

## **MODELO DE DEFORESTACIÓN PARA EL ESTADO DE CHIAPAS.**

### **Informe final**

Preparado por:

Miguel Ángel Castillo Santiago

Laboratorio de Análisis de Información Geográfica y Estadística (LAIGE)

El Colegio de la Frontera Sur

Tel: 9676749000 ext 1854

Email: [mcastill@ecosur.mx](mailto:mcastill@ecosur.mx)

## Introducción

La pérdida de la cobertura arbórea genera impactos a diferentes escalas, a nivel local generalmente disminuye la oferta de bienes y servicios del bosque. Es una de las causas directas de la pérdida de biodiversidad. La degradación de suelos, la pérdida de habilidad de los sistemas biológicos para soportar las necesidades humanas, el incremento en la vulnerabilidad de regiones en situaciones de perturbaciones climáticas, son también repercusiones de la disminución de la cobertura forestal (Lambin et al. 2003).

A nivel global se altera el clima mediante la modificación del albedo y de los intercambios de energía entre la superficie y la atmósfera. Se alteran las tasas de evapotranspiración. También se modifica el ciclo global del carbono debido a la disminución en los reservorios y áreas de captura (Lambin et al 2003). La deforestación y algunos cambios en la cobertura del suelo liberan carbono a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), pero la recuperación de bosques en tierras abandonadas, captura el CO<sub>2</sub> de la atmósfera reteniéndolo en forma de biomasa.

La cuantificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a cambios en la cobertura o cambios en el uso de la tierra, representa el componente con más incertidumbre en el estudio del ciclo global de carbono (Ramankutty et al. 2007). Las causas principales de dicha incertidumbre, son la carencia de estimaciones precisas sobre las extensiones actuales de bosque, y sus respectivas tasas de cambio. Pero sobre todo, la carencia de métodos de estimación precisos en grandes áreas de los contenidos de biomasa de los bosques, especialmente de los bosques tropicales (Houghton et al. 2001, Saatchi et al. 2007).

Con respecto a las estimaciones de la extensión que ocupan los bosques, existen problemas conceptuales (tales como la definición lo que es o no bosque), metodológicos (por ejemplo como distinguir las áreas forestales), y hasta los operativos como las dificultades que implica el manejo de grandes cantidades de datos cuando se trabaja sobre extensiones amplias. Por lo que persisten aún muchos errores en la cuantificación de la cobertura forestal y la dinámica de cambio.

En este informe se presenta un análisis geográfico sobre la deforestación en el estado de Chiapas en el período 1993 a 2007, así como un escenario prospectivo.

## Métodos

Para el análisis de la deforestación, se emplearon como información base los mapas de cobertura y uso del suelo del INEGI series 2, 3 y 4 en escala 1:250,000 los cuales corresponden a los años 1993, 2002 y 2007 respectivamente. Las leyendas de los mapas fueron recodificadas para generar clases generales y comparables. La recodificación se realizó a dos niveles, en el primer nivel se reagruparon las tipos de vegetación en 12 grupos de cobertura del suelo y en un siguiente nivel solo se definieron dos grandes clases, bosque y no bosque. El primer nivel se empleó para describir los tipos de cambio y en agrupamiento con solo dos clases se empleó como insumo principal para el modelo de deforestación.

Adicionalmente se obtuvieron bases socioeconómicas y del medio físico que se emplearon en el estudio de los factores relacionados con la deforestación. Las bases geográficas disponibles para el análisis fueron: Censos de población y vivienda de 1990 y 2000 (INEGI), Conteos de población de 1995 y 2005 (INEGI), Censo agrícola y ganadero de 1991 y 2007 (INEGI), Censo ejidal 2007 (INEGI), Marco geoestadístico municipal 2005 versión 1(INEGI), Caminos en escala 1:50,000 (INEGI), Tenencia de la tierra (PROCEDE), Áreas naturales protegidas 2003 (CONANP), Cobertura y uso del suelo series 2,3 y 4 (INEGI), modelo digital de elevaciones 1:50,000, Edafología 1:250,000 (INEGI), Efectos climáticos 1:250,000 (INEGI), Subcuencas 1:1,000,000 (CONABIO), Unidades del paisaje (PEOT Chiapas), Morfo-edaforología (PEOT Chiapas), escurrimientos superficiales (INEGI).

También se digitalizó la red de caminos para la mayor parte del estado en base a imágenes de satélite SPOT5 pancromáticas ortocorregidas del año 2009 (resolución espacial 2.5 m).

Todas las bases geográficas fueron transformadas a una misma proyección de referencia (UTM zona 15, datum WGS84) y recortadas de acuerdo a los límites del área de estudio.

### **Área de estudio.**

El estado de Chiapas se encuentra ubicado al sureste de México, entre los 14 y 18 grados de latitud norte y 90 y 94 grados de longitud oeste. Colinda al oeste con Guatemala; al este con los estados de Oaxaca y Veracruz, y al norte con Tabasco. Abarca una superficie de 7,289,600 ha<sup>1</sup>, de acuerdo al marco geoestadístico municipal de INEGI del año 2005 versión 1 (se excluyen de estos límites las áreas en conflicto -o áreas pendientes por asignar como se denomina en la terminología de este instituto). Junto con el vecino estado de Oaxaca representan una de las regiones de mayor diversidad biológica del país. Su posición geográfica, así como su variada topografía son algunas de las razones que explican este hecho. La Figura 1, muestra la variedad de los grupos climáticos identificados para el Estado, mismos que también guardan relación con la riqueza de tipos de vegetación presentes.

---

<sup>1</sup> Los resultados de los análisis pueden arrojar pequeñas variaciones en esta superficie debido a diferencias en los límites, en la escala de las capas analizadas, o a errores de redondeo.

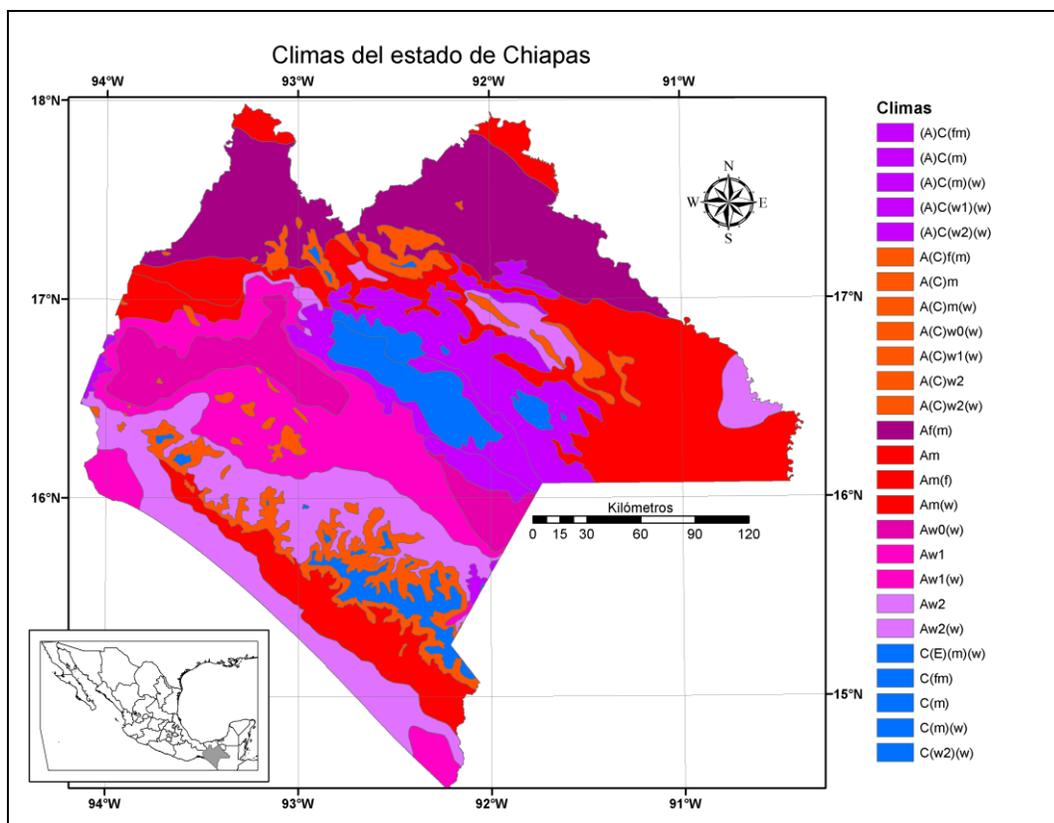


Figura 1. Grupos climáticos para el estado de Chiapas. Fuente: Carta de Climas, INEGI, escala 1:1,000,000

### Regiones para el análisis de la deforestación.

Después de una revisión las bases disponibles para la regionalización de los procesos de cambio de uso del suelo, analizaron tres mapas basados en criterios socioeconómicos y administrativos, y dos más basados en características del paisaje. Los del primer grupo son: un mapa de lugares centrales o UTBs, una base geográfica de los tipos de tenencia de la tierra y otra de las áreas naturales protegidas (ANPs). Los mapas de rasgos físico-ambientales fueron, la base geográfica de regiones ecológicas y en el mapa de la fisiografía del estado.

**UTBs.** La regionalización basada en lugares centrales tiene como unidad mínima a los municipios. Las regiones o grupos de municipios corresponden a las Unidades Territoriales Básicas (UTB), esta regionalización fue empleada como punto de partida para el análisis del funcionamiento social a nivel territorial en el Programa de Ordenamiento Territorial del Estado de Chiapas (SEDESOL, 2000). Estas UTB denominadas también regiones funcionales, *hinterland*, áreas de mercado, áreas tributarias, áreas de influencia, áreas complementarias, entre otras acepciones, sintetizan los aspectos de jerarquía urbana, funciones y vínculos funcionales entre los asentamientos y su entorno, y se fundamentan en la teoría de los lugares centrales (Gutiérrez, 1992).

La delimitación de de dichas unidades espaciales tuvo como base la asociación analítica de los siguientes componentes: La geomorfología desde el punto de vista del soporte natural y marco

físico de referencia para el asentamiento de los seres humanos y el desarrollo de actividades productivas, así como el usufructo de servicios. De la red de asentamientos humanos como lugares con usos-destino de predios diferenciales y una base económica determinada, en la que adquiere gran importancia el equipamiento. Y por último de la red de comunicaciones terrestres y fluviales que permiten la vinculación entre esos asentamientos y, consecuentemente, el flujo de bienes y servicios, de los que no quedan al margen los aspectos culturales.

De acuerdo a esta propuesta se agruparon los 118 municipios en 14 regiones sociales (Fig 1) integradas de la siguiente manera: Altos (17), Centro (16), Chol (4), Costa (7), Frailesca (5), Fronteriza (8), Marqués de Comillas (2), Maya (4), Montañas (7), Norte (13), Selva (4), Soconusco (12), Zoque (9).

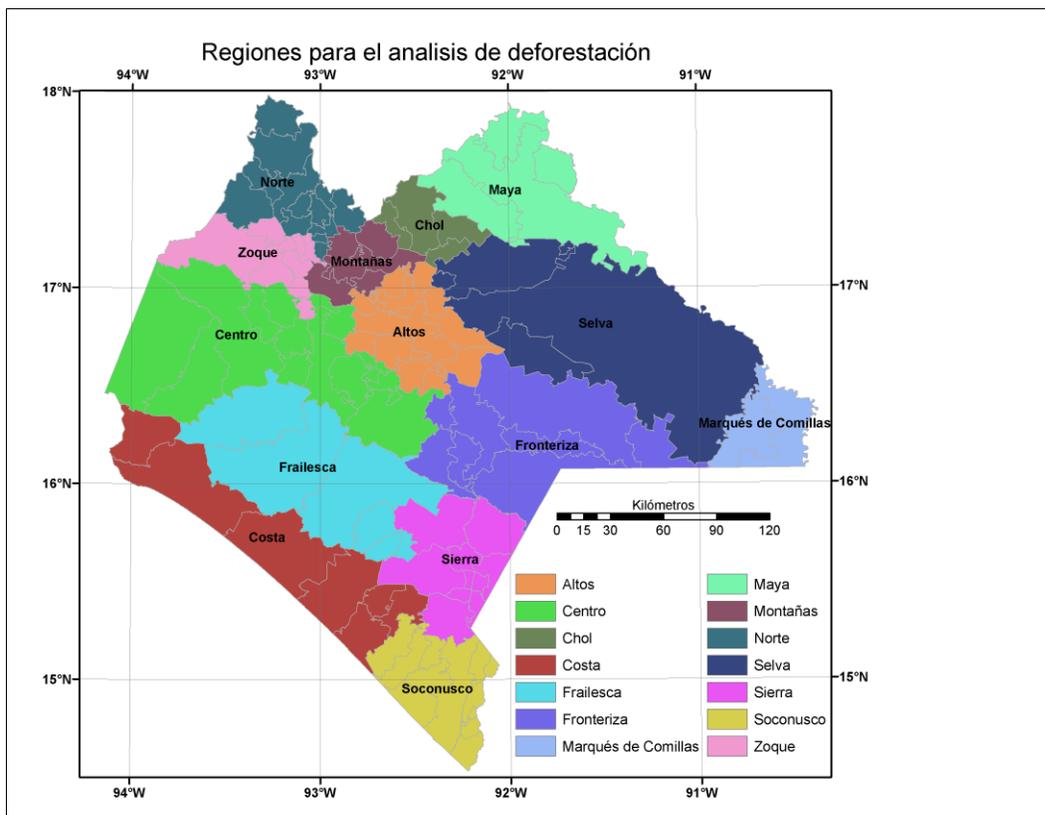


Figura 2. Regiones para el análisis de la deforestación. Unidades Territoriales Básicas (fuente: PEOT)

**Tenencia de la tierra.** El mapa de los tipos de tenencia de la tierra fue elaborado por el RAN. Esta base presentaba un avance parcial de aproximadamente un 85%, en el 15% restante no se contó con información sobre el tipo de tenencia, por lo que solo se trabajó en las áreas con datos. Se recodificaron los tipos de tenencia para trabajar con solo tres clases: propiedad privada, propiedad social (ejidos y comunidades) y otros en el que incluía zonas federales.

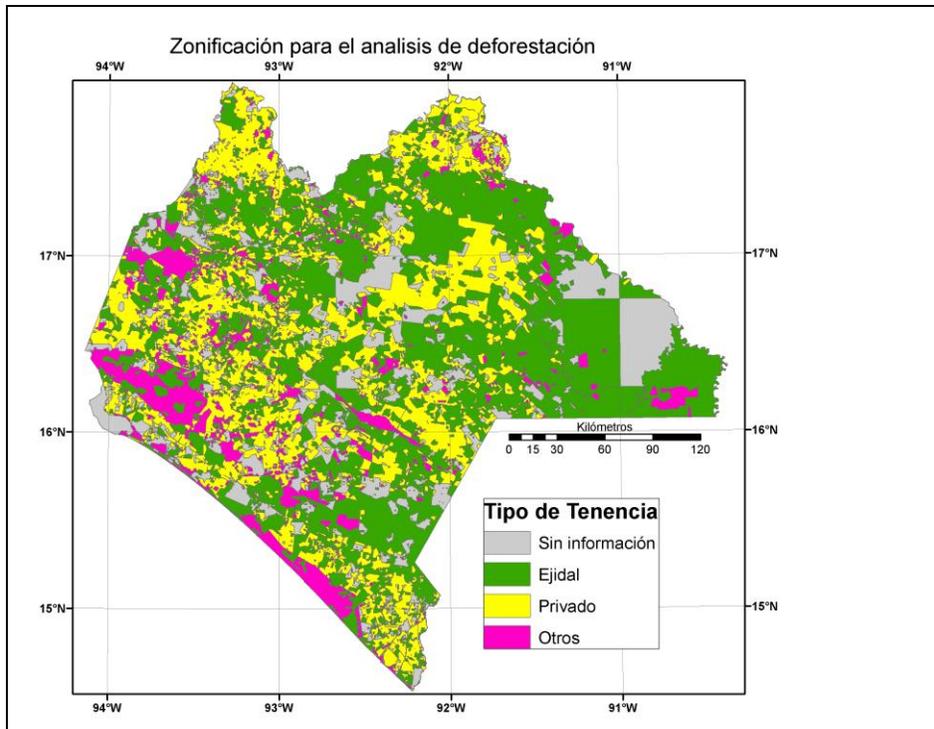


Figura 3. Mapa de los tipos de tenencia para el estado de Chiapas (Fuente: RAN)

**Estatus de protección.** El mapa de Áreas Naturales Protegidas (ANPs) elaborada por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) en su versión 2003, incluye 17 reservas que abarcan una superficie de 990,343 ha. Siendo en base a su extensión las mas representativas Montes Azules (327,946 ha), La Sepultura (167,311 ha), La Encrucijada (144,872 ha), El Triunfo (119, 183 ha), El Ocote (101,289 ha) y Lacantun (63,365 ha). Las once restantes presentan extensiones menores a los 24,000 ha, la mas pequeña de ellas es Playa de Puerto Arista con solo 62.6 ha (aunque en este caso no mantiene una cobertura arbórea).

Por la forma en que se han concebido las ANPs en México, estas incluyen también poblaciones humanas en su interior, en el caso de Chiapas, las 17 ANPs contienen aproximadamente 995 localidades con mas de tres viviendas que suman una población superior a los 55,000 habitantes, de acuerdo al censo de población y vivienda del año 2000.

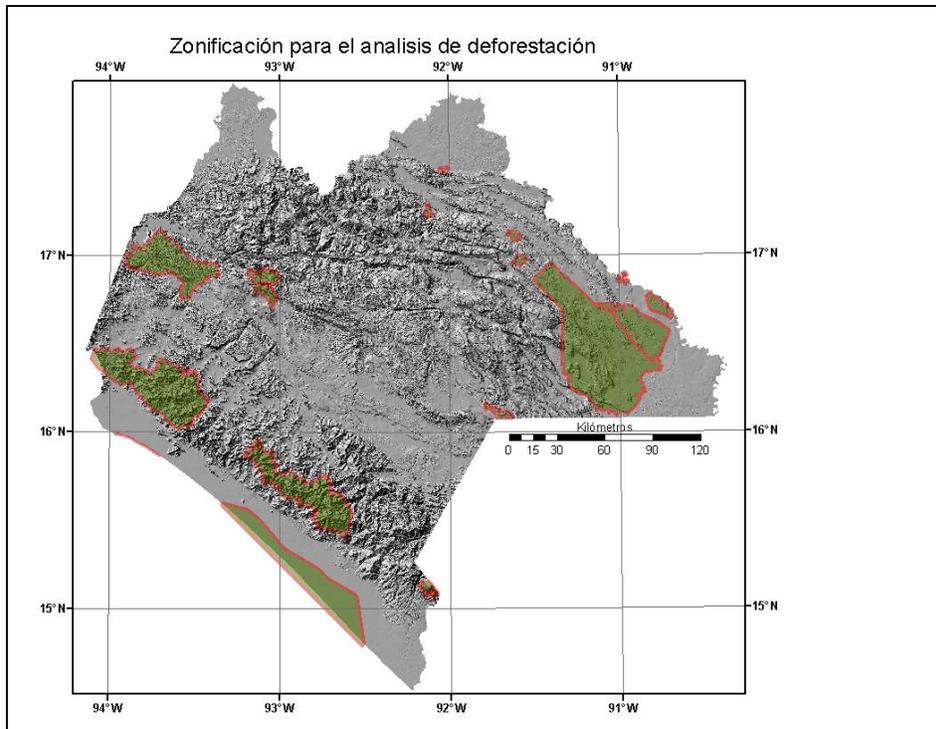


Figura 4. Ubicación de las Áreas Naturales Protegidas sobre modelo de sombras (fuentes: CONANP e INEGI)

**Zonificación ecológica.** Esta zonificación corresponde a una de los mapas elaborados para el Programa Estatal de Ordenamiento Territorial (Vazquez et al., 2005). Su elaboración tomó como insumo el mapa de vegetación potencial (INEGI) y el de tipos de vegetación y usos del suelo serie 1. Se clasifica el Estado en zonas ecológicas tomando como criterio principal a la vegetación actual o potencial del un sitio como indicador de una región ecológica. Para el estado de Chiapas se definen cinco zonas ecológicas (ver Figura 5): cálido húmeda, cálido subhúmeda, templado húmeda, templado subhúmeda y húmedales; las zonas de exclusión, no consideradas para el análisis corresponde principalmente a cuerpos de agua naturales y artificiales.

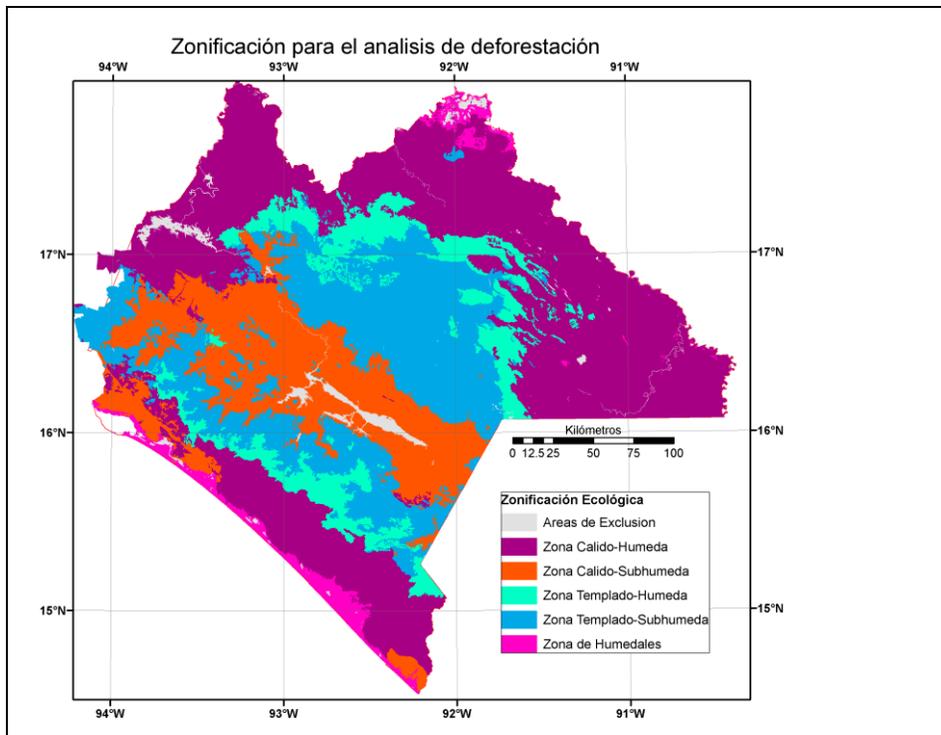


Figura 5. Zonas para el análisis de la deforestación, zonas ecológicas (fuente: PEOT)

**Fisiografía.** Se empleó para este fin, el mapa de regiones fisiográficas de INEGI escala 1:1,000,000. Se agruparon los sistemas terrestres en clases generales para reflejar únicamente propiedades del relieve. Estas clases fueron llanuras, lomeríos, mesetas, sierras y valles. El propósito fue identificar la existencia de patrones de deforestación de acuerdo a las características del relieve.

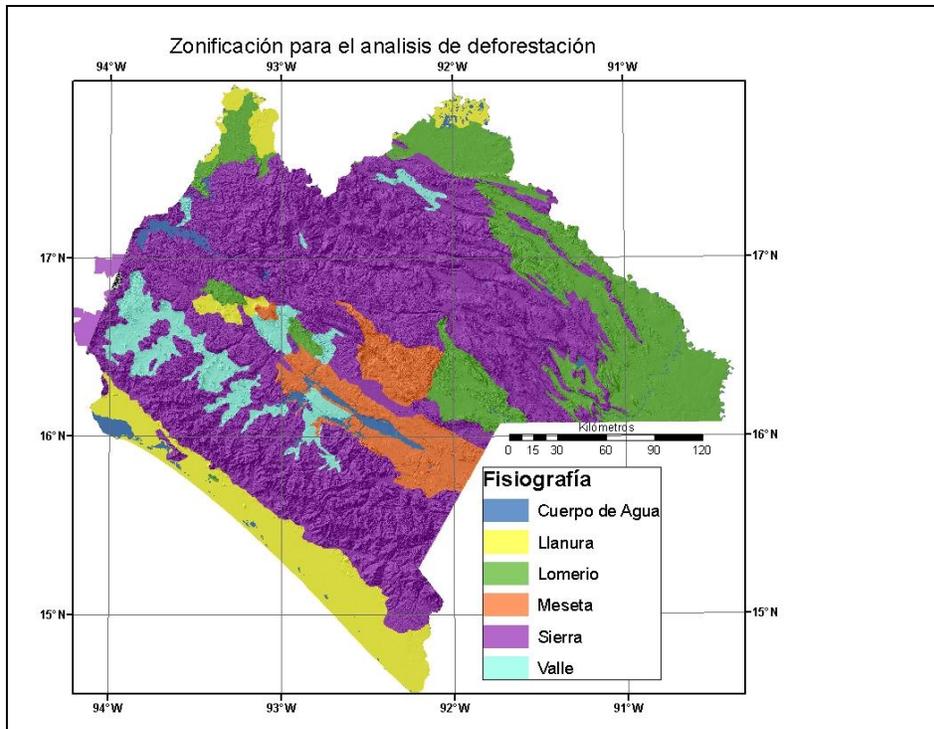


Figura 6. Clases fisiográficas sobre modelo de sombras (fuente: INEGI)

**Tipo de bosque.** La deforestación no se presenta de forma indistinta entre los diferentes tipos de bosques; de acuerdo a los análisis exploratorios, los bosques secundarios o perturbados fueron aquellos que presentan mayores tasas de cambio. Por lo que se exploró también sus posibilidades como una variable independiente en el modelo de regresión logística. Solo se consideraron dos clases en función al grado de modificación antrópica, bosques perturbados y bosques no perturbados.

### Variables cuantitativas.

Se analizaron dos tipos de variables cuantitativas, un grupo referente a la densidad poblacional y un conjunto de medidas que representan una medida de accesibilidad al recurso. Con respecto al primer grupo, se elaboraron mapas de densidad poblacional usando como base los censos de población y vivienda de 1990 y 2000.

Las medidas de accesibilidad al recurso fueron pendiente del terreno, distancia a caminos, distancia a poblados y distancia a zonas agrícolas o zonas previamente transformadas. Las pendientes del terreno se derivaron de un modelo digital de elevaciones en escala 1:50,000. Se calculó la pendiente en grados y se trabajaron los datos de forma desagrupada y en clases de 3 grados cada una.

Para el cálculo de la distancia a poblados, solo se trabajó con las localidades mayores a 100 habitantes, esto permitió atenuar el efecto de la alta dispersión poblacional presente en el Estado.

Las otras medidas de accesibilidad (distancia a caminos, distancia a zonas agrícolas), se trabajaron en unidades de 100 m, ya que este fue el tamaño del pixel utilizado en el proyecto.

## Resultados.

La tabla siguiente muestra los cálculos de las superficies por clase de cobertura del suelo para los años 1993, 2002 y 2007, basado en la agrupación de los tipos de vegetación y uso del suelo de INEGI en escala 1:250,000.

Tabla 1. Superficies por tipo de cobertura del suelo en las tres épocas de estudio 1993, 2002 y 2007.

Clase de cobertura/uso del suelo	Serie 2 1993 (ha)	Serie 3 2002 (ha)	Serie 4 2007 (ha)
Agricultura de riego	107,398.8	116,040.4	119,920.0
Agricultura de temporal	1,143,871.1	1,216,497.2	1,247,914.2
Pastos cultivados	1,325,304.8	1,511,935.2	1,554,748.2
Bosque de coníferas	497,224.6	305,428.7	251,460.1
Bosque decíduo	167,799.3	89,244.4	74,899.2
Bosque mesófilo	333,783.9	264,814.0	234,054.7
Selvas húmedas	954,085.2	738,814.4	697,193.4
Selvas secas	14,278.4	12,811.1	12,594.5
Vegetación secundaria	2,248,551.5	2,451,180.3	2,434,435.2
Pastizales inducidos y herbazales	285,442.6	361,799.2	424,490.7
Vegetación diversa (tular, popal, palmar, de galería)	61,238.7	61,169.3	59,415.3
Zona urbana	181,708.2	191,707.2	210,941.1

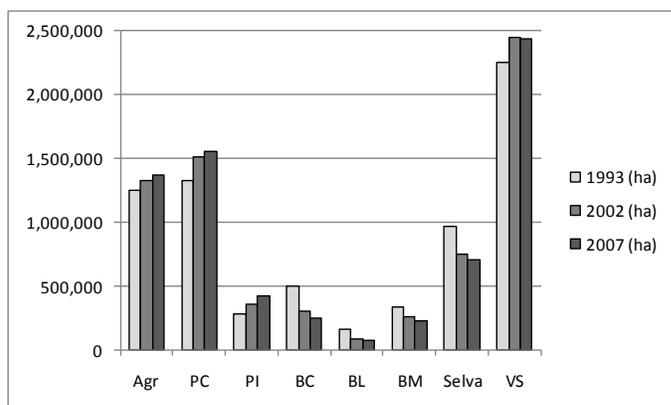


Figura 7. Tendencia de cambio en la cobertura del suelo. Agri=Agricultura; PC=Pastizal cultivado, PI= Pastizal inducido, BC= Bosque de coníferas, BL= Bosque de latifoliadas, BM= Bosque mesófilo, BS= Bosque secundario o perturbado.

La tabla 1 muestra que el cambio en el uso del suelo es una actividad bastante dinámica, en términos absolutos el período 1993 a 2007 se perdieron 258,576 ha de selvas no perturbadas y

438,394 de bosques no perturbados (de clima templado y mesófilos). Proporcionalmente, los tipos de vegetación más afectados fueron el bosque de coníferas y el de latifoliadas, los cual registraron disminuciones superiores al 50% de su superficie original.

Por otra parte los tipos de cobertura que experimentaron mayores incrementos en el período 1993-2002 fueron el pastizal cultivado y el bosque secundario, los cuales aumentaron aproximadamente 200,000 ha en solo 9 años. El bosque mesófilo no perturbado perdió aproximadamente 100,000 ha, los cuales se transformaron a usos agropecuarios o en bosque secundario.

Los cambios en la cobertura y uso del suelo suelen ser complejos, presentándose situaciones en las que el concepto de deforestación por si solo no podría representar cabalmente. La figura 8 muestra una esquematización de las principales transiciones en un análisis de cambios en la cobertura del suelo.

Las gráficas de la figura 8 son el resultado de la sobre posición de las capas de cobertura del suelo de 1993 y 2002, y muestra en términos porcentuales tres aspectos de la dinámica del cambio en el Estado, en la sección A se muestran los cambios que implican una emisión de CO<sub>2</sub>, esto es deforestación y degradación. Lo que destaca este gráfico es que, en la mayoría de las regiones el mayor porcentaje de la deforestación se presenta por el cambio de los bosques secundarios a usos agropecuarios. Pero también se presenta una proporción considerable de degradación de bosques, es decir transformación de los bosques no perturbados a bosques secundarios o mosaico de parches de bosque y coberturas agropecuarias.

En la sección B de esta misma figura se muestran los procesos de regeneración o cambios que implican una captura de CO<sub>2</sub>, es decir la conversión de una zona agropecuaria a un bosque y la conversión del bosque degradado a bosque no degradado. Aún cuando estos cambios no son comparables en magnitud a la deforestación, en algunas regiones llega a representar hasta el 8 ó 9 % de las transformaciones en la cobertura.

Por último la sección C muestra las áreas que no sufrieron cambios; destacan en esta gráfica regiones con altas tasas de cambio en el uso del suelo, tal como Altos, Centro, Frailesca, Fronteriza, Marqués de Comillas y Sierra que cambiaron mas del 20% de la superficie original a otro tipo de cobertura, que como se mencionó anteriormente generalmente implica deforestación.

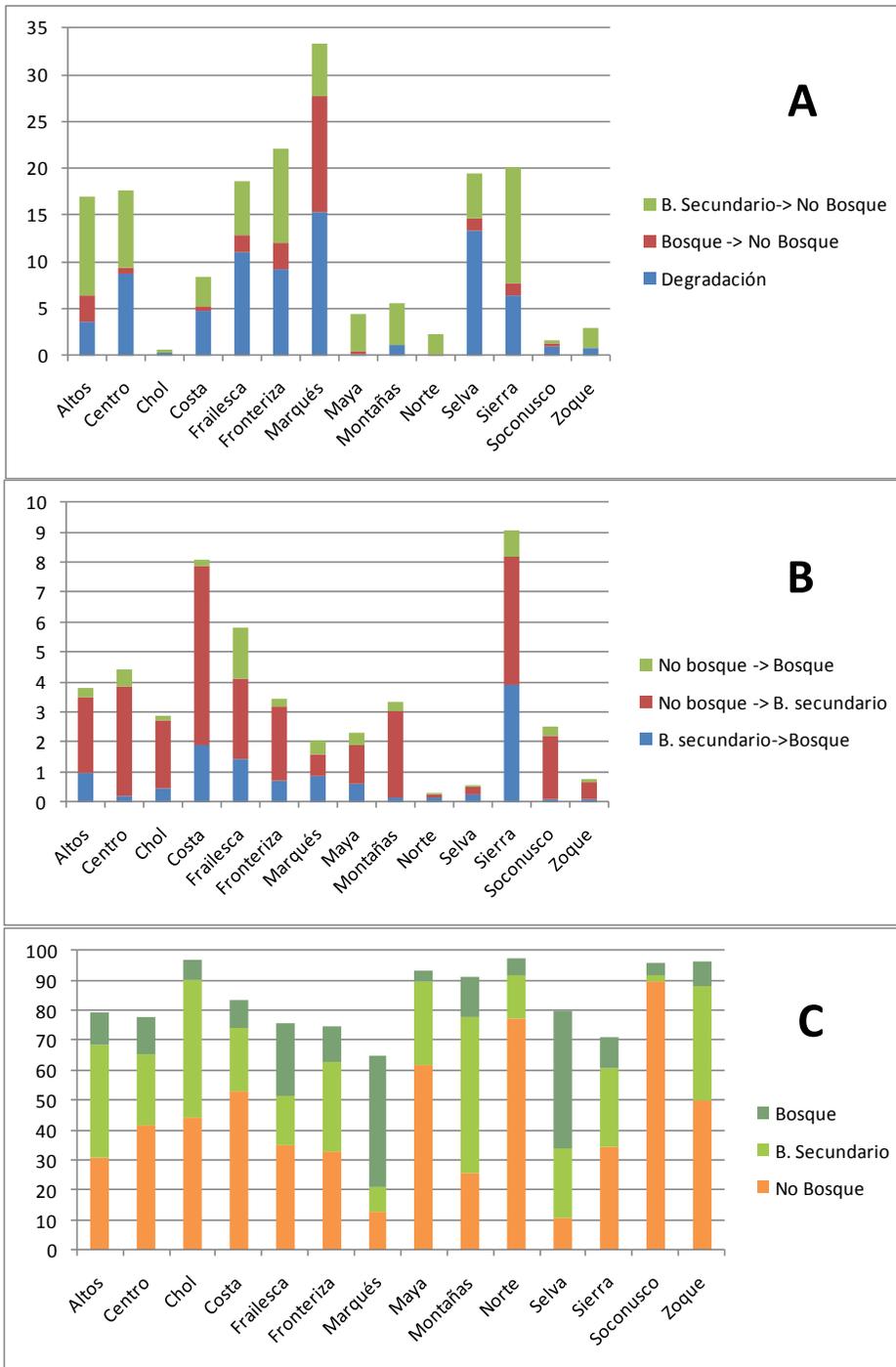


Figura 8. Permanencia y cambios en la cobertura del suelo por región socioeconómica. El eje y indica el porcentaje de la superficie con relación al total de la región. En la sección A se muestran los porcentajes de deforestación y degradación; en B se muestran los porcentajes de regeneración y en C, las coberturas del suelo que no sufrieron cambios en el período 1993-2002.

## Modelo prospectivo de deforestación

De manera explícita o implícita, dos aspectos interrelacionados del cambio en la cobertura/uso del suelo son generalmente abordados por los modelos para la estimación de escenarios futuros, el primero se refiere a la cantidad y el segundo a la ubicación espacial del cambio. La estimación de la cantidad es generalmente un proceso complejo, que requiere un completo entendimiento de las fuerzas socioeconómicas y culturales que promovieron el cambio en el uso del suelo. La estimación de la distribución de espacial frecuentemente se apoya en el comportamiento histórico de los patrones de cambio y su relación con variables que condicionan la distribución de las áreas transformadas, tales como las pendientes del terreno o distancia a caminos, también conocidas como variables independientes o auxiliares (Veldkamp & Lambin 2001).

Para la construcción del modelo espacial de la deforestación se abordó un enfoque probabilístico. Este tipo de enfoques en general han demostrado ser apropiados para estimar los procesos de deforestación en condiciones de relaciones complejas entre las variables, debido entre otras situaciones al carácter impredecible de las consecuencias ecológicas de la toma de decisiones humanas y la innovación tecnológica (Lambin, 1994).

En este trabajo se analizaron dos enfoques probabilísticos complementarios: Regresión Logística y Cadenas de Markov. La relevancia de las variables empleadas y su contribución al modelo fueron evaluados a través de pruebas de hipótesis estadísticas. Este enfoque requirió que los datos empleados para el análisis cumplieran ciertos supuestos básicos y necesarios para su empleo en el análisis empleando modelos lineales generalizados. Uno de los principales supuestos se refiere a la distribución de muestreo e independencia estadística de los datos (Overmars et al., 2003).

A fin de asegurar la independencia estadística y espacial en los datos, se trabajó con una muestra aleatoria estratificada de aproximadamente 30,000 puntos, en los cuales se restringió la separación entre puntos de muestreo a un mínimo de 500 m entre sí.

La regresión logística es un enfoque que ha sido frecuentemente empleado en el análisis del cambio de uso de suelo (van Gils & Loza, 2006; Rutherford et al 2007, entre otros), debido a su capacidad para modelar respuestas binarias tal como 1s ó 0s, en este caso, deforestado o no deforestado. Lo que se modela en este caso es la probabilidad de que un pixel se deforestado en función a una serie de variables independientes nominales (o cualitativas) y continuas (o cuantitativas).

De esta forma la probabilidad de que la variable de respuesta Y obtenga un valor determinado, se expresa mediante la ecuación:

$$\pi(x) = [\exp(\alpha + \beta x)] / [1 + \exp(\alpha + \beta x)]$$

Donde  $\exp(.)$  se refiere a la función exponencial,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros del modelo de regresión estimados generalmente empleando un método de máxima verosimilitud,  $\beta$  se refiere a un vector de parámetros

$\pi(x)$  varía en el intervalo (0,1), lo cual no es muy adecuado para la modelación usando un enfoque lineal, por lo que una transformación denominada logit, permite trabajar con un intervalo de valores abierto que incluye valores negativos y positivos

$$\text{logit}[(\pi(x))] = \log[\pi(x)/(1- \pi(x))] = \alpha + \beta x$$

En donde  $\log(\cdot)$  se refiere al logaritmo con base  $e$  o logaritmo natural.

Una vez obtenidos las estimaciones de los parámetros de modelo, para estimar la probabilidad de deforestación, es necesario aplicar la transformación:

$$p = 1/(1 + \exp[\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \sum_i \beta_{ci} \delta_{ci}])$$

Donde:

$\beta_0$  es el interceptada al origen.

$\beta_1$  es la pendiente del log-likelihood para un predictor continuo ( $x_1$ ).

$\beta_{ci}$  es el log-likelihood de cambio asociado a la  $i$ -ésima clase de la variable nominal.

$\delta_{ci}$  es el delta de Kronecker para la clase  $ci$  de la variable nominal. Es 1 si la observación está en la clase ó 0 de otra forma.

Por otra parte, los modelos de transición Markovianos, son un tipo de análisis muy frecuentemente empleado para proyectar los cambio de la cobertura del suelo (p. ej. López et al. 2001, Flamenco-Sandoval et al. 2007). Las cadenas de Markov simulan procesos estocásticos que pueden ser parametrizados estimando empíricamente las probabilidades de transición entre estados discretos en el sistema observado (Balzter, 2000), en este caso, entre tipos de cobertura del suelo. Las ventajas de este tipo de enfoques son su simplicidad y escasa demanda de datos. Solo se requieren dos mapas de cobertura del suelo de diferentes fechas, a partir de los cuales se calculan las matrices de probabilidades de transición. Sus desventajas son la carencia de una verdadera expresión espacial de los cambios estimados, y que las matrices de transición se asumen homogéneas en el tiempo.

Para la evaluación de la confiabilidad espacial del modelo se empleó una herramienta ampliamente utilizada para comparar el desempeño de modelos espaciales, denominada ROC por sus siglas en ingles (*relative operating characteristic*). Los valores de ROC fluctúan entre 1 y 0.5, un valor cercano a 1 indica una alta coincidencia entre el modelo de deforestación simulado y el mapa real; mientras que un valor de 0.5 es aquel que se podría obtener de proponer un modelo basado únicamente en el azar. Por lo que, valores arriba de 0.52 son estadísticamente mejores que un modelo aleatorio (Pontius & Schneider, 2001).

Todo el análisis estadístico y la modelación espacial se realizaron empleando los programas R (R Development Core Team, 2009) e IDRISI Taiga (Eastman, 2009).

## Análisis de variables cualitativas.

La contribución de las variables cualitativas (regiones socioeconómicas, regionalización ecológica, regionalización fisiográfica, estatus de protección y tipo de tenencia), se evaluó a través de un análisis exploratorio basado en tablas de contingencia de dos vías y un análisis de regresión logística. En esta fase exploratoria se analizaron las variables por pares (por ejemplo deforestación vs regiones socioeconómicas, deforestación vs tipo de tenencia). En el caso de las tablas de contingencia se aplicó la prueba de independencia ( $\chi^2$  de Pearson) para evaluar estadísticamente la existencia de una asociación entre la variable explicadora (p. ej. regiones socioeconómicas) y la variable de respuesta (deforestación).

### Regiones socioeconómicas

De acuerdo a la prueba  $\chi^2$  las regiones socioeconómicas no son estadísticamente independientes de la deforestación, en otras palabras las tasas de deforestación son sensiblemente diferentes entre las regiones. Sin embargo existen regiones con tasas de deforestación similares como puede observarse en la siguiente tabla.

Tabla 2. Tasas de deforestación por región.

Regiones	Tasa de deforestación 1993 – 2002	Tasa de deforestación 2002- 2007
Altos	1.81	0.43
Centro	0.95	0.78
Chol	-0.37	1.72
Costa	-0.62	0.47
Frailasca	0.67	1.09
Fronteriza	1.85	0.70
Marqués de Comillas	2.41	2.32
Maya	0.79	1.58
Montañas	0.28	0.58
Norte	1.02	-0.18
Selva	0.77	0.66
Sierra	1.54	0.27
Soconusco	-1.79	0.27
Zoque	0.36	-0.23

Debido a esta similitud en las tasas de deforestación de algunas regiones, el modelo de regresión logística mostró que algunas de ellas son redundantes (estadísticamente no son significativas), por lo que para fines del modelo de regresión, se agruparon las 14 regiones en cuatro zonas más generales. La distribución espacial de estas nuevas zonas se muestra en la figura siguiente.

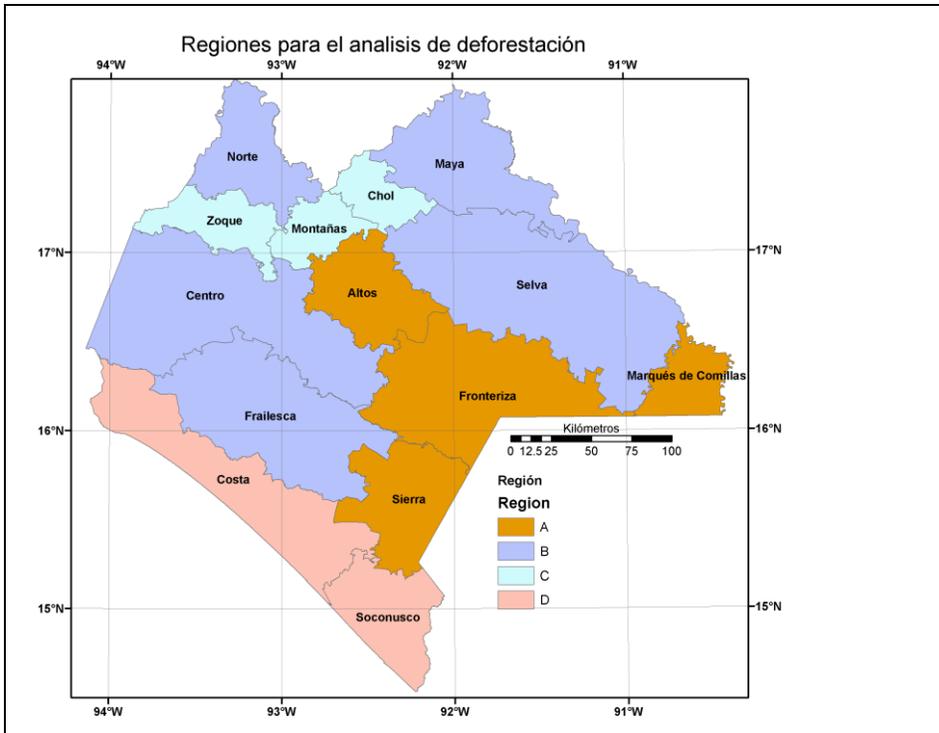


Figura 9. Zonificación para el análisis de la deforestación.

Tabla 3. Porcentajes de cambio en las zonas propuestas para el análisis de la deforestación.

Reg	% de Bosque sin cambio (1993-2002)	% Deforestado en el período 1993-2002
A	0.79	0.21
B	0.89	0.11
C	0.96	0.04
D	0.91	0.09

Cuadro 1. Resultados del análisis de independencia estadística usando tabla de dos vías.

```

Pearson's Chi-squared test
data: regiones
Number of cases in table: 17033
Number of factors: 2
X-squared = 404.13, df = 3, p-value < 2.2e-16

```

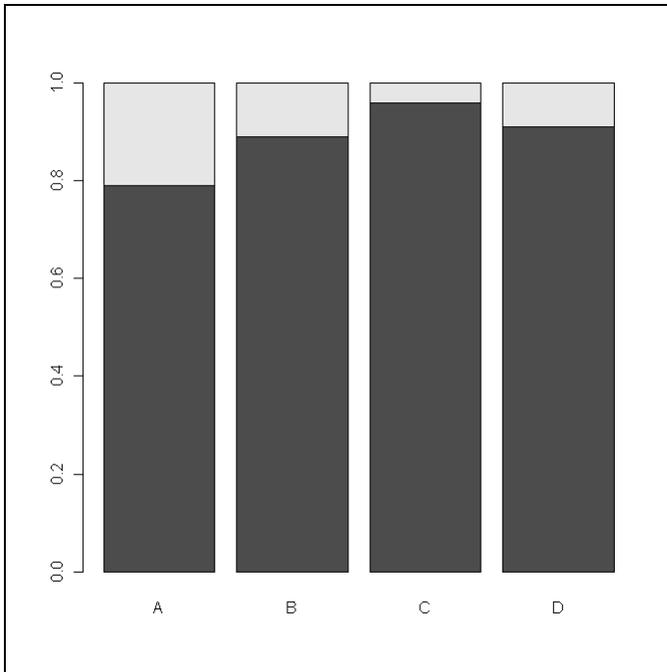


Figura 10. Porcentaje de deforestación en las zonas socioeconómicas. Gris oscuro =% de bosque que se conservó en el periodo 1993-2002; gris claro= % de bosque deforestado en el mismo período. La conformación de las zonas se encuentra en la Fig 9.

Los resultados del análisis de independencia estadística se muestra en el cuadro 1, y los del modelo de regresión logística  $\text{logit}[\pi(x)] = \alpha + \beta x$ , en donde la variable x representa la regiones (A,B,C,D) se muestran en el cuadro 2. Este tipo de resultados fueron obtenidos para cada una de las variables consideradas para formar parte de modelo de regresión. Solo se presentan acá con fines ilustrativos y se omite para el resto de las variables trabajadas.

Cuadro 2. Resultados del modelo de regresión logística para una variable nominal (regiones).

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -1.34773    0.03589 -37.550 <2e-16 ***
regionB      -0.76850    0.04849 -15.849 <2e-16 ***
regionC      -1.84974    0.14726 -12.561 <2e-16 ***
regionD      -0.98765    0.10832  -9.118 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)
Null deviance: 13062  on 17032  degrees of freedom
Residual deviance: 12658  on 17029  degrees of freedom
AIC: 12666
Number of Fisher Scoring iterations: 5

```

Los resultados del modelo de regresión muestran que las cuatro zonas (A, B, C y D) son estadísticamente significativas ya que presentan tasas de deforestación diferenciadas. En otras palabras esto significa que existen al menos cuatro patrones diferentes de deforestación en el Estado. Por lo que de incluirse esta variable en un modelo de deforestación, contribuiría a mejorar significativamente el desempeño del modelo. La zona A que incluye las regiones de Altos, Sierra, Fronteriza y Marqués de Comillas fue la que presentó mayor cantidad de pérdida de cobertura arbórea, 21% de su superficie arbolada original fue transformada a otros usos no forestales. En segundo lugar con un 11% de pérdida de cobertura arbórea, se encuentra al zona B que representa también la de mayor superficie en el estado, incluye las regiones Selva, Maya, Norte, Centro y Fraylesca. En las zonas C y D el porcentaje de deforestación fue bajo, 4 y 9 por ciento respectivamente.

### Tenencia de la tierra.

Los resultados del cruce de información de tenencia de la tierra con la deforestación muestran que los porcentajes de cambio de uso de suelo son diferentes dependiendo del tipo de tenencia, sin embargo estas diferentes aunque estadísticamente significativas, no son claramente marcadas especialmente entre los tipos ejidal/comunal (13%) y privado (16%) (figura 11).

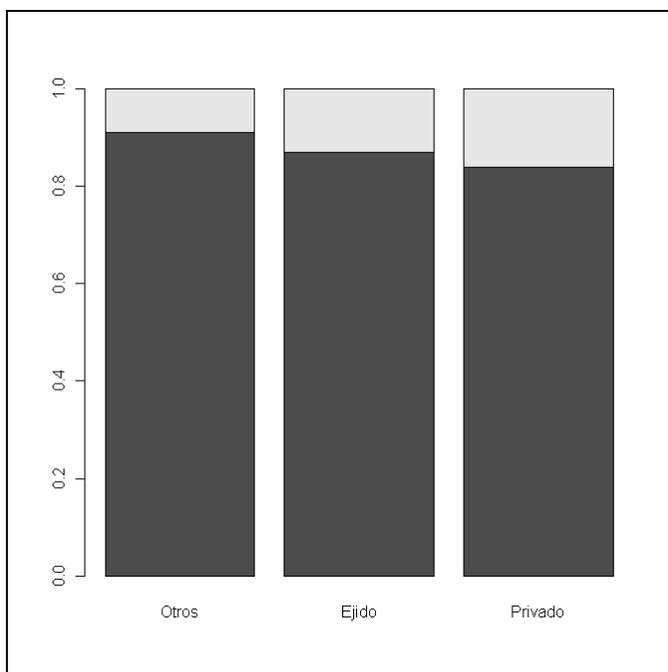


Figura 11. Porcentaje de deforestación por tipo de tenencia de la tierra.

## Estatus de protección

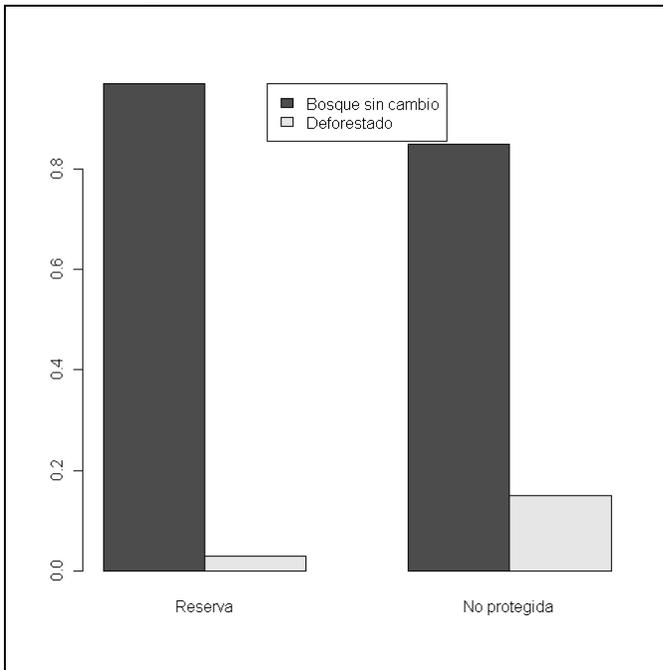


Figura 12. Porcentajes de deforestación dentro y fuera de las ANPs.

Los patrones de cambio en el uso del suelo muestran claras diferencias al interior de las reservas y fuera de ellas, el porcentaje de áreas forestales perdidas al interior de las Reservas fue tan solo de 3%, mientras que fuera de ellas esta cantidad se elevó al 15%.

## Zonificación Ecológica

Solo cuatro de las cinco clases inicialmente propuestas en la zonificación ecológica presentaron significancia estadística. La clase humedales se unió a la cálida-húmeda. La zona cálida subhúmeda fue la que presentó en términos proporcionales el mayor porcentaje de pérdida de la cobertura arbórea 33%, le siguieron la templado-subhúmeda con 13%, la cálida-húmeda con 10% y al final la zona templado húmeda que solo registró un 5% de pérdida de cobertura arbórea en el período 1993-2002.

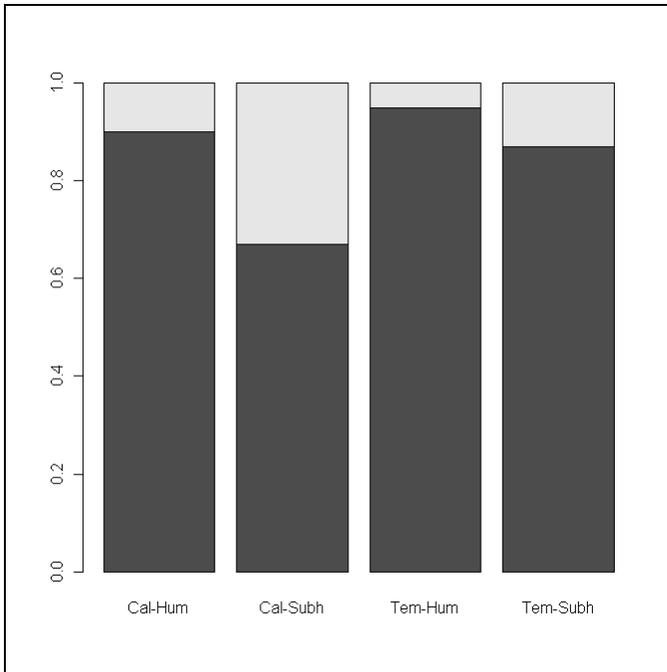


Figura 13. Porcentaje de deforestación en la zonificación ecológica. Gris oscuro =% de bosque que se conservó en el periodo 1993-2002; gris claro= % de bosque deforestado en el mismo período. Cal-Hum= Zona cálida húmeda, Cal-Subh= Cálida-subhúmeda, Tem-Hum= Templado húmeda, Tem-Subh= Templado subhúmeda.

### Fisiografía.

La figura 14 muestra las tendencias en el cambio de uso del suelo de acuerdo a su fisiografía, las mesetas (37%) y los lomeríos (20%) fueron los tipos de relieve que presentaron los porcentajes de deforestación mas altos, mientras que los lomeríos, sierras y valles se mantuvieron entre 10 y 13%.

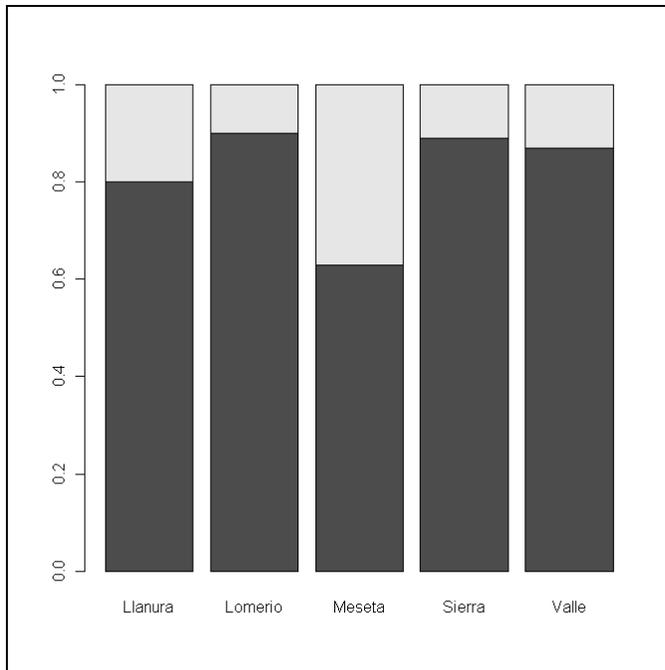


Figura 14. Porcentajes de deforestación por tipo de relieve.

### Tipos de Bosques (de acuerdo a su nivel de conservación).

La sección a de la figura 8, muestra como en términos porcentuales los bosques perturbados tienden a deforestarse con mayor frecuencia. Un 19 % de los bosques perturbados presentes en 1993 fueron transformados a usos agropecuarios en 2002, mientras que solo 5% de los bosques no perturbados (de acuerdo a la fotointerpretación) fueron transformados.

### Análisis de variables cuantitativas.

#### Densidad de población.

La gráfica muestra la relación entre la densidad de población en el año 1990 y las tasas de deforestación para el periodo 1993-2002. Aun cuando existe una relación negativa entre ambas variables, esta asociación es débil, la pendiente que muestra es poco pronunciada y para densidades mayores a 20 hab/km<sup>2</sup> los porcentajes de deforestación se mantienen prácticamente sin cambio. Por lo que se pueden adelantar que esta variable contribuiría poco a explicar la varianza modelo de deforestación.

Aparentemente una de las razones por las que la densidad de la población se encuentra escasamente relacionada con la densidad poblacional se debe al tipo de actividad productiva que compite con los bosques, es decir la ganadería extensiva. Este tipo de actividad requiere de grandes superficies en áreas poco pobladas para producir un reducido número de cabezas de ganado. Por lo que presentan altas tasas de deforestación aún en zonas de baja densidad poblacional.

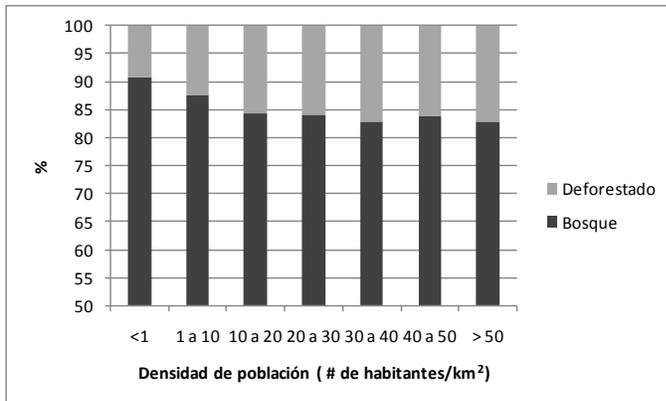


Figura 15. Relación entre la densidad de población y la deforestación.

### Distancia a caminos.

Considerando a la deforestación como un proceso de difusión, los caminos representan una variable de suma importancia, ya que es uno de los factores que modifican la accesibilidad a las áreas forestales.

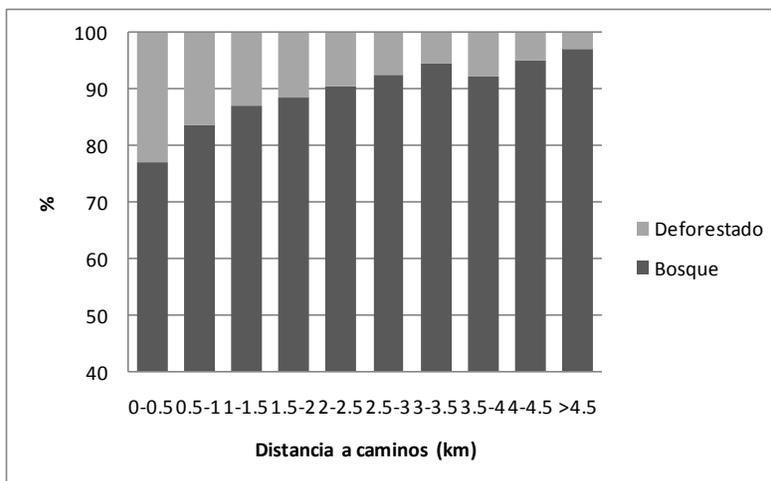


Figura 16. Relación entre la ocurrencia espacial de la deforestación y los caminos.

La gráfica muestra la relación de los bosques que se conservaron y los que se deforestaron en periodo 1993-2002, con respecto a su cercanía a los caminos. Como se puede apreciar los porcentajes de deforestación tienden a disminuir en las áreas más retiradas de los caminos (menos accesibles), después de 3.5 km los niveles de deforestación se mantienen al mínimo.

### Distancia a poblados.

La gráfica de la figura 17 muestra un pequeño efecto de la distancia a poblados sobre la deforestación. Sin embargo en distancias superiores a 2 km esta tendencia se estabiliza o no varía significativamente.

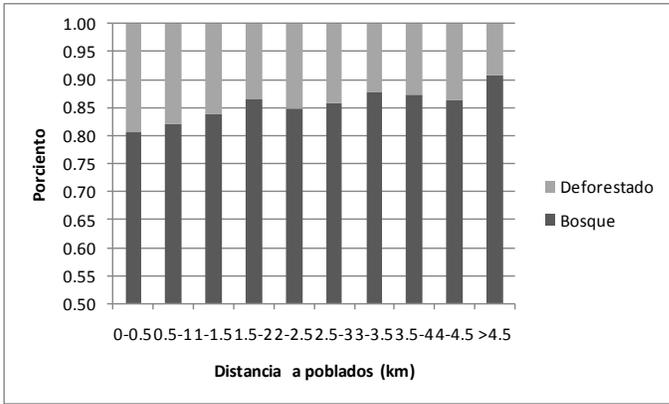


Figura 17. Permanencia de la cobertura arbórea y su cercanía a poblados.

### Distancia a zonas previamente transformadas.

El efecto de la cercanía a caminos es claro hasta los 2 km, después de esta distancia los porcentajes de deforestación se mantienen con poca variación.

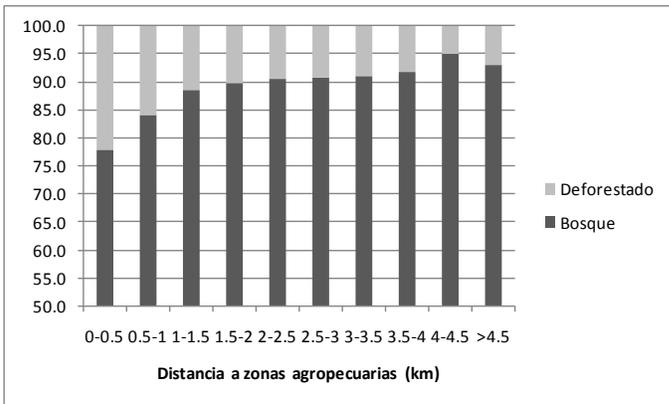


Figura 18. Distancia a zonas agropecuarias y deforestación.

### Inclinación del terreno (pendiente)

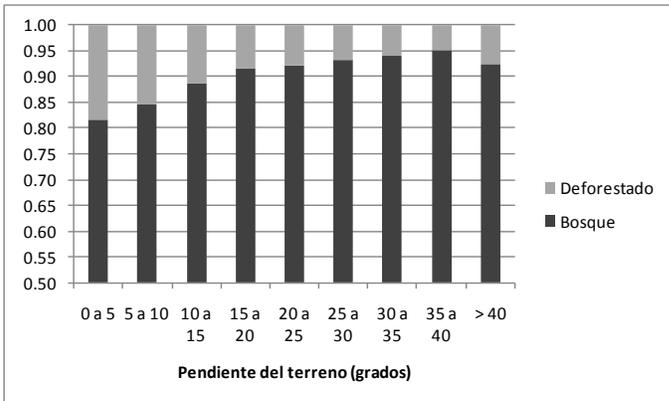


Figura 19. Pendiente y deforestación.

La pendiente muestra una relación no lineal, en la primera parte en pendientes bajas (< 15 grados) esta relación es lineal, sin embargo mas allá de este umbral la relación se vuelve asintótica.

### Modelo de regresión

En la búsqueda de la mejor estructura del modelo de regresión logística se buscó incluir al menos una variable que reflejase un criterio de zonificación socioeconómico y uno del medio físico. Se analizó efecto principal de las variables así como sus respectivas interacciones. En general las entre todas las zonificaciones analizadas, no se presentaron interacciones significativas, por lo que el modelo está constituido únicamente por el efecto principal de las variables seleccionadas. Algunas variables presentaron efectos de autocorrelación por lo que fueron descartadas en la versión final.

Con respecto a las variables continuas. Todas las que indicaban una distancia o una medida de accesibilidad mostraron significancia estadística, por lo que se integraron en un índice de accesibilidad.

La estructura general del modelo que presentó el mejor ajuste fue la siguiente:

$\text{logit}[(\pi(x))] = \text{interceptada} + \text{ZonasSocioeconomicas} + \text{ANPs} + \text{ZonasEcologicas} + \text{TipodeBosque} + \text{Accesibilidad}$

Tabla 4. Coeficiente del modelo de regresión logística.

Id	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	-0.518578	0.062283	-8.326	< 2e-16	***
regionB	-0.662100	0.053624	-12.347	< 2e-16	***
regionC	-2.075104	0.150571	-13.782	< 2e-16	***
regionD	-0.824675	0.119568	-6.897	5.31e-12	***
anpReserva	-0.605423	0.114814	-5.273	1.34e-07	***
Calido-Subhumeda	0.688897	0.066478	10.363	< 2e-16	***
Templado-humeda	-0.812386	0.101699	-7.988	1.37e-15	***
Templado-subhumeda	-0.260660	0.062883	-4.145	3.40e-05	***
TipoBosque	-0.872062	0.061262	-14.235	< 2e-16	***
Accesibilidad	-0.061315	0.004141	-14.806	< 2e-16	***

Akaike = 11077

En la tabla 4 se presentan los coeficientes del modelo de regresión logística estimados por el método de máxima verosimilitud. Esta estructura refleja fue la combinación de variables que presentó valor mas bajo del índice de Akaike. Como puede apreciarse por valor de la columna Pr(>|z|), todas las variables son altamente significativas. En términos de su contribución a explicar la variabilidad de los datos, las variables que mas contribuyeron en el modelo son la zonificación y los tipos de bosque.

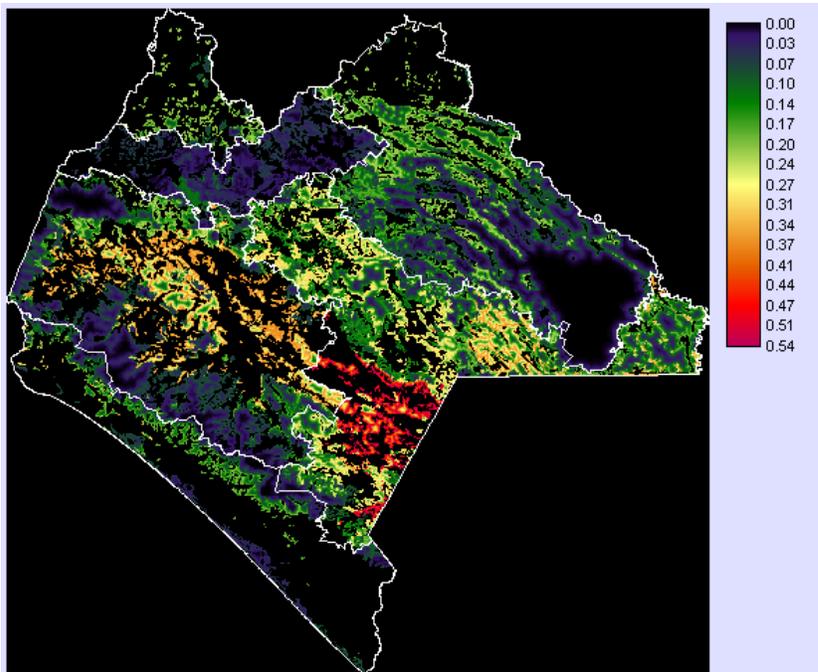


Figura 20. Probabilidad de deforestación de acuerdo al modelo de regresión logística.

El ajuste espacial del modelo con respecto a los datos de calibración se evaluó con el estadístico ROC, el resultado obtenido fue de 0.768, lo que indica una coincidencia aceptable entre el mapa de deforestación simulado y el usado para la calibración (el mapa de 2002). Sin embargo, dado que el objetivo principal fue estimar su habilidad predictiva, se aplicaron los parámetros del modelo logístico para estimar la deforestación en el año 2007. En este caso el valor obtenido fue de 0.69, aunque implica una disminución significativa con respecto a los datos de calibración, se mantiene dentro de los niveles usualmente encontrados en modelos de deforestación (por ejemplo Pontius & Schneider, 2001; van Gils & Loza, 2006).

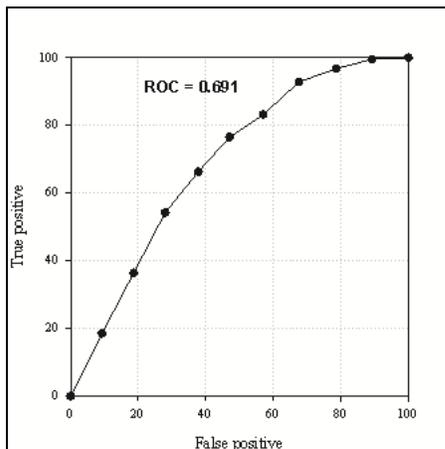


Figura 21. ROC, estimación de ajuste entre el mapa de deforestación simulado y el real (2007).

## Los escenarios de deforestación.

El enfoque de Cadenas de Markov proporciona escenarios cuantitativos de la deforestación basada en las tendencias de cambio de período inmediato anterior. Se ensayaron dos escenarios basados en el período completo 1993-2007 y 2002-2007 para crear escenarios prospectivos a 5 y 9 años (se empleó un escenario de 9 años debido a que es el mismo tiempo que se empleó para la calibración del modelo espacial). Las tablas 5 y 6 muestran los resultados de esos cálculos.

Tabla 5. Escenarios de deforestación al 2012 de acuerdo al enfoque de cadenas de Markov. Escenario a) basado en tendencias 2002 a 2007 y escenario b) basado en tendencias 1993 a 2007.

		Escenario a)		Escenario b)	
		2012		2012	
		Bosque	No bosque	Bosque	No Bosque
2007	Bosque	3,247,321	459,388	Bosque	3220130 486,579
	No bosque	326,024	3,116,326	No Bosque	334539 3,107,811
	Deforestación neta	133,364.0		152,040.0	
	Tasa anual	0.730		0.834	

Tabla 6. Escenarios de deforestación a l 2016 de acuerdo al enfoque de cadenas de Markov. Escenario a) basado en tendencias 2002 a 2007 y escenario b) basado en tendencias 1993 a 2007.

		Escenario a)		Escenario b)	
		2016		2016	
		Bosque	No Bosque	Bosque	No bosque
2007	Bosque	3,052,614	654,095	Bosque	3043547 663162
	No Bosque	435,369	3,006,981	No bosque	429748 3012602
	Deforestación neta	218,726.0		233414	
	Tasa anual	0.674		0.720	

El escenario basado en el periodo 2002-2007 es el que muestra las menores tasas de deforestación. De acuerdo a esta tendencia hacia el 2012 se perderían un poco mas de 459,000 ha y se regeneraría una cantidad cercana a 326,000, lo que representaría una deforestación neta de 133,000 ha aproximadamente. La figura 22 muestra las áreas con mayor probabilidad de cambio (las probabilidades que se encuentran en el último decil) obtenido del modelo de regresión

logística y que representan una cantidad aproximada a 420,000 ha, extensión cercana a la estimada por el modelo de Markov.

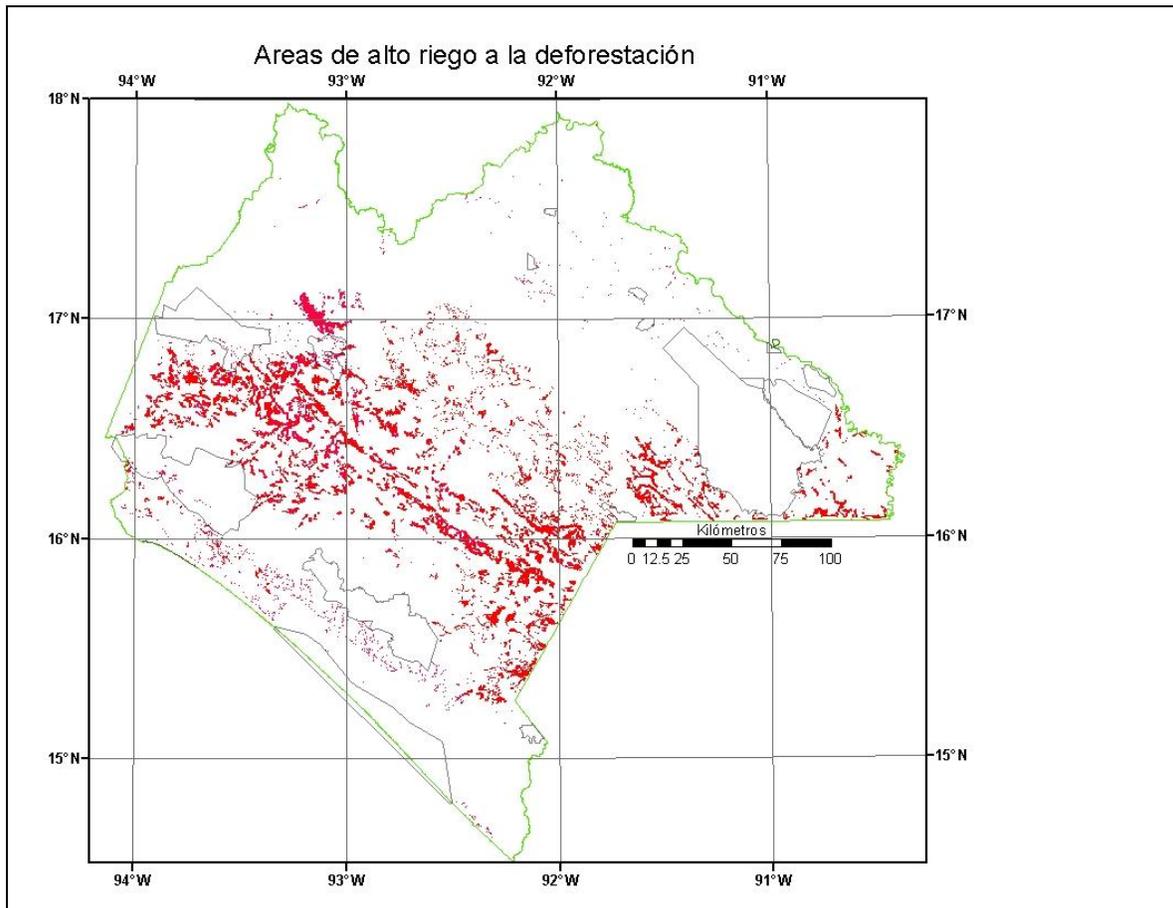


Figura 22. Áreas de alto riesgo a la deforestación.

Las áreas de mayor riesgo a la deforestación se encuentran ubicadas en gran medida dentro de la zona A o zona que en los periodos anteriores mostró mayor tasa de deforestación.

## Conclusiones

El modelo de regresión logística representa una herramienta útil para la modelación de la deforestación por su naturaleza de respuesta binaria (0s ó 1s), además de que permite incorporar variables nominales al modelo y cuantificar su contribución en la explicación del fenómeno de interés. Por la naturaleza y extensión del área trabajada, este enfoque resulta adecuado y fácil de parametrizar. Sin embargo el modelo de regresión logística se encuentra limitado estructuralmente para reflejar una visión de unidireccional de los cambios en el uso del suelo, es decir deforestado o no deforestado. Resulta difícil incorporar en este modelo otros tipos de transiciones como la regeneración de los bosques.

Otras herramientas metodológicas que permiten abordar mayor complejidad en los cambios, por ejemplo el análisis multicriterio, sin embargo debido a la extensión y complejidad del área de estudio, un enfoque de esta naturaleza resultaría poco práctico y excesivamente costoso.

No fue posible evaluar el efectos del manejo forestal en la conservación de las áreas boscosas debido a la carencia de información confiable espacialmente, sin embargo existen trabajos ( p e j Bray et al 2008) que reportan un efecto positivo entre el manejo forestal comunitario y la conservación de las áreas de bosque, incluso con niveles menores de deforestación comparados con las ANP.

## Referencias bibliográficas

Agresti, A. 1996. An introduction to categorical data analysis. Wiley Series in probability and statistics. NY.

Balzter, H., 2000. Markov chain models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 126:139-154.

Bray, D.B., Duran, E., Ramos V.H, Mas J.F., Velazquez, A., McNab R.B, Barry D., y Radachowsky, J. 2008. Tropical deforestation, community forests, and protected areas in the Maya Forest. *Ecology and Society*, 13(2):56 [online] URL:<http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art56/>

Flamenco-Sandoval, A., Martínez-Ramos, M. & Masera, O.R., 2007. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. *Biological Conservation* 138:131-145.

Lambin, E.F. 1994. Modelling deforestation processes. A review. TREES series B: Research report 1. JRC &ESA. Luxemburgo.

Overmars, K.P, de Koning G.H.J., Veldkamp. 2003. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models. *Ecological Modelling*. 164:257-270.

R Development Core Team. 2009. 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>.

Rossiter, D.G y Loza, A. 2010. Analyzing land cover change with logistic regression in R (technical note). Disponible en línea.

Van Gils, H.A.M y Loza, A. 2006. What drives conversion to tropical forest in Carrasco Province, Bolivia?. *AMBIO*, 35(2): 81-85.

ANEXO 1. Mapas de cobertura del suelo

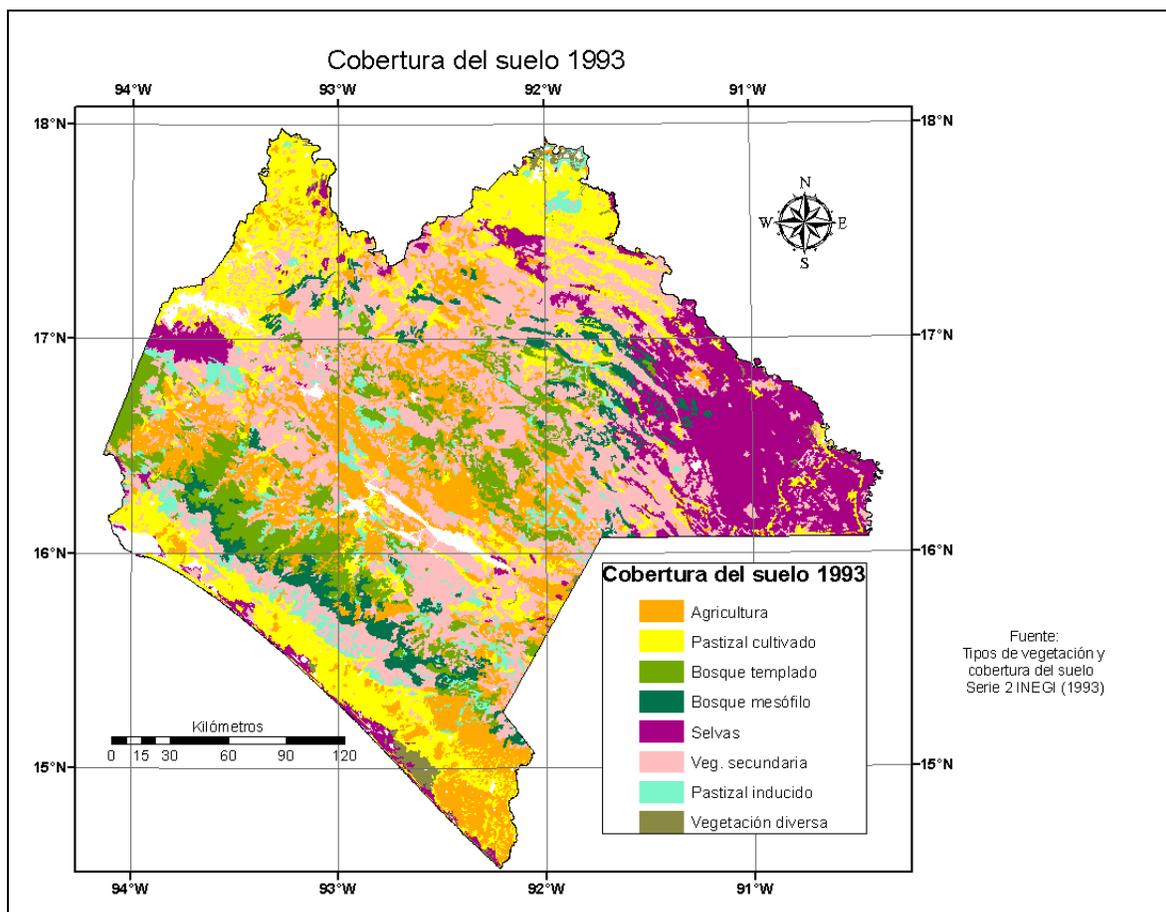


Figura 8. Grupos de vegetación 1993

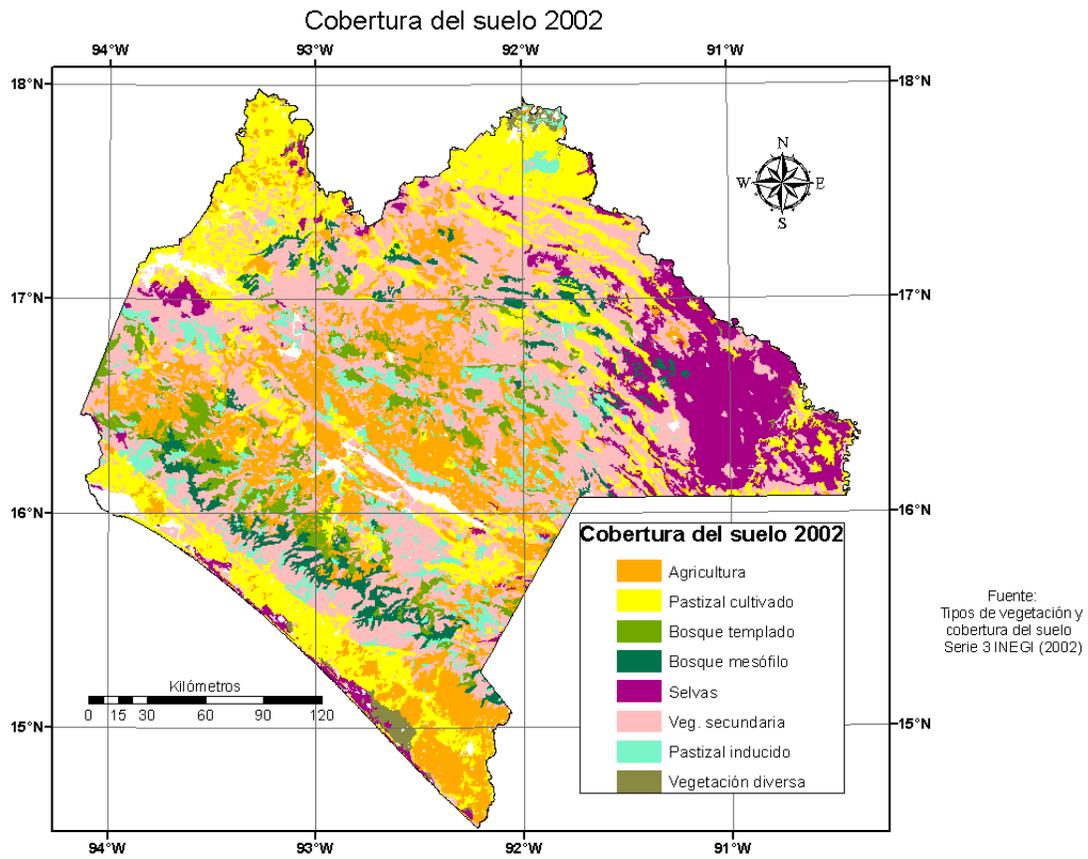


Figura 9. Grupos de vegetación 2002

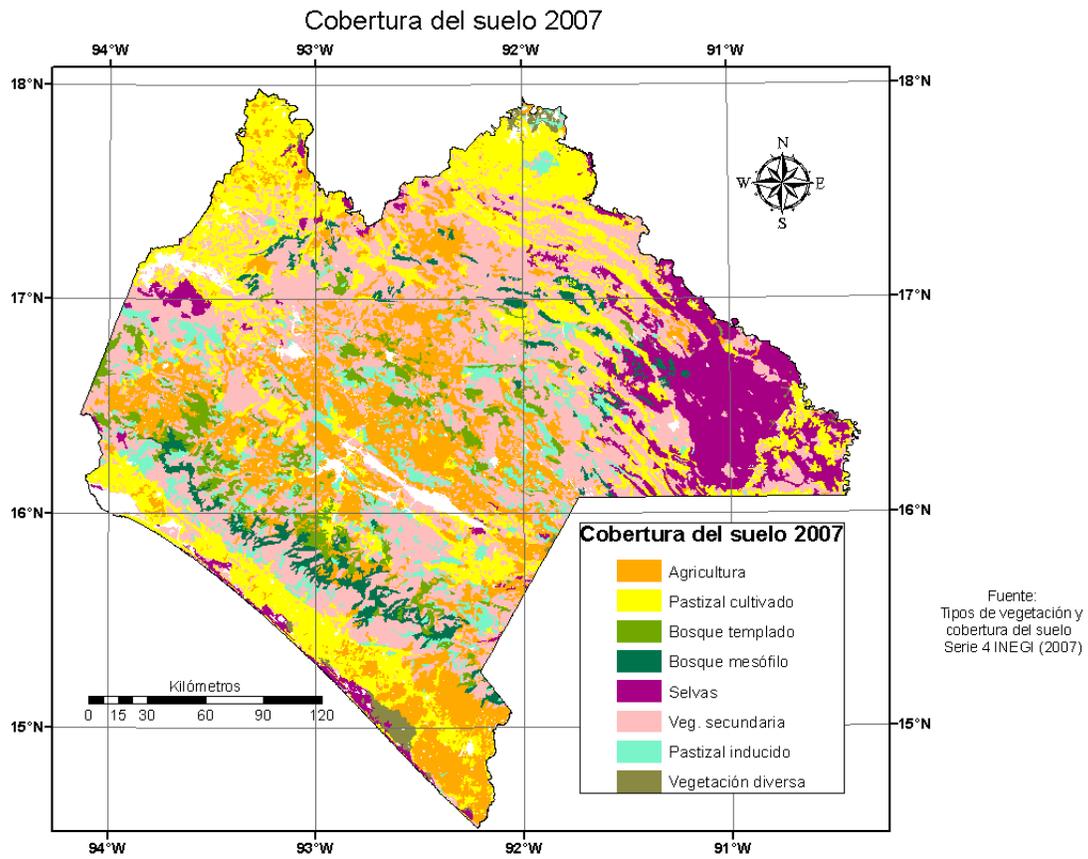


Figura 10. Grupos de vegetación 2007