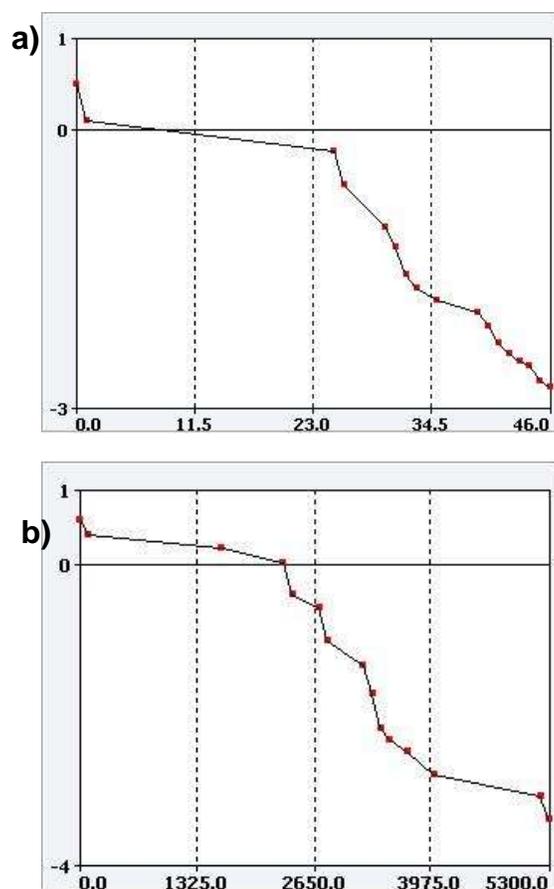


Figura 79. Pesos de evidencia para las variables ambientales que se asocian al cambio de cobertura del BPE a pastizal inducido en el período 2000-2011; a) pendiente; b) distancia a localidades.

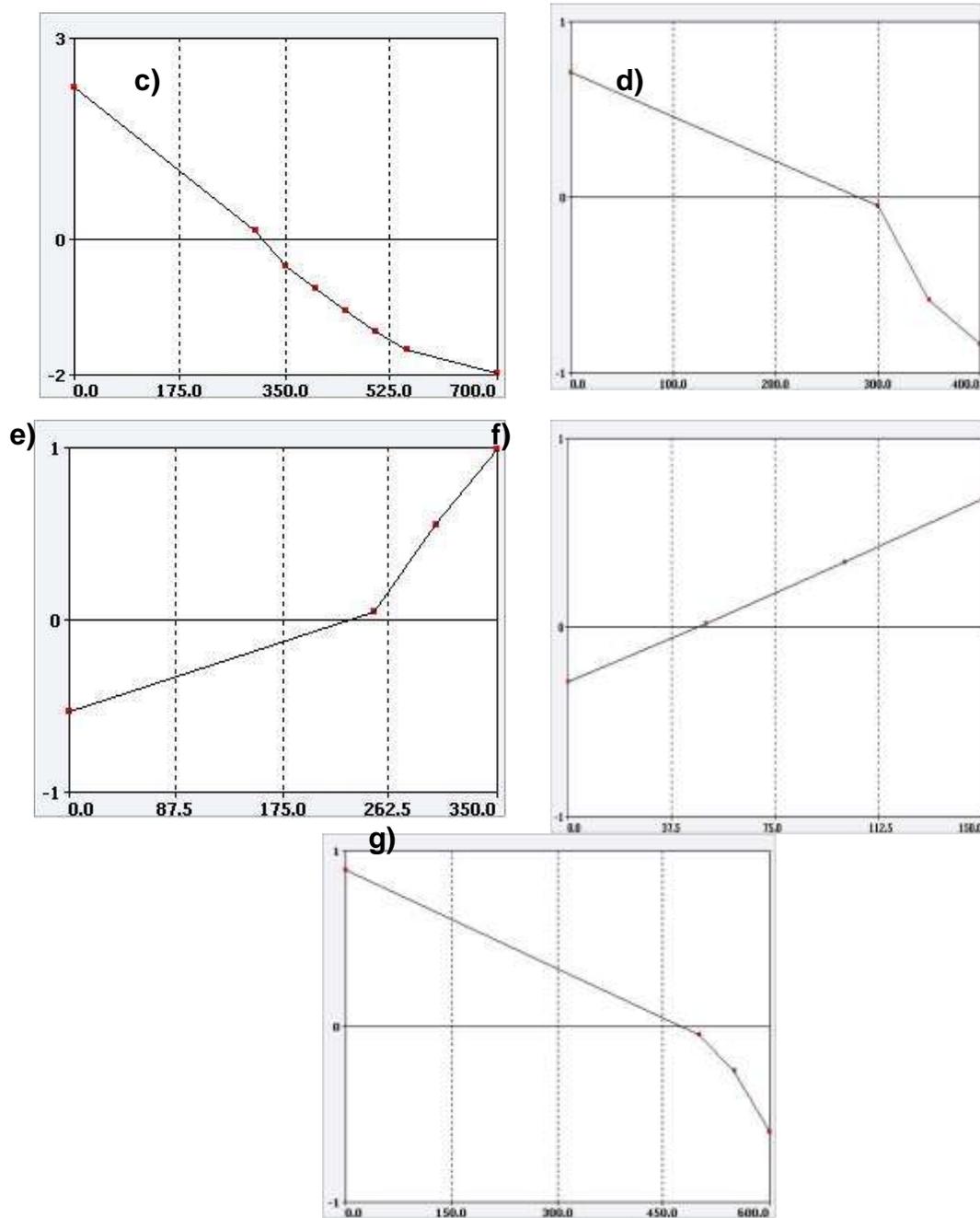


Figura 80. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BPE a pastizal inducido el período 2000-2011; c) población con acceso a servicios de salud; d) población económicamente activa; e) población de 15-49 años; f) proporción de viviendas con piso de tierra; y g) población masculina.

Transición Bosque de Pino-Encino a Agricultura de temporal

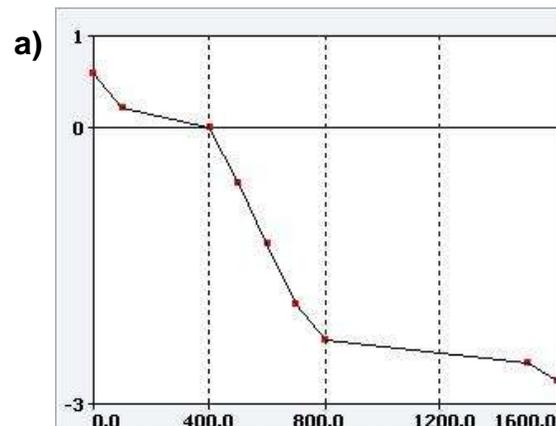


Figura 81. Pesos de evidencia para la variable ambiental que se asocia al cambio de cobertura del BPE a agricultura de temporal el período 2000-2011; a) distancia a ríos.

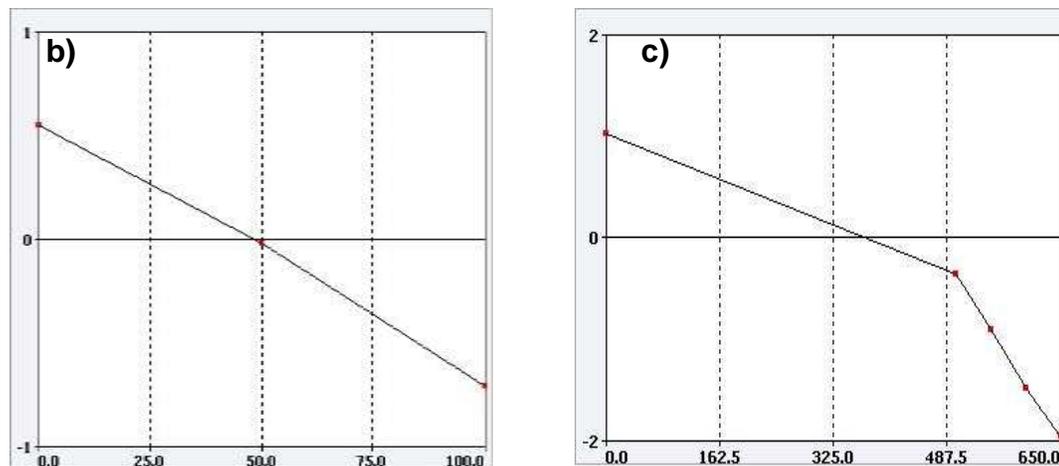


Figura 82. Pesos de evidencia para las variables socioeconómicas que se asocian al cambio de cobertura del BPE a agricultura de temporal el período 2000-2011; b) proporción de viviendas con piso de tierra; c) población con acceso a servicios de salud.