

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA FRAGMENTACIÓN
EN LOS BOSQUES TEMPLADOS DE LA SIERRA NORTE DE
OAXACA, MÉXICO, Y SUS EFECTOS EN LAS RESERVAS DE
CARBONO: 1980-2000.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

SILVIA PÉREZ RAMÍREZ

Directora de Tesis:

Dra. María Isabel Ramírez Ramírez



Ciudad Universitaria, México, D.F. junio 2007.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

A mi familia:

Kokin, Nena, Thaba, Hazel y Chelo

*“The future belongs to those who
believe in the beauty of their dreams.”*

E. Roosevelt

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la educación profesional y por la beca otorgada para la conclusión de esta tesis a través del proyecto denominado “Efectos de la deforestación en el clima local de los bosques del oriente de Michoacán” (PAPIIT-IN114707), bajo la responsabilidad de la Dra. María Isabel Ramírez. Al proyecto “Variabilidad espacial de los cambios de uso del suelo en la Sierra Norte de Oaxaca y sus efectos en la dinámica espacial de los capitales de carbono” bajo la responsabilidad del Dr. Leopoldo Galicia, por financiar la compra del material utilizado para la realización de este trabajo.

A la Dra. María Isabel Ramírez por su confianza, por su apoyo incondicional y por brindarme la oportunidad de colaborar con ella. ¡Muchas gracias Isa! Al Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento, al Dr. Rafael Huizar Álvarez, al Dr. Omar Masera Cerutti y a la Dra. Leticia Gómez Mendoza gracias por destinar parte de su tiempo para la revisión de este trabajo y por sus valiosos comentarios.

A las gentiles personas que laboran en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y en la biblioteca del Instituto de Geografía por su disponibilidad para ayudarme y por facilitarme el material cartográfico. A la Coordinación de Docencia de la Unidad Académica de Geografía en Morelia, por su autorización para tener acceso a sus instalaciones, y agradezco también a todo el personal de esta unidad por su apreciable apoyo.

A mis padres por su cariño, sus consejos, su protección y su apoyo. ¡Gracias a toda mi familia por ser extraordinaria! Y gracias a todas aquellas personitas que siempre me alentaron y con quienes he compartido momentos muy agradables, mis amig@s.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	1
 CAPÍTULO I. LAS RESERVAS DE CARBONO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL	
1.1. El cambio climático global	4
1.1.1. El efecto invernadero y el bióxido de carbono	5
1.1.2. El ciclo del carbono	5
1.1.3. Políticas sobre cambio climático global	7
1.2. Las reservas de carbono	9
1.2.1. Los bosques como reservas de carbono: fuentes y sumideros	10
1.2.2. La captura de carbono en los bosques	11
1.2.3. Los reservorios de carbono en los bosques	13
1.3. Emisiones y captura de carbono	15
1.3.1. Emisiones y captura de carbono en el mundo	15
1.3.2. Emisiones y captura de carbono en México	16
1.3.3. Políticas de mitigación de carbono mediante manejo forestal en México	18
 CAPÍTULO II. LA SIERRA NORTE DE OAXACA	
2.1. Localización	20
2.2. Características físicas	21
2.2.1. Relieve	21
2.2.2. Litología	23
2.2.3. Suelos	23
2.2.4. Clima	23
2.2.5. Hidrografía	24
2.3. Características de la vegetación	24
2.3.1. Bosque de pino	24
2.3.2. Bosque de encino	25
2.3.3. Bosque mesófilo de montaña	26
2.4. Estructura socioeconómica	27
2.4.1. Población	27
2.4.2. Actividades económicas	29
2.4.3. Manejo forestal	30
2.5. Conservación, desarrollo forestal sustentable y proyectos de captura de carbono en la SNO	31

CAPÍTULO III. CAMBIO EN LAS CUBIERTAS DEL SUELO DE LA SIERRA NORTE DE OAXACA: 1980 - 2000

3.1.	Introducción	33
3.1.1.	Cubierta del suelo	33
3.1.2.	Cambios en la distribución de las cubiertas del suelo en el estado de Oaxaca	33
3.2.	Método	34
3.2.1.	Materiales	34
3.2.2.	Procedimiento	35
3.3.	Resultados y Discusión	39
3.3.1.	Cubiertas del suelo en 1980	39
3.3.2.	Cubiertas del suelo en 1995	40
3.3.3.	Cubiertas del suelo en 2000	42
3.3.4.	Transformación de las cubiertas del suelo	45
3.3.4.1.	Tasas de cambio	46
3.3.4.2.	Procesos y factores de cambio en las cubiertas del suelo	47
3.3.4.3.	Procesos de cambio en los municipios del área de estudio	51
3.4.	Conclusión	54

CAPÍTULO IV. DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA FRAGMENTACIÓN EN LOS BOSQUES TEMPLADOS DE LA SIERRA NORTE DE OAXACA: 1980 - 2000

4.1.	Introducción	55
4.1.1.	Dinámica de la fragmentación	56
4.1.2.	Indicadores espaciales de la fragmentación	57
4.1.3.	Efectos de la fragmentación	57
4.1.4.	Patrones espaciales	59
4.2.	Método	60
4.2.1.	Selección y descripción de indicadores	60
4.2.2.	Estimación de indicadores	63
4.3.	Resultados y Discusión	65
4.3.1.	Fragmentación en bosques primarios y secundarios	68
4.3.2.	Fragmentación por tipo de bosque	72
4.3.3.	Fragmentación en los municipios del área de estudio	75
4.4.	Conclusión	77

CAPÍTULO V. PATRONES TERRITORIALES DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN LA SIERRA NORTE DE OAXACA: 1980 - 2000

5.1.	Introducción	78
5.2.	Método	79
5.3.	Resultados y Discusión	82
5.3.1.	Contenido de carbono por tipo de bosque y por municipio en 1980	82
5.3.2.	Contenido de carbono por tipo de bosque y por municipio en 2000	83
5.3.3.	Cambios en las reservas de carbono: 1980 – 2000	84
5.3.4.	Opciones para el manejo de las reservas de carbono en la Sierra Norte de Oaxaca	87
5.4.	Conclusión	88
	CONCLUSIONES	89
	BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Reservas y flujos en el ciclo global de carbono	6
Figura 2	Reservas y flujos de carbono en un ecosistema forestal	12
Figura 3	Fases de crecimiento y contenido de carbono en bosques	14
Figura 4	Ubicación de la Sierra Norte de Oaxaca	20
Figura 5	Distritos y municipios del área de estudio	21
Figura 6	Principales montañas en el área de estudio	22
Figura 7	Tipos de bosque en la Sierra Norte de Oaxaca	25
Figura 8	Pirámide de edades	28
Figura 9	Localización de los puntos de verificación	37
Figura 10	Superficie de las cubiertas del suelo en 1980	39
Figura 11	Superficie de las cubiertas del suelo en 1995	40
Figura 12	Tipo de cubiertas del suelo en la Sierra Norte de Oaxaca: 1995	41
Figura 13	Superficie de las cubiertas del suelo en 2000	42
Figura 14	Cubiertas del suelo en la Sierra Norte de Oaxaca en 1980 y 2000	44
Figura 15	Porcentaje de la superficie ocupada por tipo de cubierta del suelo	45
Figura 16	Tasas de cambio por tipo de cubierta del suelo: 1980-2000	47
Figura 17	Diagrama de transición de las cubiertas del suelo: 1980-2000	48
Figura 18	Procesos de cambio en las cubiertas del suelo de la Sierra Norte de Oaxaca de 1980 a 1995	52
Figura 19	Procesos de cambio en las cubiertas del suelo de la Sierra Norte de Oaxaca de 1995 a 2000	52
Figura 20	Procesos de cambio en las cubiertas del suelo de la Sierra Norte de Oaxaca de 1980 a 2000	53
Figura 21	Etapas de la fragmentación forestal	56
Figura 22	Contenido de carbono por área del parche forestal	61
Figura 23	Contenido de carbono en área central y área de borde	62
Figura 24	Proporción del área de borde y del área central en la superficie forestal en 1980 y 2000	65
Figura 25	Fragmentación de los bosques templados en la Sierra Norte de Oaxaca: 1980-2000	67
Figura 26	Incremento en el número de parches forestales primarios y secundarios: 1980-2000	68
Figura 27	Superficie total, área de borde y área central de los bosques primarios y secundarios en la SNO	70
Figura 28	Fragmentación de bosques primarios y secundarios en la Sierra Norte de Oaxaca: 1980-2000	71
Figura 29	Variación en el número de fragmentos por tipo de bosque: 1980-2000	72
Figura 30	Transición del índice de forma de los fragmentos por tipo de bosque: 1980 - 2000	73
Figura 31	Superficie de PAB y PAC por tipo de parche forestal en la SNO: 1980-2000	74
Figura 32	Fragmentación en el municipio Santa Catarina Ixtepeji: 1980 - 2000	75
Figura 33	Fragmentación en el municipio San Pedro y San Pablo Ayutla: 1980 - 2000	75

Figura 34	Superficie afectada por la fragmentación en los municipios del área de estudio:1980-2000	76
Figura 35	Reservas de carbono en la Sierra Norte de Oaxaca: 1980 y 2000	81
Figura 36	Proporción de las reservas de C en la SNO, 1980	82
Figura 37	Proporción de las reservas de C en la SNO, 2000	84
Figura 38	Cambios en las reservas de carbono en los municipios de la SNO: 1980-2000	86

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Composición de la atmósfera	5
Cuadro 2	Balance de carbono	10
Cuadro 3	Emisiones de carbono a nivel mundial: 1850-2000	16
Cuadro 4	Emisiones de carbono al año 2010, México	16
Cuadro 5	Potencial de mitigación de CO ₂ en México	17
Cuadro 6	Estructura de la población	28
Cuadro 7	Distribución de la población según condición de actividad económica y sector de actividad.	29
Cuadro 8	Categorías de las cubiertas del suelo	35
Cuadro 9	Descripción de la leyenda	36
Cuadro 10	Municipios y superficie forestal en el año 2000	43
Cuadro 11	Matriz de cambio en las cubiertas del suelo entre 1980 y 2000	46
Cuadro 12	Superficies y cambios en las cubiertas del suelo en 1980, 1995 y 2000	49
Cuadro 13	Tipos de cambio en las cubiertas del suelo de la SNO: 1980, 1995 y 2000	50
Cuadro 14	Matriz de cambio en las cubiertas del suelo: 1980-2000	51
Cuadro 15	Variables de los indicadores de fragmentación	63
Cuadro 16	Indicadores de la fragmentación forestal en la Sierra Norte de Oaxaca: 1980 y 2000	66
Cuadro 17	Indicadores de la fragmentación en bosques primarios y secundarios: 1980 y 2000	69
Cuadro 18	Indicadores de la fragmentación por tipo de bosque en la Sierra Norte de Oaxaca: 1980 y 2000	74
Cuadro 19	Comparación bibliográfica sobre densidades de carbono en bosques templados	80
Cuadro 20	Municipios con las principales reservas de carbono en el área de estudio	83
Cuadro 21	Contenido de las reservas de carbono en la SNO: 1980 y 2000	85

UNIDADES DE CONVERSIÓN

1 MgC (1 megagramo) = 10^6 gramos

1 TgC (1 teragramo) = 10^{12} gramos

1 PgC (1 petagramo) = 10^{15} gramos

1 t (1 tonelada) = 1,000 kilogramos

1 MtC (1 megatonelada) = 1,000,000 t

1 GtC (1 gigatonelada) = 1,000,000,000 t

1 tonelada de carbono = 3.67 toneladas de bióxido de carbono (t CO₂)

1 tonelada de CO₂ = 0.273 toneladas de carbono (tC)

1 ha (hectárea) = 10,000 m²

1 tC/ha (una tonelada de carbono por hectárea) = 100 g/m²

1 mgC/kg = un miligramo de carbono por cada kilogramo de suelo

Fuente: IPCC, 2000; IPCC, 2003.

RESUMEN

La fragmentación es un proceso en el cual grandes áreas de bosque presentan una gradual segmentación en unidades discontinuas más pequeñas, geométricamente más complejas y aisladas, como resultado de perturbaciones naturales y de las actividades humanas. Este proceso afecta la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. La fragmentación elimina biomasa, reduce las reservas de carbono en la vegetación y en el suelo y provoca la emisión de CO₂, fomentando con ello el calentamiento global y el consecuente cambio climático. Actualmente, el cambio climático es un tema importante porque tiene efectos en todas las escalas geográficas y en los aspectos social, económico y ambiental. El propósito de este trabajo fue evaluar la dinámica espacial y temporal de la fragmentación en los bosques templados de la Sierra Norte de Oaxaca (SNO) y sus efectos en las reservas de carbono. Para el análisis de fragmentación se generaron mapas de cubiertas del suelo para 1980 y 2000, los cuales se procesaron en el programa *Patch Analyst*. Se obtuvieron 13 indicadores agrupados en 5 categorías: área, tamaño del parche, forma, área de borde y área central. Una vez determinado el grado de fragmentación en los bosques, se calculó la reserva total de carbono en cada tipo de vegetación por área y por fecha y finalmente se analizó la variación de la magnitud de las reservas de C en la zona de estudio. El cambio total de las reservas de carbono en la SNO entre 1980 y 2000 corresponde a 2.3 MtC y se traduce en una emisión neta de 8.4 tCO₂. De acuerdo con los resultados obtenidos, el bosque mesófilo de montaña y el bosque de encino-pino presentaron una reducción menor a 0.4 MtC, lo que significó una pérdida de menos del 8% de sus reservas. Estos ecosistemas presentaron una variación mínima en los indicadores de fragmentación. La mayor reducción en las reservas de carbono se presentó en los bosques de encino y de pino-encino con una pérdida de 1.1 MtC y 0.8 MtC respectivamente, lo que significó una disminución superior al 20% de las reservas en cada comunidad vegetal. Los indicadores de fragmentación mostraron que estos ecosistemas fueron los más afectados. El área, el tamaño promedio de los parches y el índice de forma disminuyeron, el número de parches aumentó y casi el 50% de la superficie de estos bosques resultó vulnerable a los efectos de borde. Los resultados de este trabajo indican la necesidad de establecer programas de manejo forestal sustentable dirigidos a ofrecer un servicio ambiental de captura de carbono, en los cuales se creen zonas de amortiguamiento para la recuperación de los parches remanentes, así como interconexiones entre los parches para revertir el proceso de fragmentación actual.

INTRODUCCIÓN

Los bosques proporcionan diversos servicios ambientales, tales como, la regulación del clima, la preservación biológica, la estabilización y el desarrollo de los suelos, la conservación del ciclo hidrológico, la regulación de la concentración de gases de efecto invernadero y la concentración de importantes reservas de carbono (C). Los bosques tienen un papel trascendente en el ciclo global del carbono, debido a que existe un intercambio de este gas con la atmósfera. Durante su dinámica de crecimiento: secuestran CO₂, liberan oxígeno y acumulan C en la biomasa aérea y subterránea. Una reserva de carbono es un sistema que tiene la capacidad de acumular o liberar éste elemento. Los principales reservorios de C en los ecosistemas forestales son la vegetación, el mantillo y los suelos. Los bosques capturan y almacenan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con 90% del flujo anual de C entre la atmósfera y la biosfera. Los ecosistemas forestales conservados o manejados de forma adecuada son capaces de acumular volúmenes significativos de carbono (INE-SEMARNAP, 2000; Kojima, 1998; Roy, 2001; Melo, 2002; Munn, 2002).

Sin embargo, la capacidad de almacenamiento de C en los bosques se está perdiendo rápidamente a causa de los procesos de perturbación y fragmentación. La perturbación es la pérdida o alteración del arbolado sin cambio en el uso del suelo, mientras que la fragmentación es el rompimiento de un hábitat en parches dispersos y más pequeños. Una de las consecuencias de la fragmentación es la reducción de las albercas de carbono, ya que, al destruir la cubierta forestal se elimina la biomasa y disminuye la cantidad acumulada de éste elemento. La fragmentación afecta directamente el flujo de carbono entre la vegetación y la atmósfera, a través de la emisión de CO₂, lo que a su vez contribuye al calentamiento global (Dale, 1994; Dramstad et al. 1996; Turner et al. 2001; Calow, 1998; Bonan, 2002).

Las causas que favorecen la fragmentación son la tala clandestina, los incendios forestales y la introducción de actividades económicas no forestales. La conversión de áreas forestales a áreas constituidas por cultivos, pastizales y tierras abandonadas, es un factor determinante en la tasa de pérdida de carbono en los bosques. Las actividades humanas desarrolladas sin una visión de sustentabilidad económica y biológica provocan un deterioro en los ecosistemas forestales. La expansión agrícola es particularmente importante porque induce la pérdida de carbono en el suelo (Robinson, 1992; INE-SEMARNAP, 2000; Terradas, 2001; Köhler, 2003). Los bosques templados de la Sierra Norte de Oaxaca presentan un continuo proceso de fragmentación y pérdida de la vegetación natural. La alteración de las cubiertas naturales del suelo, para el establecimiento de ganado y para el cultivo de maíz, frijol, trigo, papa, café o de algunos frutales en la región (Rodrigo, 1994; INEGI, 2000), ha modificado la estructura espacial de las albercas de carbono y reduce su capacidad para fijarlo.

La Sierra Norte de Oaxaca se encuentra en un amplio gradiente altitudinal, donde se presentan considerables cambios de temperatura y precipitación; lo que la convierte en una de las regiones de mayor heterogeneidad ambiental en México y representa uno de los centros de mayor diversidad y endemismos para los bosques templados de *Pinus* y *Quercus* (Arriaga et al. 2000). Estos ecosistemas almacenan 40 veces más carbono que los cultivos y pastizales (IPCC, 2000; Roy, 2001, Terradas, 2001, Bonan, 2002). México carece de estudios sobre la dinámica de las reservas de carbono asociada con los procesos de fragmentación y los cambios de uso del suelo a escala regional, no obstante estos estudios son elementales en el marco del Cambio Climático Global. En este contexto, la presente investigación contribuye con el análisis de fragmentación en las reservas de C en la región.

El objetivo general de este trabajo es evaluar la dinámica espacial y temporal de la fragmentación en los bosques templados de la Sierra Norte de Oaxaca y sus efectos en las reservas de carbono con base en la hipótesis siguiente: la fragmentación de los bosques templados en la Sierra Norte de Oaxaca implica procesos de pérdida de la vegetación, elimina biomasa forestal, reduce la densidad de carbono y restringe el potencial de almacenamiento de las reservas. El tamaño, número, tipo, distribución y el área de borde de los parches determinan la magnitud de los depósitos de carbono. Entre mayor es el número, el tamaño y la distribución de parches de tipo no forestal, menor es la cantidad de carbono almacenado.

Los objetivos particulares de este trabajo son: definir la importancia de las reservas de carbono en el cambio climático global; identificar las cubiertas forestales del suelo en la Sierra Norte de Oaxaca (SNO); analizar las tasas de deforestación en los bosques templados de la SNO en los años 1980, 1995 y 2000, y caracterizar los cambios del paisaje en la región; definir los patrones espacio-temporales de la fragmentación en los bosques templados de la SNO y determinar la variabilidad de las densidades de carbono en las reservas de la SNO entre 1980 y 2000.

Para alcanzar los objetivos de esta investigación se realizó el procedimiento siguiente: primero se definió una leyenda de las cubiertas del suelo que se adaptará a la región de estudio. Posteriormente se realizó la interpretación de la imagen Landsat 7 ETM+ del año 2000 y de 94 fotografías aéreas escala 1:80,000 y 1:75,000 de los años 1980 y 1995, respectivamente. Los polígonos delimitados fueron etiquetados y editados en los programas ILWIS y ArcInfo 8.1. En ArcView GIS 3.2 se realizó el cálculo de áreas y perímetros para cada clase de cubierta y se construyeron los mapas de las cubiertas del suelo para los años 1980, 1995 y 2000. Se hizo una sobreposición cartográfica, se elaboró una matriz de transición para cada período y se identificaron los procesos de cambio. El análisis de la fragmentación se realizó a partir de 13 parámetros calculados por el programa Patch Analyst, con base en el procesamiento de los mapas generados. Y finalmente se calculó el carbono total en las reservas a partir del promedio de densidades de C por tipo de comunidad vegetal y se calculó la variación en la magnitud de las reservas entre 1980 y 2000.

Cada uno de los objetivos se aborda en los cinco capítulos que integran la tesis. En el capítulo I, se define la importancia de las reservas de carbono en el secuestro y almacenamiento del gas de efecto invernadero y se destaca su contribución en la mitigación del calentamiento global y del consecuente cambio climático. En el capítulo II se realiza una descripción de los componentes físicos y biológicos y de las características socioeconómicas del área de estudio. En el capítulo III se genera la cartografía de las cubiertas del suelo para los años 1980, 1995 y 2000. Y se obtienen las tasas de deforestación para observar el cambio en la estructura general de los ecosistemas forestales. En el capítulo IV se analiza el proceso de fragmentación forestal en la Sierra Norte de Oaxaca. El propósito de éste capítulo es definir los patrones espacio-temporales de la fragmentación con la finalidad de evaluar sus repercusiones en las reservas de carbono a escala regional. Se utilizaron parámetros que permitieron analizar la fragmentación y ayudaron a comprender lo que éste proceso representa para el almacenamiento de C y para el calentamiento global. El capítulo V permite evaluar los efectos de la fragmentación en los cambios de las reservas de carbono en la Sierra Norte de Oaxaca a través de información sobre densidades de C por tipo de vegetación y propone algunas estrategias dirigidas a la captura y almacenamiento de C en los bosques.

CAPÍTULO I. LAS RESERVAS DE CARBONO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

1.1. EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

Actualmente uno de los temas más importantes para la comunidad internacional es el cambio climático, debido a que tiene efectos en todas las escalas geográficas e incide en aspectos sociales, económicos y ambientales. El calentamiento global es provocado por el aumento en la concentración de diversos gases de efecto invernadero en la atmósfera, entre los que se encuentran: el bióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el ozono (O_3), el bióxido de azufre (SO_2) y los halofluorocarbonos (HFC). El CO_2 es el gas predominante y en los últimos 150 años su concentración se ha elevado más del 30%, aproximadamente de 280 partes por millón en 1850 a 370 ppm en 2000, con una tasa anual de incremento entre 0.5 y 1.5 ppm (Calow, 1998; IPCC, 2000; Munn, 2002). La revolución industrial intensificó el uso de combustibles fósiles y la destrucción de sistemas ecológicos que proporcionan un equilibrio dinámico de gases en la atmósfera. Actualmente la emisión global de CO_2 por combustibles fósiles se estima en 6 GtC anuales y la deforestación emite un flujo neto de 1.5 GtC/año a la atmósfera (Goudie, 2002; Munn, 2002). Se proyecta que la concentración atmosférica de CO_2 aumentará entre 730 y 1,020 ppm para el año 2100 (IPCC, 2007).

El cambio climático producirá un ascenso en la temperatura superficial del planeta determinado por un rápido aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. En los últimos 100 años (1906-2005), la temperatura promedio del planeta aumentó 0.74°C . El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático estima que si las concentraciones de carbono (C) se duplican, en 100 años se elevará la temperatura entre 1.5 y 4.5°C , y este cambio ocasionará: cambios en los patrones de precipitación con diferencias regionales muy marcadas; ascenso en el nivel del mar de 0.1 a 0.9 m, tanto por la expansión térmica de los océanos como por el derretimiento de los glaciares en montañas y en las regiones polares, pérdida de biodiversidad, cambios en los ecosistemas y pérdida de resiliencia, entre otros efectos (IPCC, 2007). Bajo un escenario de cambio climático la temperatura superficial del mar aumentará, causando que los océanos absorban menos C, y la temperatura del suelo incrementará, provocando que la biosfera terrestre emita más C hacia la atmósfera (Calow, 1998; Munn, 2002). Actualmente los ciclos de nitrógeno, carbono y agua entre la atmósfera, el océano y el suelo han sido alterados. Las consecuencias del cambio climático afectarían negativamente los sistemas ecológicos y socioeconómicos en el mundo (Magaña, 1999; Ordóñez, 1999; IPCC, 2000; Bonan, 2002). Los inventarios de emisiones de GEI identifican y cuantifican las principales fuentes y sumideros, esto es sumamente importante para la definición de políticas gubernamentales relacionadas con el cambio climático. Una de las opciones de mitigación del fenómeno climático, es la captura de carbono a través del manejo sustentable de los bosques con estrategias de forestación y reforestación, pues de esta manera se captura CO_2 atmosférico durante el crecimiento de la biomasa vegetal; lo que resulta en una reducción de las emisiones del gas de efecto invernadero (Ordóñez, 1999; IPCC, 2000; Broadmeadow y Matthews, 2003).

1.1.1. EL EFECTO INVERNADERO Y EL BIÓXIDO DE CARBONO

La atmósfera está compuesta por nitrógeno, oxígeno, argón, bióxido de carbono y otros gases en cantidades menores (Cuadro 1). El bióxido de carbono es un gas incoloro, 1.5 veces más pesado que el aire, es producido cuando el carbono es oxidado por ignición o durante la respiración. Es inodoro y no tóxico en bajas concentraciones. Es también un importante gas de efecto invernadero y sin él las temperaturas sobre la superficie terrestre serían mucho más bajas (Koch & Mooney, 1996; Calow, 1998; Goudie, 2002).

Cuadro 1. COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA

ELEMENTO	% ATMOSFÉRICO
Nitrógeno (N ₂)	78.08
Oxígeno(O ₂)	20.95
Argón (Ar)	0.93
Bióxido de carbono (CO ₂)	0.03
Neón (Ne), helio (He), criptón (Kr), hidrógeno (H), xenón (Xe), metano (CH ₄), ozono (O ₃), bióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.003
	100.00

Fuente: Martín, 1991.

El efecto invernadero se debe a que ciertos gases en la atmósfera permiten que la mayor parte de la radiación solar incidente penetre hasta la superficie del planeta, mientras que se absorbe y reemite parte de la radiación infrarroja que el planeta regresa al espacio exterior. Cuanto mayor es la concentración de los GEI, menor es la cantidad de radiación infrarroja que el planeta emite libremente al espacio exterior. De esta manera, al aumentar la concentración de gases, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, elevando la temperatura superficial del planeta (Paehlke, 1995; Koch & Mooney, 1996; Kojima, 1998; Munn, 2002). Las actividades humanas han ocasionado un desequilibrio en la temperatura de la superficie terrestre al incrementar las emisiones de GEI. Se estima que el bióxido de carbono tiene una aportación del 71.5% en el efecto invernadero. El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son las principales fuentes de carbono a la atmósfera relacionadas con el cambio climático global (Dale, 1994; Ordóñez, 1999; IPCC, 2000).

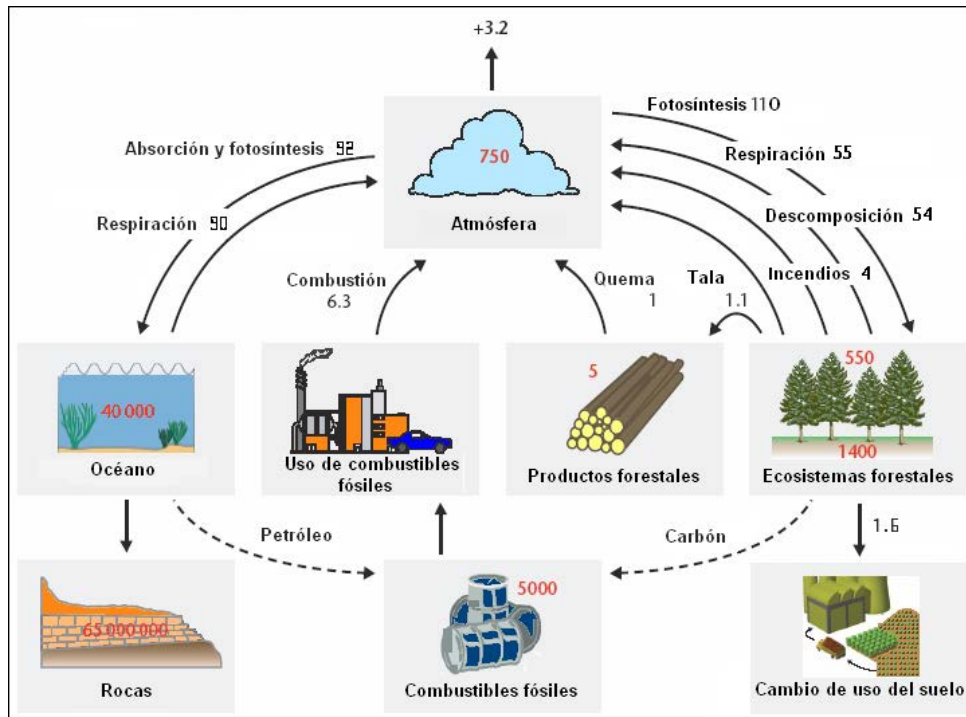
1.1.2. EL CICLO DEL CARBONO

El ciclo del carbono es uno de los cuatro ciclos biogeoquímicos importantes en la tierra, además del nitrógeno, azufre y fósforo. Estos elementos circulan alrededor del globo terrestre mediante procesos físicos, químicos y biológicos. El carbono es un elemento clave para la vida en la tierra y es intercambiado entre las grandes reservas: atmósfera, océanos, rocas sedimentarias, suelos y vegetación (Fig. 1) (Calow, 1998; Bonan, 2002). El océano es una reserva extensa y permanente de carbono pero la tasa de intercambio con la atmósfera es muy lenta mientras que la tasa de intercambio entre la vegetación y la atmósfera es más rápida y esto implica mayor incidencia en el ciclo de C; por ello, se han creado estrategias de captura de CO₂ en la biomasa con la finalidad de reducir el calentamiento global (Kirschbaum, 2001).

El ciclo del carbono inicia con la fijación del anhídrido carbónico atmosférico a través de los procesos de fotosíntesis realizados por la vegetación terrestre y por algas y microorganismos marinos. Cuando los organismos vegetales se descomponen, se depositan y se comprimen en el suelo, posteriormente, sufren una serie de cambios químicos para formar turba, luego lignito y finalmente carbón. Algunos organismos marinos pueden sufrir cambios similares y formar petróleo después de un largo período (Ordóñez, 1999; Goudie, 2002; Munn, 2002).

Estos fenómenos capturan y almacenan carbono, pero las actividades mineras obtienen el carbón y el petróleo que al ser utilizados por la industria los convierten en CO₂, volviendo de esta forma al principio del ciclo. El carbono también regresa a la atmósfera a través de procesos de oxidación tales como la respiración de plantas y animales, la descomposición de los suelos y la quema de la vegetación. La mayor parte del carbono se encuentra en las rocas como carbonatos. Las rocas se erosionan y con el tiempo los carbonatos vuelven al ciclo del carbono (Ordóñez, 1999; IPCC, 2000; Roy et al. 2001; Sedjo, 2001; Terradas, 2001; Goudie, 2002; Munn, 2002).

Fig. 1. Reservas y flujos en el ciclo global del carbono



Tamaño estimado de las reservas y flujos en el ciclo global del carbono en 1990. Las unidades del tamaño de las reservas (en rojo) se muestran en gigatoneladas de carbono (1GtC= 10¹⁵g). Los números junto a las flechas corresponden al flujo neto estimado en gigatoneladas de carbono por año (GtC/año). Diagrama modificado de Kirschbaum (2001), Goudie (2002), Munn (2002) y Broadmeadow y Matthews (2003).

1.1.3. POLÍTICAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

El almacenamiento de CO₂ es un punto importante en las negociaciones internacionales sobre el manejo de las emisiones del GEI debido a que el incremento en la acumulación de este gas es útil para compensar las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles, los cambios de uso del suelo y otras fuentes de carbono. Los créditos de carbono son útiles en las negociaciones porque constituyen un instrumento transferible y convertible por el que una organización obtiene beneficios financieros de una reducción de las emisiones y a la compra y venta de estos créditos se le denomina comercio de carbono (IPCC, 2007; Broadmeadow y Matthews, 2003).

El Protocolo de Kyoto es un acuerdo entre 41 países (pertenecientes al Anexo I) que tiene la finalidad de reducir en promedio 5.2% las emisiones de gases de efecto invernadero por debajo de los niveles registrados en 1990, mediante de la disminución del consumo de combustibles fósiles y mecanismos que involucren el secuestro de carbono a través de actividades forestales. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) es el encargado de definir los marcos y metodologías bajo los cuales los países deben realizar y reportar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Antes de Kyoto los sumideros no eran parte del protocolo pero se convirtieron en un punto crucial para obtener el acuerdo cuando algunos países plantearon compensar las emisiones de CO₂ con la captura de este elemento en los ecosistemas forestales (IPCC, 2000; Cannell, 2004).

En 1997 se propusieron cuatro artículos relacionados con los sumideros terrestres (IPCC, 2000; IPCC, 2003; Peña del Valle, 2003; Cannell, 2004):

- Artículo 3.3. Incluir las fuentes y sumideros creados por forestación, reforestación y deforestación (FRD) durante el período comprendido entre 2008 y 2012, tomando como año base 1990.
- Artículo 3.4. Considerar otros sumideros derivados de actividades agrícolas y silvícolas (manejo forestal, de pastizales, de cultivos y recuperación de la vegetación).
- Artículo 3.7. Incluir fuentes de carbono a partir del año base de emisiones 1990.
- Artículo 12. Incluir a los sumideros en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). El MDL está definido en el artículo 12 del Protocolo de Kyoto y estipula que los países desarrollados podrán cumplir sus compromisos de reducción de emisiones de CO₂ financiando proyectos de manejo forestal en países en desarrollo. Los dueños de los bosques recibirán una cuota de compensación por el servicio ambiental que generan al mantener la cubierta forestal.

En el año 2000, en la Haya únicamente se aprobaron los artículos 3.3 y 3.7, pero se concertaron totalmente en la declaración de Marrakesh en noviembre de 2001, mediante la especificación de nueve puntos: definición de bosques, resultados previstos, líneas base, inducción humana directa, medición y verificación, permanencia y reversibilidad, trascendencia, equidad, daños colaterales y beneficios. En Bonn y Marrakesh (2001) se debatieron cinco propuestas sobre el cálculo de los créditos otorgados a los sumideros (IPCC, 2003; Cannell, 2004):

1. Créditos FRD. Una figura positiva de FRD puede equilibrar las emisiones.
2. Débito y compensación de FRD. Si la fuente (deforestación) excede a los sumideros (F-R), entonces se obtiene una figura negativa de FRD que puede ser equilibrada con un manejo forestal (sumidero) bajo el artículo 3.4. El nivel de equilibrio debe ser mayor a 9.0 MtC/año.
3. En el manejo forestal se descarta cierto porcentaje (alrededor del 85%). Considerando las incertidumbres en la estimación de los sumideros manejados y las circunstancias de cada país. La captura de carbono mediante prácticas de manejo forestal está en función de la acumulación de la biomasa, de tal forma, cualquier actividad que tenga una repercusión positiva sobre la capacidad de un área determinada para secuestrar y almacenar carbono, podría ser considerada como una opción para reducir CO₂ en la atmósfera. En las opciones forestales de mitigación, la captura de carbono se mide en toneladas de carbono por hectárea al año (tC/ha/año).
4. Cálculo neto del manejo agrícola. Los sumideros derivados del manejo agrícola (cultivos y pastizales) deben ser calculados a partir del cambio en las reservas de carbono en el período 2008-2012.
5. Límite total de sumideros. Los países deben comenzar a revisar sus políticas de energía y reestructurar sus economías para reducir el uso de combustibles fósiles, además de reestructurar sus políticas de uso del suelo. Los países que firmaron el Protocolo de Kyoto no deben exceder el 50% de la reducción de sus emisiones utilizando sumideros.

Las variables que afectan el costo del C secuestrado son: el tipo de especies arbóreas, el tipo de manejo forestal y la tasa de C almacenado por unidad de tiempo, el valor del terreno destinado para uso forestal, la reducción de biomasa por tala, obtención de productos forestales, incendios, cambios en el precio de productos forestales y agrícolas, los métodos para calcular los flujos de C y los instrumentos políticos para obtener créditos de carbono.

El pago por secuestro de C se expresa en dólares por tonelada de carbono capturada para un programa de mitigación de CO₂. Puesto que son diversos los factores que afectan la cantidad de C capturado, existe un amplio rango en el costo que va de \$1 a \$90 dólares por tonelada de carbono. Para un programa de conservación se otorgan entre \$10 tC y \$82 tC. Para un programa en el que se capturan 300 millones de toneladas anuales, se otorgan entre \$25 tC y \$75 tC. Los costos estimados por el secuestro de 500 millones de toneladas anuales de C van de \$30 tC a \$90 tC (IPCC, 2000; Sedjo, 2001; Stavins & Richards, 2005). El IPCC estima que la aplicación de políticas apropiadas incrementaría la cantidad de carbono secuestrado por una reserva en 100 GtC arriba del nivel de carbono capturado sin tales políticas (Sedjo, 2001; IPCC, 2003). El IPCC reconoce que los sumideros tienen un rol importante en la reducción del CO₂ atmosférico y por lo tanto en la mitigación del cambio climático global (Cannell, 2004).

1.2. LAS RESERVAS DE CARBONO

Una **reserva de carbono** es un sistema que tiene la capacidad de acumular o liberar carbono. Ejemplos de reservas de carbono son la biomasa forestal, productos derivados de la madera, los suelos, la atmósfera y el océano. La cantidad de C se expresa en unidades de masa (toneladas de carbono- tC). Una reserva contiene **capitales de carbono** que se refieren a la cantidad absoluta del C contenido en un reservorio en un tiempo específico. Estos capitales se obtienen a través del **secuestro**, que es un proceso de incremento en el contenido de carbono de una reserva que no sea la atmósfera (IPCC, 2007); es la absorción de CO₂ atmosférico por organismos fotosintéticos (Bass et al. 2000). Este proceso forma parte del flujo de C de una reserva a otra en unidades de medida de masa por unidad de área y tiempo (tC/ha/año) (Dale, 1994; IPCC, 2003).

El balance de carbono incluye los intercambios entre la atmósfera y las distintas reservas asociadas en el ciclo global del CO₂. En los años noventa se estimó un balance de 3.2 GtC/año (Cuadro 2) como resultado del cambio de uso de suelo que emitió 1.6 GtC/año y la quema de combustibles fósiles que liberó 6.3 GtC/año mientras que la vegetación absorbió 3 GtC/año y el océano secuestró 1.7 GtC/año (Broadmeadow y Matthews, 2003). En un bosque, el **flujo neto de carbono** es determinado por la diferencia entre el carbono capturado durante el crecimiento de la vegetación y el carbono liberado por la deforestación, los incendios y la descomposición de la materia orgánica (Kirschbaum, 2001). La quema de combustibles fósiles, la fragmentación y los cambios de uso del suelo, modifican el balance de carbono y alteran su traslado entre las diferentes reservas.

Cuadro 2. BALANCE DE CARBONO

Contribución	Emisión (fuentes) GtC/año	Absorción (sumideros) GtC/año
Quema de combustibles fósiles	6.3	
Cambio de uso del suelo	1.6	
Crecimiento de vegetación		3.0
Intercambio océano-atmósfera		1.7
Total	7.9	4.7
Balance (incremento neto de C en la atmósfera)	3.2	

Fuente: Broadmeadow y Matthews, 2003.

1.2.1. LOS BOSQUES COMO RESERVAS DE CARBONO: FUENTES Y SUMIDEROS

La vegetación juega un papel importante en la regulación del ciclo global del carbono. Particularmente, los bosques tienen un rol substancial en el secuestro de CO₂ atmosférico y son importantes como reguladores del clima global (Nabuurs y Moren, 1995; Koch & Mooney, 1996; IPCC, 2000). Del carbono contenido en los bosques aproximadamente dos terceras partes se encuentran en la materia orgánica del suelo y una tercera parte en la vegetación (Kirschbaum, 2001; Raison et al. 2001). Estos ecosistemas contienen entre 20 y 100 veces más carbono por unidad de área que las tierras agrícolas que los substituyen (Dale, 1994). Los bosques tienen la capacidad de acumular carbono en cantidades suficientemente grandes como para afectar el contenido de éste en la atmósfera, por lo tanto, las superficies fragmentadas influyen drásticamente en los capitales de C (Gafo, 1999; Sedjo, 2001).

El potencial de los ecosistemas en el secuestro de carbono se define por el tipo y la condición del hábitat, es decir, por la composición de especies, la edad, los procesos de producción primaria bruta (PPB), producción primaria neta (PPN) y producción neta del ecosistema (PNE), por las características geográficas del sitio y por el grado de fragmentación. La capacidad de almacenamiento de una reserva está determinada por la cantidad de biomasa aérea y subterránea que contiene; tal cantidad depende del clima, la fertilidad, la disponibilidad de agua y del régimen de perturbación (IPCC, 2000; Terradas 2001; Thenkabail et al. 2004).

Una reserva puede comportarse como **sumidero**, que se define como un proceso o mecanismo que elimina un gas de efecto invernadero de la atmósfera y se presenta durante un intervalo de tiempo dado (IPCC, 2007). En este proceso hay una transferencia neta de CO₂ de la atmósfera al bosque o a la cadena de productos forestales y el CO₂ absorbido es mayor que el liberado (Art, 1993; Dramstad et al. 1996; Bass et al. 2000; Broadmeadow y Matthews, 2003).

Por otro lado, una reserva también puede comportarse como **fuentes**, si la cantidad de carbono absorbido es menor que la cantidad liberada a la atmósfera. Es opuesta al sumidero (IPCC, 2007). La capacidad de almacenamiento de las reservas de C puede ser alterada por procesos como deforestación, perturbación y fragmentación.

1.2.2. LA CAPTURA DE CARBONO EN LOS BOSQUES

El carbono es intercambiado entre la vegetación y la atmósfera a través de la fotosíntesis, y la respiración. La **producción primaria bruta** de una comunidad es la tasa de asimilación de CO₂. La **producción neta del ecosistema** es el excedente de carbono que resulta de la diferencia entre la asimilación y respiración. La **producción primaria neta** es el carbono total asimilado por las plantas menos el que ellas mismas emplean en la respiración y está determinada por la biomasa y la tasa de crecimiento relativo (Fig. 2). En los bosques aunque la tasa de crecimiento relativo es baja, la biomasa es grande y es en ellos donde se da la mayor producción primaria neta. La **producción neta de un ecosistema**, es la diferencia entre la PPN y la respiración heterotrófica (que libera dióxido de carbono de la descomposición de la materia orgánica). Esta producción mide la acumulación de C en el ecosistema, por lo que es especialmente importante en el contexto de la respuesta de los ecosistemas al cambio global y su papel como sumideros o fuentes de carbono (Roy et al. 2001; Terradas, 2001; Munn, 2002).

El CO₂ atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Parte del carbono asimilado es liberado mediante la respiración de los vegetales. El resto del carbono permite la creación de biomasa y el desarrollo de raíces, ramas, hojas y troncos de los árboles (Roy et al. 2001; Bonan, 2002). Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse dan origen al humus, éste proceso de descomposición aporta nuevamente CO₂ a la atmósfera. A su vez, los troncos aumentan su diámetro y altura. Cuando se extrae la madera para obtener diversos productos utilizados en la construcción y termina el período de vida de estos materiales, se degradan y aportan carbono al suelo o a la atmósfera. El carbono se encuentra almacenado en los árboles mientras constituye alguna estructura del mismo. En el momento de ser liberado, por descomposición o quema de biomasa, el CO₂ fluye y regresa al ciclo del carbono (Ordóñez, 1999; Broadmeadow y Matthews, 2003).

La cantidad de carbono contenido en diferentes almacenes, determina la captura unitaria de este elemento. Los almacenes de carbono se encuentran en la vegetación, en la materia orgánica en descomposición, en los suelos y en los productos forestales.

El carbono en la vegetación es la suma del contenido en la biomasa aérea y la biomasa subterránea. La **biomasa aérea** incluye el tronco, las hojas, las ramas y el follaje, mientras que la **biomasa subterránea** esta conformada por las raíces. El carbono en descomposición es el contenido en la materia orgánica en proceso de descomposición. El carbono en el suelo se encuentra en los horizontes edáficos que se forman por la intemperización física, química y biológica de la roca madre que a través del tiempo construye capas por depositación de materiales. Estas capas se acumulan y compactan, almacenando cierta cantidad de carbono. El carbono en los productos forestales es el que se almacena durante el tiempo de vida del producto. Cuando éste concluye, el carbono se incorpora al ciclo dependiendo del proceso de degradación del mismo. Mientras mayor es el período de vida de un producto forestal, el carbono será almacenado por más tiempo (Ordóñez, 1999; Roy et al. 2001; Bonan, 2002; Munn, 2002).

Fig. 2. Reservas y flujos de carbono en un ecosistema forestal

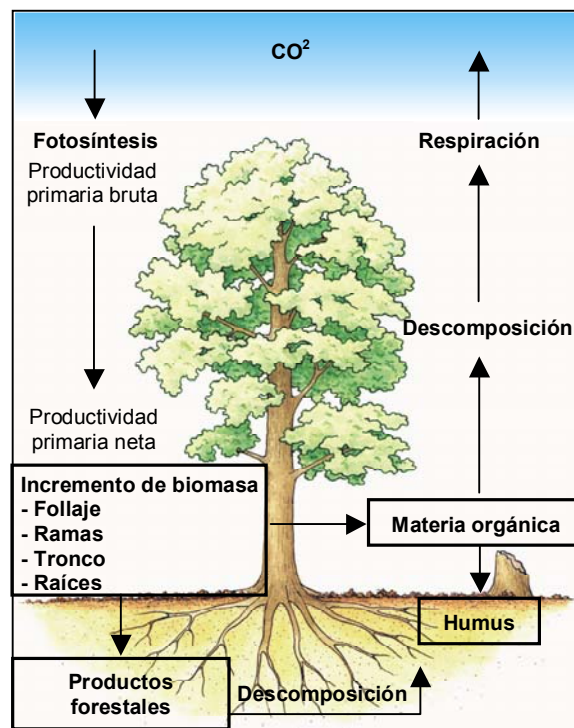


Diagrama modificado de Ordóñez (1999) y Broadmeadow y Matthews (2003).

1.2.3. LOS RESERVORIOS DE CARBONO EN LOS BOSQUES

Los reservorios de carbono en un ecosistema forestal son:

1. Biomasa. Corresponde al carbono contenido en el tronco, las ramas, las raíces y el follaje. La biomasa es la cantidad total de materia orgánica que forma parte de los organismos de una comunidad. Un kilogramo de materia vegetal seca equivale aproximadamente a 500 g de carbono y contiene unos 17,000 kJ de energía (Terradas, 2001).
2. Suelo. Comprende el carbono presente en humus y detritus, dependiendo de sus tasas de residencia y descomposición.
3. Productos. Incluyen seis tipos: madera muerta, madera para papel, madera para empaque, madera para uso energético, madera para construcción y madera para aglomerados.

Sobre la superficie terrestre, la vegetación representa una reserva de 550 GtC, el suelo tiene 1500 GtC en forma de materia orgánica derivada de la descomposición de las plantas y la atmósfera contiene 750 GtC en forma de CO₂. Los bosques a través del proceso fotosintético, absorben 110 GtC/año, mientras que mediante la respiración emiten 55 GtC/año y a través de la descomposición emiten de 54 a 55 GtC/año. El suelo, el detritus y la turba almacenan 172 GtC/año aproximadamente. La respiración y la descomposición son los dos emisores naturales de los bosques. Sus emisores suman un total de 110 GtC/año por lo que hay un balance entre el carbono emitido y el capturado, siempre y cuando no exista deforestación (Ordóñez, 1999; Kirschbaum, 2001; Goudie, 2002; Broadmeadow y Matthews, 2003).

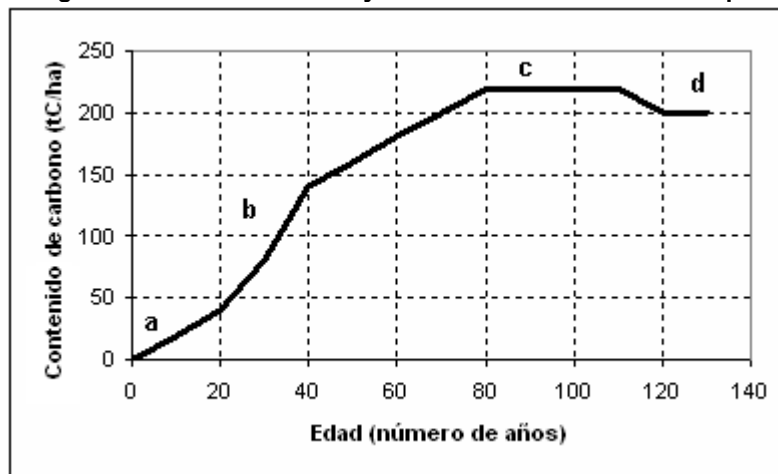
Es importante resaltar dos aspectos con respecto a las reservas de C en los bosques (Sedjo, 2001; Broadmeadow y Matthews, 2003):

- Durante el período de vida de un bosque se capturan más átomos de carbono que los que se liberan, por lo tanto, existe una acumulación neta de este elemento en el ecosistema.
- En general, la cantidad de carbono acumulada en un bosque es finita porque los árboles secuestran CO₂ hasta que alcanzan un punto de equilibrio después de 80 años de vida. Los bosques maduros contienen mayor cantidad de biomasa y por lo tanto almacenan más carbono que los bosques jóvenes.

Existen 4 fases de crecimiento y secuestro de carbono en los bosques templados (Fig. 3):

- a) fase de establecimiento con un promedio de acumulación de 40 tC/ha
- b) fase de vigor con 200 tC/ha
- c) fase de madurez con 220 tC/ha
- d) fase de vejez con oscilaciones de 170 a 220 tC/ha (a causa de las perturbaciones naturales)

Fig. 3. Fases de crecimiento y contenido de carbono en bosques



Fuente: Broadmeadow y Matthews, 2003.

Un bosque no fragmentado almacena aproximadamente 220 tC/ha y un bosque manejado acumula sólo 100 tC/ha (Sedjo, 2001). Las reservas de carbono de un bosque sin fragmentar en su fase de vejez equivalen a 220 tC/ha, sin embargo, un bosque bajo manejo forestal nunca alcanza este nivel en sus depósitos de C. La tasa máxima de acumulación anual de carbono en un bosque con una fase de vigor es de 10 tC/ha mientras que el promedio de acumulación anual en un bosque con manejo forestal es de 3 tC/ha (Broadmeadow y Matthews, 2003).

1.3. EMISIONES Y CAPTURA DE CARBONO

1.3.1. EMISIONES Y CAPTURA DE CARBONO EN EL MUNDO

De 1850 a 1998, se han emitido a la atmósfera 270 (± 30) GtC como resultado de la quema de combustibles fósiles y de la producción de cemento y también, se han liberado 136 (± 55) GtC a causa de la deforestación y del cambio de uso del suelo. Esto ha incrementado el contenido de CO₂ en la atmósfera en 176 (± 10) GtC (Cuadro 3). Actualmente la concentración atmosférica de CO₂ es cercana a 370 ppmv representando más del 30% de aumento en la concentración de este gas desde 1850 y se han previsto futuros ascensos de entre 560 y 800 ppmv. (Calow, 1998; Goudie, 2002; Broadmeadow y Matthews, 2003). La emisión global de bióxido de carbono por combustibles fósiles es de 6 GtC al año. La FAO reportó que la superficie forestal en latitudes menores a 25°, se redujo 14.6 millones de hectáreas por año entre 1980 y 1990 y 12.9 millones de ha anuales entre 1990 y 1995. Lo anterior constituye una pérdida anual de 0.7% del área forestal y una liberación de 1.6 GtC por año (Raison et al. 2001).

El aumento de la agricultura ha permitido la destrucción significativa de la cubierta forestal y la apropiación de las funciones del ecosistema. Gran cantidad del carbono contenido en la vegetación y los suelos forestales es liberada a la atmósfera cuando los bosques son destruidos para introducir cultivos. Entre 1970 y 1990 se perdieron 15.4 millones de hectáreas anuales de bosque con el establecimiento de terrenos agropecuarios lo que significó la liberación de 2 GtC/año; la mayor parte de esta emisión (97%) fue causada por la deforestación en bajas latitudes (Dixon et al. 1994; Bonan, 2002). Se estima que el bosque cultivado para combustibles, madera y papel, libera anualmente 1 GtC/año (Bonan, 2002). Los cambios en la superficie forestal global pueden hacer una contribución significativa en el flujo neto de CO₂ atmosférico al reducir o aumentar las reservas de carbono en la vegetación (Kirschbaum, 2001; Munn, 2002). La cubierta forestal en altas latitudes aumenta alrededor de 1.2 millones de hectáreas por año. Los bosques en el hemisferio norte capturaron alrededor de 0.6–0.7 GtC por año entre 1980 y 1990. De este carbono capturado, 0.21 GtC/año fueron almacenados en la biomasa forestal, 0.08 GtC/año en los productos forestales, 0.15 GtC/año fueron almacenados en la materia en descomposición y 0.13 GtC/año se almacenaron en los suelos forestales (Broadmeadow y Matthews, 2003).

La fuente neta de carbono derivada del cambio de uso del suelo es de 2.0 (± 0.8) GtC/año. Un resultado de la deforestación es la reducción de la cantidad de carbono almacenado en la tierra. El flujo global neto de carbono derivado de cambios de uso del suelo entre 1980 y 1990 fue de 0.9 a 2.5 GtC/año. Actualmente las estimaciones son de 1.6 (± 0.8) GtC/año (Bass et al. 2000; IPCC, 2000; Kirschbaum, 2001). Por otro lado, algunos estudios realizados en Europa, Estados Unidos y Canadá estiman que los bosques templados absorben entre 1.5 y 3.5 GtC/año (Sedjo, 2001; Bonan, 2002; IPCC, 2000; Broadmeadow y Matthews, 2003; Stavins & Richards, 2005).

Cuadro 3. EMISIONES DE CARBONO A NIVEL MUNDIAL: 1850-2000

FUENTE	Años seleccionados (millones de toneladas)							
	1850	1900	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Quema de combustibles fósiles	54	534	1612	2535	3998	5177	5969	6385
Cambio de uso del suelo	503	697	935	1302	1537	1608	2158	2081

Fuente: Stavins & Richards, 2005

1.3.2. EMISIONES Y CAPTURA DE CARBONO EN MÉXICO

En 1995, el IPCC estimó que las emisiones de nuestro país contribuyeron con el 1.45% de las emisiones totales anuales de carbono en el planeta. Actualmente México emite el 1.6% del total de las emisiones de CO₂ a nivel mundial, lo que equivale a 3.9 toneladas per cápita (Goudie, 2002). De seguir las tendencias actuales, las emisiones del país podrían aumentar 50% para el año 2010 y provocarían grandes sequías, reducción de la superficie apta para el cultivo, aumentarían las inundaciones y se producirían cambios en la distribución geográfica de los ecosistemas (Masera, 2006).

En México los principales emisores de carbono en el año 1990 fueron el sector energético con 56% y el sector forestal con 44%. En el 2000 el uso de combustibles fósiles emitió el 68% del total de carbono generado en el país mientras la deforestación produjo el 32%. Por otro lado el INE y la SEMARNAT (2001) proyectaron que las emisiones anuales de carbono del sector forestal se reducirán 33% entre 1995 y 2010 (Cuadro 4).

Cuadro 4. EMISIONES DE CARBONO AL AÑO 2010, MÉXICO

SECTOR	Años seleccionados (MtC-millones de toneladas)				
	1990	1995	2000	2005	2010
Energético	292	333	398	546	726
Forestal	229	207	187	169	153
Total	521	540	585	715	879

Fuente: INE-SEMARNAT, 2001.

El cambio de uso del suelo en México es una fuente importante de gases invernadero, emite un valor estimado de 52.3 MtC/año, tomando en cuenta la deforestación, perturbación, incendios forestales y regeneración de los bosques. Se calcula que las emisiones bajas de carbono por deforestación son entre 51.4 y 53.6 MtC/año; y las emisiones altas son entre 63.4 y 71.0 MtC/año (Masera, 1995; Ordóñez, 1999; De Jong et al. 2000). A pesar de que los bosques tienen un enorme potencial como sumideros de carbono, los procesos de deforestación constituyen la segunda fuente de emisiones de gases de efecto invernadero en nuestro país.

El INE y la SEMARNAT (2001) reportaron que la agricultura y la ganadería produjeron en el año 2000, 55,674 tC, mientras el sector forestal emitió 161,422 tC. Las estimaciones para 1996 indican emisiones totales netas de 157,303 tC resultado del balance entre la producción de 110,073 tC derivados de la combustión y la descomposición de biomasa aérea asociada con los procesos de conversión de bosques a otros usos, y la expulsión de 89,221 tC de los suelos minerales y la fijación de 41,991 tC en bosques manejados y tierras abandonadas. La deforestación y la fragmentación son los principales procesos de cambio en la vegetación natural. La tasa estimada de deforestación en bosques templados entre 1980 y 1990 fue de 167,000 ha y las causas en orden descendente de incidencia fueron: los incendios con 48.2%, la ganadería con 27.5%, la agricultura con 16.4%, la tala ilegal con 4.9% y otras causas con 3% (INE-SEMARNAP, 2000).

En México el potencial de mitigación de CO₂ para el año 2010 es de 393.3 millones de toneladas, de las cuales 67% corresponde al sector forestal y el 33% pertenece al sector energético. El mayor potencial de mitigación de CO₂ se ubica en el sector forestal, específicamente en los bosques templados que para el año 2010 representarán el 49% del potencial total (Cuadro 5) (INE-SEMARNAT, 2001).

**Cuadro 5. POTENCIAL DE MITIGACIÓN DE CO₂
EN MÉXICO (millones de toneladas)**

Opción	2000	2005	2010
Manejo forestal (templado)	97.0	162.0	190.8
Manejo forestal (tropical)	10.9	18.7	34.8
Restauración	16.4	29.7	31.4
Opciones agroforestales	5.4	5.2	5.1
Total del sector forestal	129.7	215.6	262.1
Total del sector energía	19.9	54.7	131.2
Total	149.6	270.3	393.3

Fuente: INE-SEMARNAT, 2001.

En México el manejo de las áreas naturales protegidas y los bosques naturales son una de las mejores opciones para la captación de carbono, ofreciendo simultáneamente una alternativa para incrementar la producción maderable y no maderable, para la conservación de los suelos y la biodiversidad del país. La opción de conservación de las reservas en los bosques templados permite un secuestro de 30 a 170 tC/ha mientras que la reforestación secuestra entre 35 y 79 tC/ha. El manejo forestal tiene un potencial de captura neta unitaria de carbono de 98 a 134 tC/ha⁻¹. Las plantaciones comerciales para la obtención de pulpa capturan entre 70 y 100 tC/ha y los sistemas agroforestales secuestran entre 40 y 75 tC/ha (Masera, 1995; Ordóñez, 1999).

1.3.3. POLÍTICAS DE MITIGACIÓN DE CARBONO MEDIANTE MANEJO FORESTAL EN MÉXICO

El sector forestal en México contribuye a la mitigación del cambio climático a través de la captura de CO₂ mediante prácticas de manejo forestal (INE-SEMARNAT, 2001). Después talar un bosque, éste puede ser regenerado naturalmente o puede ser reforestado y eventualmente se reestablecerá, aunque el reemplazo de un bosque maduro por uno joven, implica una pérdida significativa de carbono. A través de las siguientes opciones se puede maximizar el almacenamiento de carbono en los ecosistemas:

- Conservación, que consiste en la preservación de los bosques que tienen grandes cantidades de carbono por unidad de área, cuidar las áreas naturales protegidas, fomentar el manejo sustentable de bosques y reducir incendios.
- Reforestación, dedicada a recuperar áreas degradadas mediante la protección de cuencas, la restauración para fines de subsistencia, el desarrollo de plantaciones comerciales para madera, pulpa, papel, hule, etc., así como de las plantaciones energéticas (producción de leña y generación de electricidad) y de los sistemas agroforestales. La tasa de pérdida de carbono derivada de una plantación forestal es mucho menor que la tasa de pérdida derivada del cambio de uso del suelo.

Acciones como éstas tienen por objetivo incrementar la fijación y almacenaje de carbono. La primera opción se lograría evitando la fragmentación, degradación y el aclareo de las áreas forestales. La segunda opción incluye el incremento de la densidad de carbono en las reservas (Kirschbaum, 2001).

El sector forestal tiene la capacidad de reducir las emisiones de CO₂ generadas por el sector energético, convirtiéndose en una de las opciones de mitigación más importantes a mediano y largo plazos. Las principales estrategias contempladas por el INE y la SEMARNAT (2001) son:

I. INCREMENTO EN LA CAPTURA DE CARBONO

- Restauración de las áreas forestales degradadas a través del Programa Nacional de Reforestación (PRONARE)
- Establecimiento de plantaciones forestales comerciales a través del Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN)
- Reconversión de tierras agrícolas a uso forestal (Programa de defensa de la frontera forestal)

II. CONSERVACIÓN DEL CARBONO FIJADO EN LA VEGETACIÓN Y EN EL SUELO

- Control de la deforestación
- Protección de los ecosistemas forestales en Áreas Naturales Protegidas
- Manejo sustentable de bosques y selvas
- Programa de Desarrollo Forestal (PRODEFOR)
- Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable de Recursos Forestales en México (PROCYMAF)
- Incremento del uso de productos maderables duraderos provenientes de aprovechamientos sustentables.
- Control de incendios
- Control de plagas y enfermedades

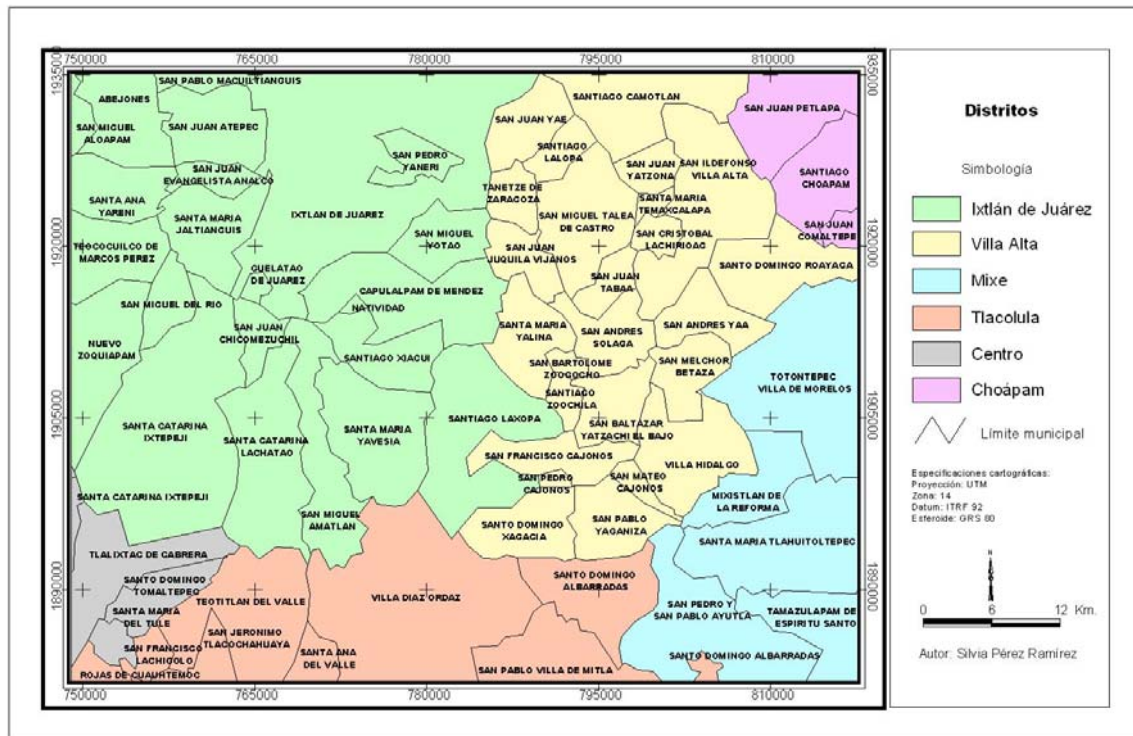
III. SUSTITUCIÓN DE EMISIONES DERIVADAS DEL USO DE COMBUSTIBLES FÓSILES

- Reducir el uso de combustibles fósiles e intensificar el de productos renovables mediante la eficiencia energética, el desarrollo de energías renovables y el uso de combustibles más limpios.
- Mejoramiento de dispositivos que utilizan biocombustible y ampliación de la oferta de biomasa para generar energía.

Este capítulo sirvió de base teórica para el desarrollo de este trabajo pues se definieron palabras clave como: reserva o reservorio, sumidero, fuente, carbono, ciclo del carbono, efecto invernadero, biomasa aérea y subterránea, PPN, PNE, PPB, secuestro y flujos de carbono. Por otro lado, se planteó la problemática del calentamiento global relacionado con el aumento de las emisiones mundiales de CO₂ y se presentó un panorama general de las políticas definidas por el Protocolo de Kyoto, dirigidas a mitigar el cambio climático global. Otro tema importante que se abordó fue el pago por secuestro de carbono. La Sierra Norte de Oaxaca podría entrar en un esquema de pagos por este servicio ambiental considerando su extensa superficie de bosques templados.

El área de estudio se localiza en la porción sur de la Sierra Norte de Oaxaca entre los 17°00' y 17°30' de latitud norte y entre los 96°00' y 96°50' de longitud oeste y tiene una superficie de 368,268 ha que representan casi el 40% de la superficie total de la SNO. La zona esta integrada por 72 municipios de los cuales, 23 pertenecen al distrito de Ixtlán de Juárez, 25 al distrito Villa Alta, 7 al distrito Mixe, 10 a Tlacolula, 4 al distrito Centro y 3 a Choápam (Fig. 5).

Fig. 5. Distritos y municipios del área de estudio



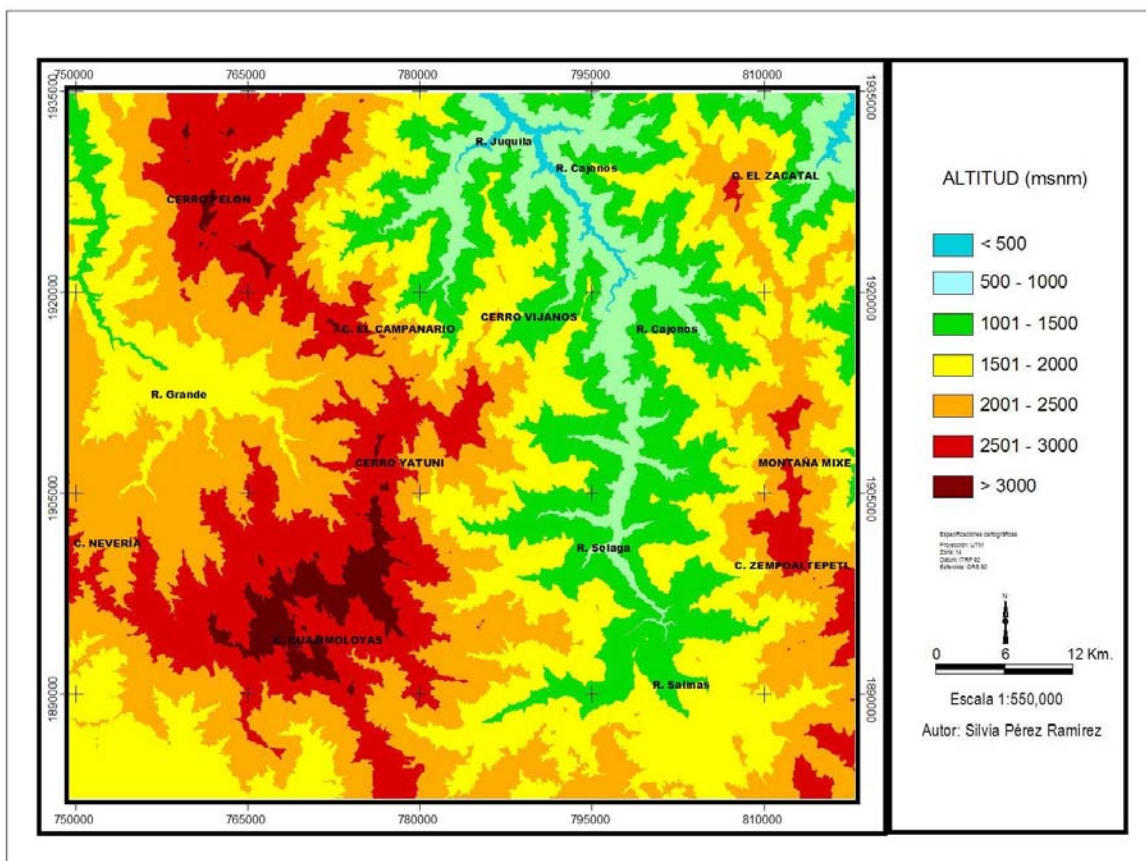
2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

2.2.1. RELIEVE

La Sierra Norte de Oaxaca pertenece a la Sierra Madre Oriental, éste sistema montañoso proviene de Puebla y Veracruz, entra al estado de Oaxaca por el distrito de Tlaxiaco y tiene una dirección noroeste-sureste. Atraviesa los distritos de Teotitlán, Cuicatlán, Ixtlán, Villa Alta y Mixe. En promedio su amplitud es de 75 Km, siendo su longitud de 300 Km dentro de la entidad. Predomina el relieve accidentado con pendientes alrededor de los 18°, y cerca del parteaguas presentan pendientes superiores a 30°. La altitud media es de 2,500 msnm, aunque esta zona presenta un amplio intervalo de categorías altitudinales que van desde los 200 hasta los 3,500 msnm (Fig. 6) (SEGOB, 1988; INEGI, 2000).

Las principales elevaciones en el distrito de Ixtlán son: Cerro Zempoaltépetl (3,280 msnm), Cerro Pelón (3,270 msnm), Nevería (2,950 msnm), Cerro Toba (2,900 msnm), Cuajimoloyas (2,850 msnm), El campanario (2,800 msnm) y Cerro Yatuni (2,620 msnm). En el distrito Mixe las principales montañas son: Cerro de Piedra Blanca (3,050 msnm), Montaña Mixe (2,800 msnm) y Cordón Zempoaltépetl (2,750 msnm) y en el distrito Villa Alta se encuentran el Cerro Meseta (2,520 msnm), Cerro Vijanos (2,050 msnm) y Cordón El Zacatal (1,650 msnm) (Rodrigo, 1994). El relieve de la Sierra Norte de Oaxaca en su porción norte y occidental presenta procesos de remoción en masa y en las cimas dominan los procesos denudativos. El lado oriental esta sujeto a procesos cársticos sobre las calizas del Cretácico. La parte central y sur se caracteriza por procesos de remoción en masa, procesos generados por la disección fluvial, reptación de suelos e intemperismo (García-Mendoza et al. 2004). Los distintos procesos en el modelado del relieve se deben a la presencia de diversos tipos de: roca (ígnea, metamórfica y sedimentaria), suelos, condiciones microclimáticas y vegetación, además de la presencia de fallas y fracturas en la región.

Fig. 6. Principales montañas en el área de estudio



2.2.2. LITOLOGÍA

La litología dominante es de origen ígneo, aunque también se presentan rocas sedimentarias y metamórficas. En la Sierra Norte de Oaxaca existen rocas de origen volcánico que posteriormente sufrieron procesos metamórficos durante el Mesozoico. Las rocas sedimentarias se distribuyen al oriente de la sierra y presentan una secuencia estratigráfica de rocas calizas, lutitas y areniscas del Jurásico, además hay estratos de anhidrita, calizas, dolomitas, margas, lutitas y areniscas en una secuencia continua del Cretácico inferior, cortadas por intrusiones ígneas. También hay un extenso afloramiento de tobas volcánicas del Terciario que se distribuyen heterogéneamente al sur de la Sierra Norte de Oaxaca (INEGI, 2000; García-Mendoza et al. 2004).

2.2.3. SUELOS

Los suelos dominantes en la región de estudio son (SEGOB, 1988; INEGI, 2000):

- Luvisol vértico. Característico de zonas templadas y tropicales con enriquecimiento de arcilla, alta susceptibilidad a la erosión, aptos para el desarrollo de bosques y selvas y de fertilidad moderada.
- Luvisol órtico. Suelo que presenta enriquecimiento de arcilla, fertilidad moderada, son de color pardo o gris, tienen usos agrícolas y cuando se encuentran bajo manejo forestal tienen alto rendimiento.
- Cambisol. Suelo poco desarrollado que se forma bajo cualquier tipo de clima, presenta en el subsuelo una capa porosa y acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, hierro y manganeso, es muy susceptible a la erosión y su productividad va de moderada a alta.
- Regosol. Suelo sin horizontes, somero, pedregoso, de color claro, susceptibilidad alta y de fertilidad moderada.

2.2.4. CLIMA

El clima es Cw_2 , templado subhúmedo con lluvias de verano y ACw , semicálido subhúmedo con lluvias en verano (SEGOB, 1988). La región se ubica en un amplio gradiente altitudinal en donde se registran grandes oscilaciones de temperatura (12 a 22°C) y precipitación (729 mm a 1890 mm). La temperatura registrada en el distrito de Ixtlán oscila entre 16°C y 21°C y la precipitación entre 634.8 mm y 1892.9 mm. En el distrito Mixe la temperatura media corresponde a 20°C y la precipitación oscila entre los 1300 mm y 1800 mm. La temperatura promedio reportada en la estación meteorológica Villa Alta es de 20.9°C y la precipitación media anual es de 1,583.2 mm (INEGI, 2000).

2.2.5. HIDROGRAFÍA

La hidrografía responde a la asimetría de la Sierra Norte de Oaxaca, las corrientes cortas y de carácter torrencial escurren hacia la Fosa de Tehuacán y Valles Centrales; el resto de las corrientes inician en el parteaguas descendiendo por pendientes pronunciadas para dirigirse hacia la llanura del Golfo. La única corriente que cruza la sierra es la del río Santo Domingo. El río Grande corta la Sierra de Juárez de forma paralela al parteaguas debido a un control estructural de fallas y fracturas (García-Mendoza et al. 2004). El distrito Ixtlán de Juárez tiene nueve ríos importantes: Grande, Tepanzaculco, Luvina, Jaltianguis, Xoxutla, Yaqui, San Pedro de la Zarra, Lotoa y Xaeni. Las principales corrientes fluviales del distrito Mixe son: Puxmecatlán, Cajonos, Papaloapan, Grande y Tehuantepec; y en el distrito Villa Alta los ríos más importantes son: Cajonos, Santo Domingo y Peñoles (Fig. 6) (SEGOB, 1988).

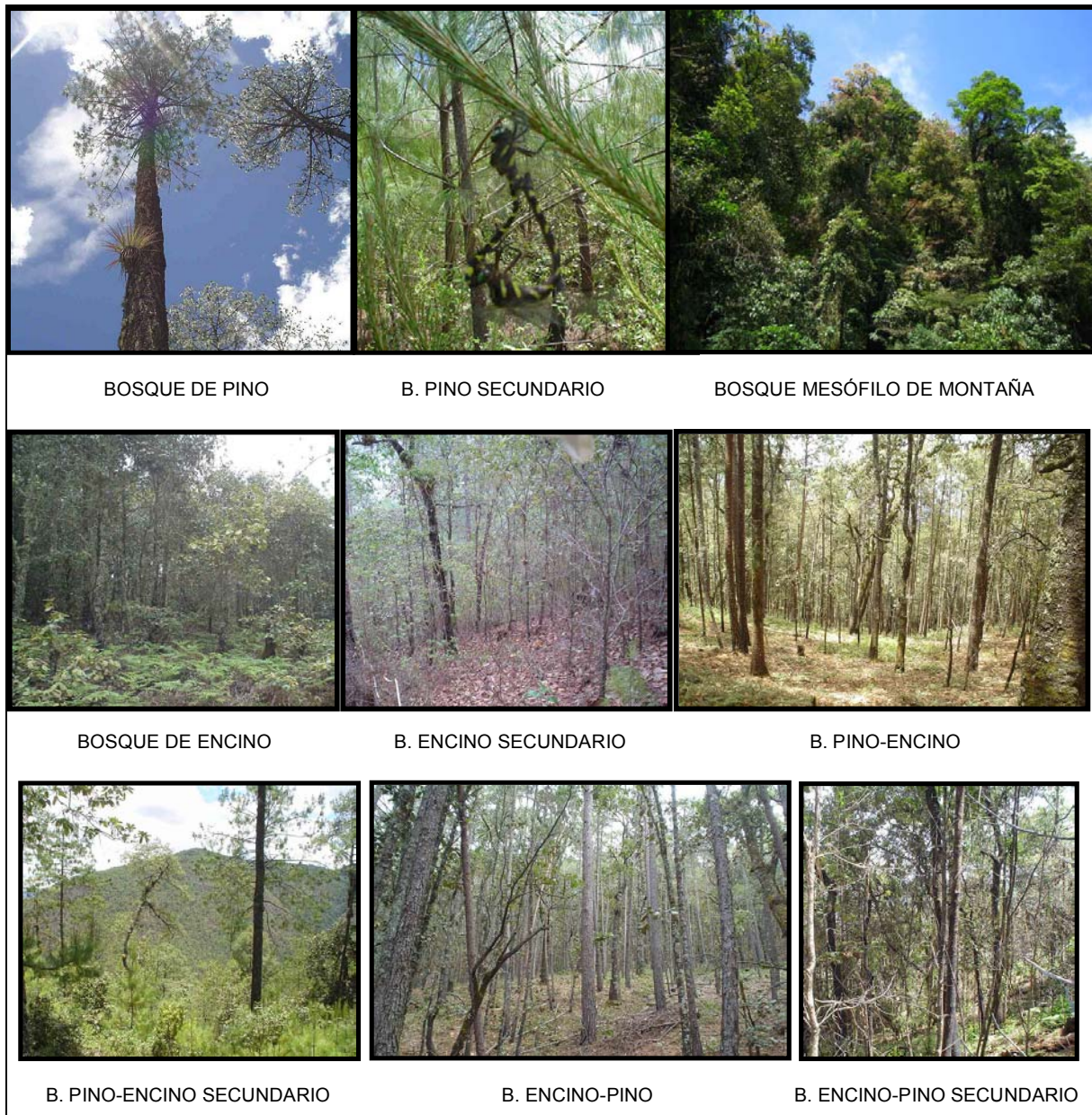
2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA VEGETACIÓN

La gran biodiversidad de la Sierra Norte de Oaxaca está relacionada con su fisiografía, clima y la composición del sustrato. Las comunidades vegetales presentes en la región son los bosques de oyamel, pino, encino, mesófilo de montaña y la selva baja caducifolia (SARH, 1985; Rodrigo, 1994). En este trabajo los ecosistemas analizados fueron el bosque de pino, el bosque de encino y el bosque mesófilo de montaña (Fig. 7).

2.3.1. BOSQUE DE PINO

Se distribuye en grandes extensiones en los distritos de Ixtlán, Villa Alta, Choápam, Mixe y Tlacolula. Estos bosques se desarrollan en elevaciones entre 300 y 3,000 msnm en un clima templado subhúmedo, aunque algunas comunidades se desarrollan en climas semicálidos, en suelos limosos, sobre rocas metamórficas de tipo esquisto; en suelos arcillosos someros y ricos en materia orgánica; sobre rocas sedimentarias como lutita o arenisca o sobre rocas ígneas. Se localizan en topografía variable, desde planicies bien drenadas hasta laderas con declive pronunciado. El estrato principal está compuesto por árboles de 8 a 20 m de altura entre los que sobresalen especies de *Pinus ayacahuite*, *P. hartwegii*, *P. leiophylls*, *P. montezumae*, *P. oaxacana*, *P. oocarpa*; *P. patula*, *P. devoniana*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. strobus var chiapensis* y *P. teocote*. El estrato arbustivo tiene una altura de 2 a 4 metros y se encuentran especies como *Arctostaphylos pungens*, *Gaultheria acuminata*, *Bejaria aestuaris*, *Baccharis heterophylla*, *Amelanchier denticulada*, *Litsea glaucescens*, *Rhus virens*, *Calliandra grandiflora* y *Miconia hemenostigma*; en el estrato herbáceo son comunes *Alchemilla pectinata*, *Arenaria megalantha*, *Lamourouxia tenuifolia*, *Stevia lucida* y *Dryopteris spp.* Existen algunas epifitas de las familias *Orchidaceae* y *Bromeliaceae* (Martínez, 1963; Benassini, 1974; Rodrigo, 1994; Rzedowsky, 1994; García-Mendoza et al. 2004).

Fig. 7. Tipos de bosque en la Sierra Norte de Oaxaca



2.3.2. BOSQUE DE ENCINO

Este tipo de vegetación esta bien representada por ocupar amplias áreas en los distritos de Ixtlán, Villa Alta, Choápam, Mixe y Tlacolula. Usualmente se desarrolla entre 1,600 y 2,000 msnm en un clima templado subhúmedo. Pueden desarrollarse sobre cualquier sustrato geológico, en rocas ígneas intrusivas, calizas, areniscas, lutitas y en rocas metamórficas (Rodrigo, 1994; García-Mendoza et al. 2004).

Habita laderas de declives moderados, con suelos de mediana profundidad, bien drenados, ricos en materia orgánica y moderadamente ácidos. Las especies del estrato arbóreo tienen entre 4 y 20 m de altura. El tipo de árboles predominantes son: *Quercus conspersa*, *Q. elliptica*, *Q. laeta*, *Q. laurina*, *Q. macdougalii*, *Q. rugosa*, *Q. seytophylla*, además de *Pinus spp.*, *Carpinus caroliniana*, *Styrax argenteus* y *Ternstroemia tepezapote*. Los arbustos forman un estrato de 2 a 5 m de altura con especies como *Bejaria aestuaris*, *Gaultheria acuminata*, *Lyonia squamulosa*, *Litsea glaucenscens*, *Myrica cerifera*, *Calliandra grandiflora* y *Symplocos austromexicana*. Entre las herbáceas se pueden encontrar *Salvia gracilis*, *Arenaria megalantha*, *Lobelia sp.* y *Lupinus sp.* En esta vegetación son comunes las plantas trepadoras como *Bornaria hirtella*, *Smilax sp.* y las epifitas de la familia *Bromeliaceae* y *Orchidaceae* (Benassini, 1974; Rodrigo, 1994; Rzedowsky, 1994; García-Mendoza et al. 2004).

2.3.3. BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA

Este tipo de vegetación se distribuye en las laderas y cañadas húmedas de la Sierra Norte de Oaxaca en los distritos de Ixtlán, Villa Alta, Mixe y Choápam. Se establece entre 1000 y 2,500 msnm, donde predominan climas semicálidos y templados. La humedad ambiental es elevada y con frecuencia el bosque está rodeado de niebla. Los suelos son ricos en material húmico, profundos, bien drenados y se derivan principalmente de rocas metamórficas y afloramientos de rocas volcánicas (García-Mendoza et al. 2004).

Fisionómicamente son bosques densos con una rica composición florística. El estrato principal lo forman árboles de 7 a 20 m de altura de *Quercus candicans*, *Pinus patula*, *Liquidambar styraciflua*, *Weinmannia pinnata*, *Styrax glabrescens*, *Ternstroemia sylvatica*, *Ilex discolor*, *Dendropanax populifolius*, *Ocotea helicterifolia*, *Persea americana*, *Podocarpus matudae*, *Symplococarpon purpusii*, *Cyathea sp.*, *Clethra sp.* y *Saurauia spp.* El estrato inferior mide de 1.5 a 6 m de altura representado por especies arbustivas de *Miconia lonchophylla*, *Calyptrocalyx schiedeana*, *Bejaria aestuaris*, *Symplocos vernicosa* y *Mollinedia spp.* Las epifitas son uno de los grupos más diversos en este tipo de vegetación, las familias más importantes son *Orchidaceae*, *Bromeliaceae* y *Piperaceae* y las especies trepadoras son *Celastrus vulcanicula* y *Cavendishia crassifolia*. Entre las variantes del bosque mesófilo de montaña se encuentran comunidades arbóreas achaparradas de 4 a 6 m de altura que se establecen en las cumbres de la Sierra de Juárez, Mixe, Mazateca y Sierra Atravesada (Miranda y Hernández, 1963; Benassini, 1974; García-Mendoza et al. 2004).

La importancia de los ecosistemas forestales radica en tres aspectos (Kojima, 1998; INE-SEMARNAP, 2000; INE-SEMARNAT, 2001; Roy, 2001; Bonan, 2002; Melo, 2002; Munn, 2002):

1. En el aspecto biológico: Son los hábitats para especies de flora y fauna, dan continuidad a los procesos evolutivos, mantienen la diversidad de especies y el patrimonio genético de la nación, además almacenan y reciclan la materia orgánica y los nutrientes.
2. En el aspecto ambiental: Regulan el clima, regulan la composición química de la atmósfera, secuestran y almacenan carbono, protegen las cuencas hidrológicas, favorecen la generación y renovación de suelos fértiles, protegen contra la erosión y controlan la sedimentación, proporcionan la captación, transporte y saneamiento de aguas superficiales y subterráneas.
3. En el aspecto socioeconómico: Proporcionan las condiciones ideales para la producción de agua y alimento así como para la generación de energía hidroeléctrica. Proporcionan un control biológico de plagas y enfermedades. Proveen recursos y materias primas (alimento, madera, combustible, productos farmacéuticos e industriales). Sirven de campo para la investigación científica y tecnológica y generan oportunidades para la recreación y el turismo.

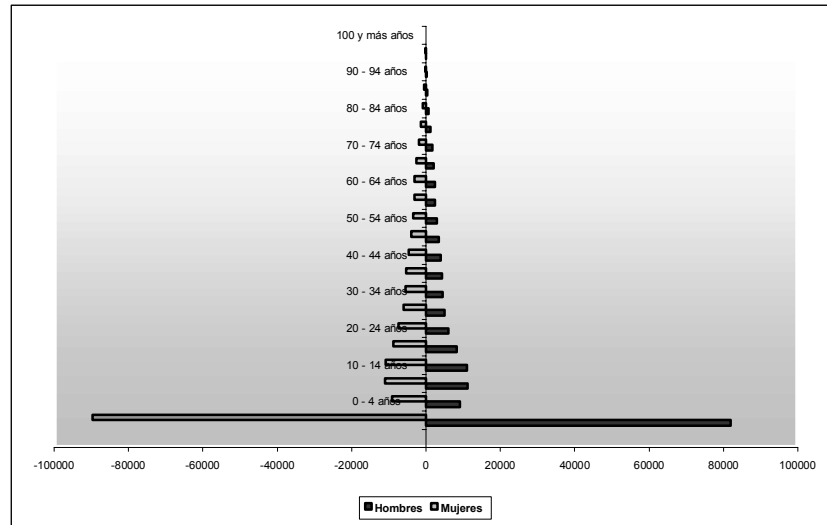
No obstante, los ecosistemas templados son el tipo de vegetación más afectado por el impacto del hombre ya que ocupan áreas favorables para el desarrollo agrícola y se ubican en regiones climáticas atractivas para la población (Rodrigo, 1994; Rzedowsky, 1994). La sobreexplotación, el cambio de uso del suelo, la fragmentación del hábitat, el fuego, y las plagas son causas importantes de la reducción de la superficie forestal en la Sierra Norte de Oaxaca.

2.4. ESTRUCTURA SOCIOECONÓMICA

2.4.1. POBLACIÓN

La población total en la región analizada es de 171,663 habitantes. El 48% de la población son hombres y el 52% son mujeres, debido a que la población femenina es mayor, el índice de masculinidad equivale a 91%. La densidad de población corresponde a 47 habitantes por kilómetro cuadrado. La población es joven pues el 62% es menor de 29 años (Fig. 8). El índice de dependencia por juventud es alto 64%, este índice se obtiene como resultado de la división del número de personas con edades entre 0 y 14 años entre el número de personas con edades entre 15 y 64 años. Mientras que el índice de dependencia por vejez corresponde a 14% y se obtiene de dividir el número de personas mayores de 65 años entre el número de personas entre 15 y 64 años (Cuadro 5) (INEGI, 2000a).

Fig. 8. Pirámide de edades



Cuadro 6. ESTRUCTURA DE LA POBLACIÓN

Grupos Quinquenales de Edad	Total	Distritos					
		Choápam	Ixtlán	Villa Alta	Mixe	Centro	Tlacolula
Total	171663	9726	40218	31812	34225	20792	34890
0 - 4 años	18186	1423	4339	3407	4118	1874	3025
5 - 9 años	22225	1524	5616	4107	5130	2129	3719
10 - 14 años	21835	1366	5496	3719	4941	2282	4031
15 - 19 años	17191	1033	3832	2790	3484	2444	3608
20 - 24 años	16389	763	2915	2264	2484	4994	2969
25 - 29 años	10990	585	2524	1931	1934	1515	2501
30 - 34 años	9971	508	2244	1708	1766	1492	2253
35 - 39 años	9668	493	2070	1678	1676	1596	2155
40 - 44 años	8648	384	1775	1484	1535	1522	1948
45 - 49 años	7474	413	1573	1422	1434	1037	1595
50 - 54 años	6267	339	1455	1196	1225	715	1337
55 - 59 años	5566	233	1383	1183	1075	509	1183
60 - 64 años	5557	234	1320	1378	956	433	1236
65 - 69 años	4562	168	1198	1076	672	401	1047
70 - 74 años	3532	83	992	841	522	278	816
75 - 79 años	2515	75	632	568	417	205	618
80 - 84 años	1576	47	359	413	310	133	314
85 - 89 años	749	12	160	179	118	80	200
90 - 94 años	326	19	47	94	82	22	62
95 - 99 años	148	12	34	29	35	15	23
100 y más años	80	12	11	16	28	7	6
Hombres	81987	4698	19485	15125	16425	9805	16449
Mujeres	89676	5028	20733	16687	17800	10987	18441
Índice de masculinidad	91	93	94	91	92	89	89
Dependencia por juventud	64	87	73	66	81	39	52
Dependencia por envejecimiento	14	9	16	19	12	7	15

Fuente: INEGI - XII Censo General de Población y Vivienda 2000.

La población económicamente activa representa el 65% del total de la población en la Sierra Norte de Oaxaca mientras la población inactiva representa el 35%. El 99% (55,033 hab.) de la PEA es ocupada. El principal sector de actividad es el primario con 41,041 trabajadores ocupados, cifra equivalente al 75% del total de la PEA ocupada. El sector secundario ocupa al 10% de la población y el sector terciario al 14% (Cuadro 6) (INEGI, 2000a).

Cuadro 7. DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN SEGÚN CONDICIÓN DE ACTIVIDAD ECONÓMICA Y SECTOR DE ACTIVIDAD

Distrito	Condición de actividad económica				Población ocupada por sector de actividad		
	Población económicamente activa			PEI	Primario	Secundario	Terciario
	Total	Ocupada	Desocupada				
Ixtlán	10693	10604	89	17002	6728	1586	2074
Villa Alta	12829	12815	14	9554	10009	1384	1287
Mixe	31801	31614	187	32719	24304	2468	4355
Total	55323	55033	290	59275	41041	5438	7716

Fuente: INEGI - XII Censo General de Población y Vivienda 2000.

2.4.2. ACTIVIDADES ECONÓMICAS

El sector económico más importante en la región es el primario que agrupa actividades como la agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza. Le sigue en orden de importancia el sector terciario dedicado al comercio, transporte, servicios y ecoturismo. Y el tercer sector en importancia es el secundario que involucra a la industria manufacturera, industria textil, industria de la construcción y aserraderos (INEGI, 2000a).

La agricultura se enfoca en la producción de maíz, frijol, trigo, papa, chile, jitomate, garbanzo, aguacate, yuca, alfalfa, caña de azúcar, café y frutos como manzana, ciruela, naranja y durazno. La venta de productos agrícolas en la región recauda aproximadamente \$12,164,000 anuales. La ganadería se dedica principalmente a los bovinos y aves de corral. Los bosques de pino, oyamel y encino se destinan principalmente para la explotación de madera en trozo y para la obtención de productos como durmientes, postes, madera en rollo, morillos, celulosa y resinas. Además se obtienen productos no maderables: hongos, heno, musgo, flor silvestre, laurel, poleo y tierra de monte. La producción no maderable tiene un valor de \$660,808 pesos al año y la venta de agua extraída de manantiales genera anualmente \$7,300,000 (Rodrigo, 1994; INEGI, 2002; Martínez, 2005).

2.4.3. MANEJO FORESTAL

Los bosques de la Sierra Norte de Oaxaca fueron aprovechados desde 1940. En 1958 Fábricas de Papel Tuxtepec obtuvo permisos para la explotación del bosque y entre 1981 y 1988 el bosque fue manejado por la unidad de producción denominada Lic. José López Portillo. En la década de los años ochenta, una vez eliminadas las concesiones forestales, las comunidades de la región comenzaron a organizarse para crear empresas forestales (Martínez, 2005). Actualmente la superficie bajo manejo en unidades para la conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre en la Sierra de Juárez es de 156,371 ha (INEGI, 1999).

Los municipios dedicados a la producción forestal y sus respectivas organizaciones productivas comunales son: Ixtlán de Juárez (Unidad Comunal Forestal, Agropecuaria y de Servicios Ixtlán), Santa Catarina Ixtepeji (Unidad productora de materia prima forestal), Nuevo Zoquiapam, San Juan Atepec (Unidad de aprovechamiento forestal Atepec), Teococuilco de Marcos Pérez, Santiago Xiacuí (Unión de comunidades Zapotecas y Chinantecas-UZACHI), Santa Catarina Lachatao (Unidad para el aprovechamiento forestal de pueblos mancomunados), Santa María Yavesía, Santa María Jaltianguis, Calpulalpam de Méndez (UZACHI) y Villa Talea de Castro. De estos municipios, sólo ocho cuentan con planes de manejo forestal (Teococuilco, Atepec, Jaltianguis, Zoquiapam, Xiacuí, Ixtepeji, Calpulalpam e Ixtlán) (López, 2005; Martínez, 2005). En el año 2000, el volumen promedio de producción de madera en estos municipios es de 9,000 metros cúbicos y varía entre 1,500 y 23,000 m³ y el valor promedio de la producción es de 6 millones de pesos aunque fluctúa entre uno y catorce millones de pesos. La producción total de madera fue de 90,453 m³ y generó ganancias de 54 millones 384 mil pesos en el año 2000 (Martínez, 2005).

El municipio Ixtlán de Juárez, inició en 1981 el aprovechamiento de su bosque a través de la Unidad Comunal Forestal, Agropecuaria y de Servicios Ixtlán, esta empresa está certificada a nivel internacional y constituye el mejor ejemplo para las comunidades forestales de la región por presentar un buen manejo del bosque. La comunidad produce 23,838 m³ de madera en rollo al año cuyo valor asciende a 14 millones de pesos. En Ixtlán se realiza el aprovechamiento a través de distintos métodos que favorecen la regeneración del bosque: sistema de árboles padre, método de fuego prescrito y el método de corta selectiva individual. Las principales especies aprovechadas son *Pinus patula*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *P. douglasiana*, *P. rudis* y *P. teocote* (López, 2005; Martínez, 2005).

2.5. CONSERVACIÓN, DESARROLLO FORESTAL SUSTENTABLE Y PROYECTOS DE CAPTURA DE CARBONO EN LA SNO

El gobierno federal decretó en 1937 el Parque Nacional Benito Juárez que tiene una superficie de 2,737 ha y se ubica al norte de la Ciudad de Oaxaca, dentro de la región denominada Sierra Norte de Oaxaca (INEGI, 2002). Su creación se debe al interés por proteger la biodiversidad y el área de recarga de los manantiales que abastecen de agua a la ciudad. El gobierno de Oaxaca y la sociedad civil han trabajado para establecer una política ecológica en la entidad. Desde 1989 se formó el Foro de Ecología, en 1993 se integró la Comisión Oaxaqueña de Defensa Ecológica (CODE), con la finalidad de realizar actividades de conservación de la riqueza biológica. La CODE creó el programa básico de ecología para detener y revertir los procesos destructivos e impulsar la regeneración de la naturaleza. En el año 2000 se establece el Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, este fondo tiene como propósitos: recaudar y dirigir apoyos económicos para la realización de proyectos, programas y planes de protección del medioambiente y la conservación de la diversidad biológica. Por otro lado, el Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza inició en el año 2000, el Programa Oaxaca con el apoyo de la Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales y de las autoridades del Estado de Oaxaca (García-Mendoza et al. 2004).

Actualmente se encuentra en proceso el Proyecto de Conservación de la Biodiversidad en Comunidades Indígenas. El proyecto se lleva a cabo a nivel piloto en el estado de Oaxaca. Tiene como objetivo promover y fortalecer iniciativas comunitarias de conservación en áreas de alta importancia para la biodiversidad, considerando valores culturales y prácticas de manejo tradicional. El proyecto contempla la captura de carbono en prácticas de manejo forestal. Dicho proyecto es gestionado por la SEMARNAT con el fin de ampliar y diversificar la estrategia gubernamental de conservación de los recursos naturales del país. Los recursos financieros provienen del Convenio de Apoyo Financiero con el Banco Mundial y la SEMARNAT es la encargada de la ejecución técnica del proyecto a través del PROCYMAF. Este proyecto tiene como meta aplicar estrategias de desarrollo sustentable para mejorar el aprovechamiento y conservación de recursos naturales por parte de ejidos forestales (INE-SEMARNAT, 2001).

En el estado de Oaxaca existen cinco municipios bajo la dirección de un proyecto denominado Silvicultura Sustentable en la Sierra Norte de Oaxaca. Cuatro de estos municipios pertenecen al área de investigación de este trabajo: Capulalpan de Méndez, Nuevo Zoquiapam, Santiago Xiacuí y San Miguel Aloapam. La superficie de estos municipios corresponde al 6% (21,788 has) del total de la zona de estudio (368,268 has) y contiene 13,803 has de superficie forestal, las cuales equivalen al 6.4% de la región forestal total (214,345) (INE-SEMARNAT, 2001).

El objetivo de este proyecto es consolidar los sistemas forestales en las comunidades Uzachi e Ixeto, con la finalidad de que puedan cubrir sus necesidades sin disminuir sus áreas forestales. También se pretende incrementar el volumen de biomasa en áreas protegidas, en áreas forestales y en áreas con uso agropecuario a través de:

- Protección de los bosques. Mantener y aumentar la biomasa en 31,847 ha mediante la prevención de incendios, plagas y enfermedades.
- Manejo forestal. Mantener y mejorar los estándares de manejo forestal, generando mayores incrementos en biomasa y disminuyendo el impacto de las operaciones de extracción de productos forestales.
- Recuperación de áreas forestales. Llevar a cabo acciones de población forestal en tierras de pastizal y zonas agrícolas en áreas forestales, complementando la regeneración natural y recuperando áreas degradadas.
- Disminución de la tala de bosques. Incrementar la productividad agrícola desarrollando áreas irrigadas y sistemas agroforestales. Generar empleos en actividades distintas de la agricultura para reducir la presión sobre áreas forestales.
- Aumento de la eficiencia en el uso de la madera. Uso de residuos de explotación para el cultivo de hongos comestibles y de mejores equipos para la transformación de la madera.

El proyecto busca la captura de 836 mil toneladas de carbono en 30 años y 27,867 tC al año en la primera fase. La tasa de inversión para la captura de carbono en el primer año es de \$12.92 dólares por tonelada capturada, en el segundo año de \$6.60 tC, en el tercer año \$4.61 tC y en treinta años corresponderá a \$5.93 tC. Las instancias que participan son: Fideicomiso de Recursos Naturales de la Sierra Norte de Oaxaca, Unión de Comunidades Zapoteco-Chinantecas (UZACHI), Unión de Comunidades Ixtlán-Etla, Oaxaca (Ixeto, Estudios Rurales y Asesoría Campesina, A.C.-ERA-) y el Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, A.C. (CCMSS) (INE-SEMARNAT, 2001).

La Sierra Norte de Oaxaca debería aprovechar la puesta en marcha del Proyecto de Conservación de la Biodiversidad en Comunidades Indígenas, que contempla la captura de carbono en prácticas de manejo forestal. De acuerdo a la descripción realizada en este capítulo, se puede concluir que la región tiene un potencial (ecológico y socioeconómico) de mitigación de emisiones de CO₂ muy importante. Por un lado, las características climáticas, edáficas, geológicas y biológicas muestran que los bosques podrían convertirse en grandes sumideros de C. Y por otro lado, el principal sector de actividad en la zona es el primario que ocupa al 75% del total de la PEA. La región tiene más de 60 años de experiencia en el aprovechamiento forestal y el municipio Ixtlán de Juárez constituye un buen ejemplo para las comunidades forestales de la región por tener un buen manejo sustentable del bosque. No obstante, los procesos de cambio de uso del suelo y fragmentación de los bosques requieren ser analizados para definir estrategias de manejo orientadas a la captura de carbono.

CAPÍTULO III. CAMBIO EN LAS CUBIERTAS DEL SUELO DE LA SIERRA NORTE DE OAXACA: 1980-2000

3.1. INTRODUCCIÓN

3.1.1. CUBIERTA DEL SUELO

La cubierta del suelo se refiere a la naturaleza o forma del terreno y se define como la cubierta física y biológica observada sobre la superficie terrestre como vegetación o rasgos creados por el hombre. La cubierta del suelo puede ser identificada visualmente en campo o a través de instrumentos de percepción remota (IPCC, 2000; Galicia et al. En prensa). Mediante el análisis de las cubiertas del suelo, es posible definir la estructura del paisaje y el patrón espacial de las cubiertas. La estructura describe la composición y la forma de los parches en el paisaje, mientras que, el patrón muestra la variedad y abundancia relativa de los tipos de fragmentos en el paisaje (Turner et al. 2001; Galicia et al. En prensa).

La cubierta del suelo es un componente dinámico del sistema climático terrestre. Esta cambia en todas las escalas espaciales y temporales y es alterada por la actividad humana (Munn, 2002). El cambio en las cubiertas forestales del suelo modifica las reservas de carbono en los bosques, incrementa las emisiones de CO₂ a la atmósfera, provoca la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental (IPCC, 2000; Galicia et al. En prensa).

3.1.2. CAMBIOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO EN EL ESTADO DE OAXACA

La superficie del estado de Oaxaca que se consideraba forestal en 1988 era el 32.9%. En ese año la entidad ocupaba el segundo lugar a nivel nacional por la extensión de sus bosques y el quinto lugar de los estados productores de derivados forestales (SEGOB, 1988), mientras que en 1998, Oaxaca ocupaba el quinto lugar en cuanto a superficie forestal del país (INEGI, 2000).

En el trabajo denominado “Procesos de cambio de cubiertas y usos del suelo en el estado de Oaxaca” (Velázquez, et al. 2003), se reportó lo siguiente: entre 1980 y 2001, la deforestación redujo 8% (más de 750,000 ha) de la superficie total del estado y la perturbación afectó al 11% del área con vegetación primaria, en contraste, la recuperación de la vegetación sólo abarcó el 2.6% de la superficie.

En 21 años, más del 40% de la vegetación primaria y 12% de la vegetación secundaria permanecieron sin cambio, mientras que el 21% de la superficie correspondió a tipos de cubierta creados por el hombre. Los bosques templados y tropicales con vegetación primaria convirtieron su superficie a vegetación secundaria en 21% y 17% respectivamente. El 40% de los bosques primarios se convirtieron en secundarios y el 70% de los bosques templados secundarios fueron transformados en pastizales y tierras agrícolas. Más del 2% (150,000 ha) de la superficie de la entidad fue modificada de bosques secundarios a cultivos y pastizales (Velázquez, et al. 2003). Actualmente 38.9% de la superficie de Oaxaca esta cubierta por bosque, el 37.1% por selva, el 14.2% por agricultura y el 8.3% por pastizal (INEGI, 2000).

Las tasas anuales de deforestación reportadas para la Sierra Norte de Oaxaca son: 3% en el bosque de pino, 2% en el bosque de encino y 1% en el bosque mesófilo de montaña. En 20 años, 40% del bosque de pino fue eliminado mientras que 33% del bosque de encino se perdió. El 37% de los bosques primarios fue perturbado y el 23% de los bosques secundarios fue transformado a terrenos agropecuarios. La recuperación de los bosques únicamente representó el 5% (Gómez-Mendoza et al. 2006).

3.2. MÉTODO

3.2.1. MATERIALES

Los materiales utilizados para delimitar y clasificar las cubiertas del suelo fueron los siguientes: una imagen de satélite Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+), resolución 28.5 metros, con fecha 24 de abril de 2000, Path-Row 24-48; un cubrimiento de 42 fotografías aéreas escala 1: 80,000 de la zona 32,36A con fecha de vuelo enero 1979 a noviembre 1980, INEGI; un cubrimiento de 52 fotografías aéreas escala 1:75,000 con fecha de vuelo noviembre-diciembre 1995, INEGI; cartas topográficas digitales escala 1:50,000 con claves E14d38, E14d39, E14d48 y E14d49 de INEGI y cartografía temática de Oaxaca escala 1:250,000 clave E14-9, carta geológica, carta edafológica y carta de uso de suelo y vegetación, INEGI, 1985.

3.2.2. PROCEDIMIENTO

- i. **DEFINICIÓN DE LA LEYENDA.** Para definir la leyenda, inicialmente se realizó una revisión de cubiertas del suelo que se adaptara a la región de estudio y a la escala de las fotografías aéreas. Las clases seleccionadas buscan representar de forma adecuada los atributos de la cubierta vegetal en la zona y cumplir con las expectativas de la investigación. La tipología se realizó a nivel de comunidades vegetales, considerando la altura y el espesor del arbolado.

La formación vegetal bajo estudio corresponde a los bosques templados que comprenden tres tipos de vegetación: bosque de coníferas, bosque de latifoliadas y mesófilo de montaña. Las comunidades vegetales clasificadas son: bosque de pino, bosque de encino, bosque mixto y bosque mesófilo de montaña (Cuadro 8).

Para la definición de la leyenda se tomó en cuenta la vegetación secundaria de tipo arbóreo y arbustivo. El concepto de vegetación secundaria se aplica a la vegetación afectada directa o indirectamente por las actividades del hombre (Rzedowsky, 1994). También se refiere a la comunidad originada por la destrucción de la vegetación primaria que puede encontrarse en recuperación tendiendo al estado original en algunos casos, en otros, presenta un aspecto y composición diferentes (INE-SEMARNAP, 2000).

Otras categorías incluyen tipos de cubierta del suelo creados por el hombre como cultivos, pastizales inducidos y asentamientos humanos y se tomaron en cuenta las superficies cubiertas por agua (presas). Para la definición de la leyenda se consideró también la compatibilidad con otras clasificaciones como las del INEGI y del inventario forestal nacional del año 2000, con la finalidad de facilitar los cotejos.

Cuadro 8. CATEGORÍAS DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO

FORMACIÓN	TIPO DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO	COMUNIDAD	SUBCOMUNIDAD
Bosques	Coníferas	Bosque de pino	Vegetación secundaria arbórea y arbustiva
	Coníferas-latifoliadas	Bosque de pino-encino	
		Bosque de encino-pino	
	Latifoliadas	Bosque de encino	
Mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña		
Selvas	Caducifolia	Selva baja caducifolia	
Pastizal	Pastizal	Pastizal inducido	
Cultivos	Agricultura	Agricultura de temporal y de riego	
Otras cubiertas	Asentamientos humanos	Asentamientos humanos	
	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	

- ii. **FOTOINTERPRETACIÓN.** Mediante fotointerpretación convencional, usando un estereoscopio de espejos y las fotografías aéreas impresas, se realizó la identificación de áreas homogéneas donde se delimitaron polígonos con base en las características de tono, textura, estructura, tamaño, sombra y forma de los elementos en la fotografía (Moncayo, 1970; Sabaté, 1986). De esta manera se definieron superficies ocupadas por distintas cubiertas del suelo y se asignaron códigos a cada una de ellas (Cuadro 9).

Cuadro 9. DESCRIPCIÓN DE LA LEYENDA

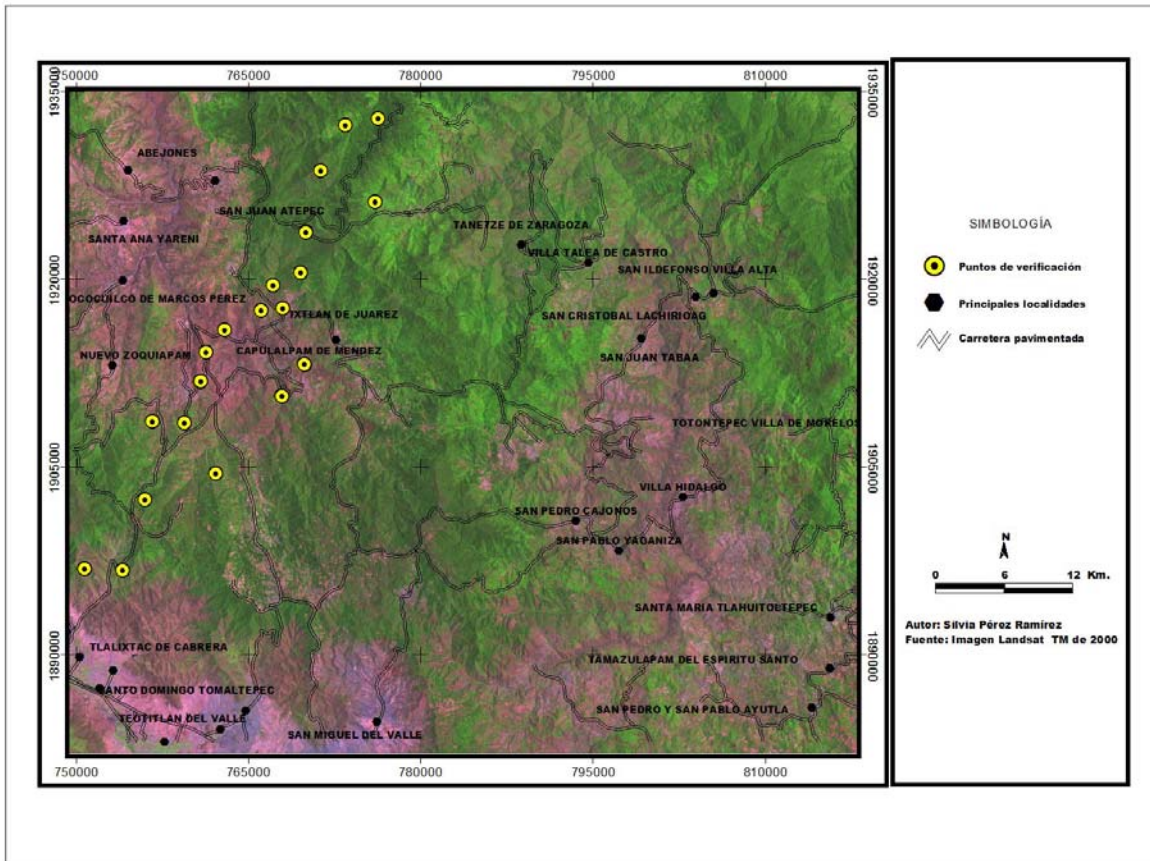
LEYENDA	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
P	1	Bosque de pino
PQ	2	Bosque de pino-encino
Q	3	Bosque de encino
QP	4	Bosque de encino-pino
M	5	Bosque mesófilo de montaña
Bc	6	Selva baja caducifolia
Ptr	7	Bosque de pino: vegetación secundaria arbustiva y arbórea
PQtr	8	Bosque de pino-encino: vegetación secundaria arbustiva y arbórea
Qtr	9	Bosque de encino: vegetación secundaria arbustiva y arbórea
QPtr	10	Bosque de encino-pino: vegetación secundaria arbustiva y arbórea
Mtr	11	Bosque mesófilo de montaña: vegetación secundaria arbustiva y arbórea
Bctr	12	Selva baja caducifolia: vegetación secundaria arbustiva y arbórea
I	13	Pastizal inducido
A	14	Agricultura de temporal/riego
H	15	Asentamientos humanos
C	16	Cuerpo de agua

- iii. **INTERPRETACIÓN DE LA IMAGEN DE SATÉLITE.** Para la interpretación de la imagen de satélite Landsat 7 ETM+, se utilizó el compuesto de bandas RGB 4-5-3. A este compuesto se aplicó la ecuilización del histograma y un realce de bordes para mejorar la identificación de los tipos de vegetación. Posteriormente se realizó una interpretación visual mediante la cual se observó la respuesta espectral de los objetos sobre la imagen, este tipo de interpretación permite obtener mejores resultados que las clasificaciones automatizadas (Mas y Ramírez, 1996; Palacio y Luna 1995).

Las imágenes Landsat y las fotografías aéreas han sido los instrumentos más empleados para realizar inventarios de la cubierta vegetal, estudios sobre sucesión, distribución y fragmentación en los bosques y para determinar cambios en el uso (Dirzo y García 1992; Mas y Ramírez 1996, Mas y Correa, 2000; Agarwal et al. 2002, Ramírez et al. 2003).

- iv. VERIFICACIÓN EN CAMPO. Se realizó una visita de campo con la finalidad de corroborar las cubiertas del suelo catalogadas en la fotointerpretación. Los tipos de cubierta del suelo más propensos a ser confundidos fueron seleccionados para definir el levantamiento de una red de veinte puntos de control por medio de un equipo GPS Garmin. Estos puntos se distribuyeron al poniente de la zona de estudio y se hizo un recorrido de sur a norte abarcando la mayoría de los tipos de cubierta del suelo presentes en la región (Fig. 9).

Fig. 9. Localización de los puntos de verificación



- v. ELABORACIÓN CARTOGRÁFICA. Las fotografías aéreas fotointerpretadas se escanearon para obtener la información en formato digital. En el sistema de información geográfica *Integrated Land and Water Information System* (ILWIS), se realizó la corrección geométrica de las fotografías escaneadas por medio de puntos de control ubicados en las cartas topográficas digitales escala 1:50,000 y a través de un modelo digital de elevación del terreno, para ello se estableció un sigma menor a 3 píxeles de error medio cuadrático (tamaño del píxel de 3m) (López et al. 1996).

Posteriormente se hizo la digitización de los polígonos delimitados en las fotografías aéreas e imagen de satélite correspondientes a los tiempos a comparar: 1980, 1995 y 2000. Se etiquetaron los polígonos generados y se editaron en el programa ArcInfo 8.1. Después en ArcView GIS 3.2 se realizó el cálculo de áreas y perímetros para cada clase de cubierta y se construyeron los mapas de las cubiertas del suelo de la Sierra Norte de Oaxaca para cada fecha.

Finalmente se hizo una sobreposición cartográfica, se elaboró una matriz de transición para cada período y se identificaron los procesos de cambio. La matriz de transición es una tabla con arreglos simétricos que contiene en uno de los ejes, los tipos de cubierta del suelo en el tiempo 1 y en el otro eje, la misma clasificación en el tiempo 2. El diseño de la matriz de transición consiste en ordenar los datos de mayor a menor grado de antropización de la cubierta. Las celdas que conforman la diagonal principal de la matriz representan la superficie de cada clase de cubierta del suelo que no presentó cambios durante el período analizado, mientras que el resto de las celdas reflejan la superficie de los tipos de cubierta que cambiaron de categoría (Bocco et al. 2001; López et al. 2001; Ramírez y Zubieta, 2005).

- vi. **CÁLCULO DE LAS TASAS DE CAMBIO.** Las tasas de cambio se obtuvieron aplicando la fórmula siguiente (FAO, 1996 en Velázquez et al. 2003).

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

Donde:

t : tasa de cambio

S₁: superficie forestal en la fecha 1

S₂: superficie forestal en la fecha 2

n : número de años en el período de análisis

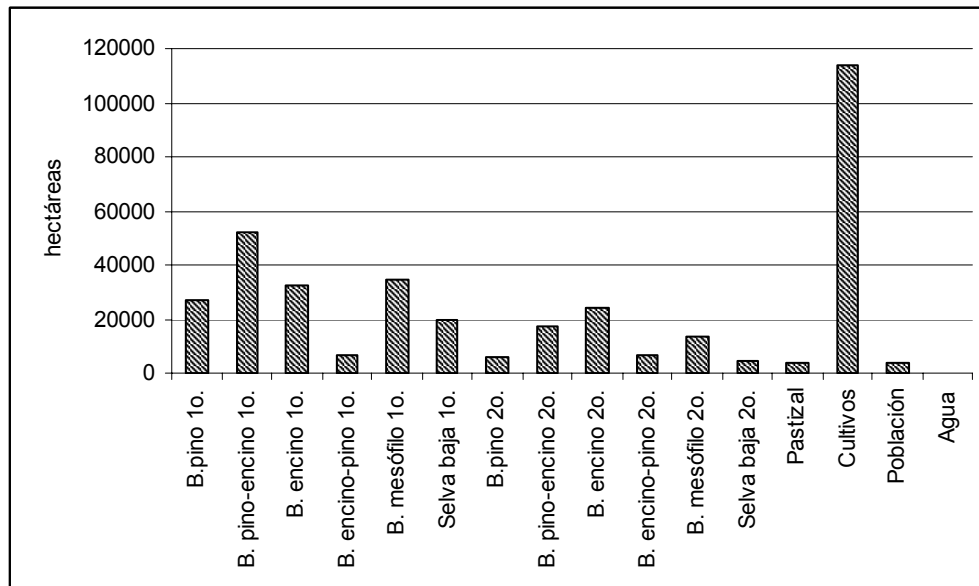
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. CUBIERTAS DEL SUELO EN 1980

En 1980, la cubierta vegetal del suelo abarcaba 246,562 ha que correspondían al 67% del total de la zona de estudio (Fig. 14). Los bosques templados tenían 222,103 ha, de las cuales, 153,340 ha pertenecían a bosques primarios y 68,763 ha a los bosques secundarios. Los tipos de bosque primario con mayor superficie ocupada en orden descendente fueron: pino-encino (23%), mesófilo de montaña (16%), encino (15%), y pino (12%); mientras que los bosques secundarios ocupaban menos de 8% del total del área forestal, con excepción del bosque de encino que conformaba el 11%. La selva baja caducifolia cubría el 7% y el 33% de la región lo ocupaban otras cubiertas como cultivos, pastizal inducido y poblaciones (Fig. 10 y Cuadro 12).

En ese año, cuatro de setenta y dos municipios que integraban la zona presentaron entre 10,000 y 25,000 ha de bosque (Ixtlán de Juárez, Santa Catarina Ixtepeji, Villa Díaz Ordaz y Totontepec Villa de Morelos), diecinueve municipios tenían una superficie boscosa de 3,000 a 6,000 ha y 49 municipios presentaron menos de 3,000 ha de cubierta forestal.

Fig. 10. Superficie de las cubiertas del suelo en 1980



3.3.2. CUBIERTAS DEL SUELO EN 1995

La cubierta vegetal del suelo en 1995 abarcaba 240,553 ha que equivalían al 65% del total del área de estudio. Los tipos de vegetación primaria más importantes de acuerdo a su extensión fueron: el bosque de pino-encino (13%), el bosque mesófilo de montaña (9%) y el bosque de encino (7%), y los tipos de vegetación secundaria que ocupaban más superficie eran: el bosque de encino (8%), el bosque de pino-encino (5%) y el bosque mesófilo (4%). La selva baja caducifolia cubría 24,439 ha que correspondían a casi 7% de la superficie de la región. La superficie dedicada a la agricultura abarcaba cerca del 33% y el pastizal ocupaba 1% (Fig. 11 y 12).

Fig. 11. Superficie de las cubiertas del suelo en 1995

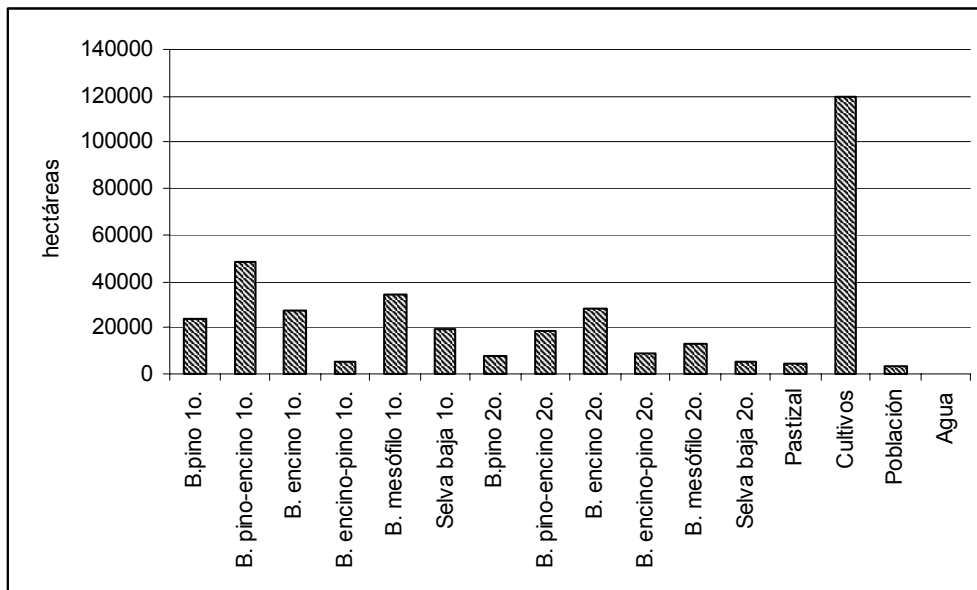
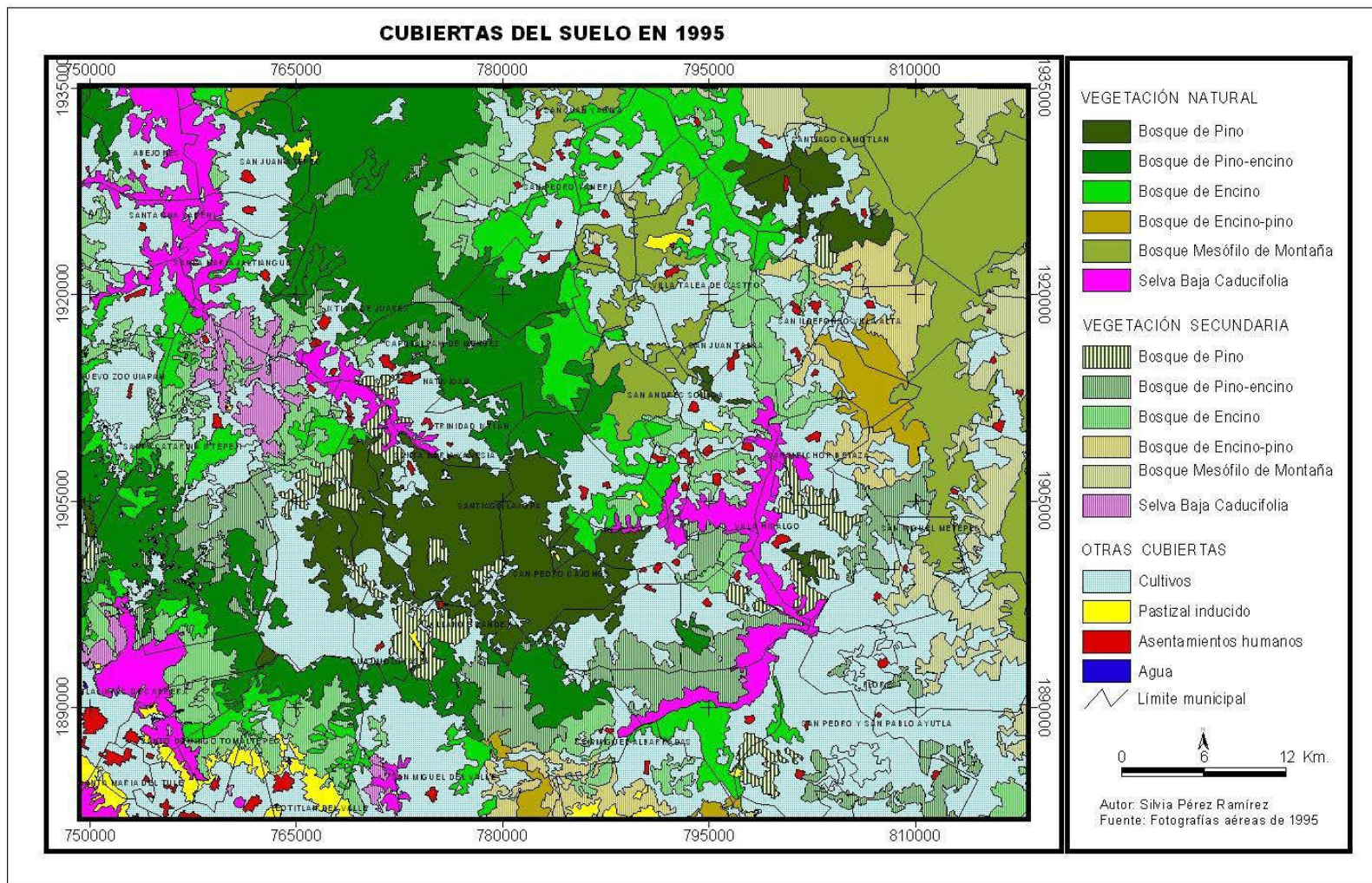


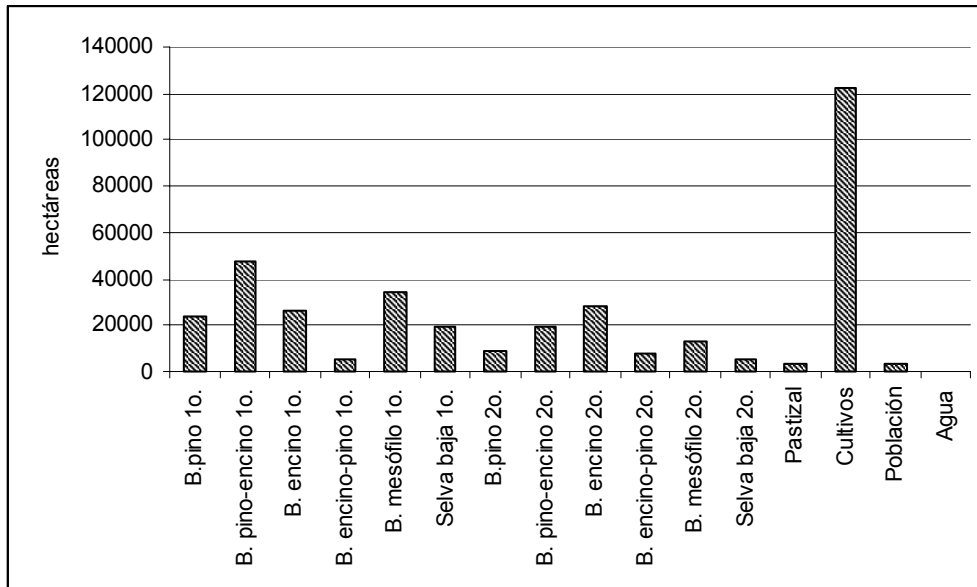
Fig. 12. Tipo de cubiertas del suelo en la Sierra Norte de Oaxaca: 1995



3.3.3. CUBIERTAS DEL SUELO EN 2000

En el año 2000, la cubierta vegetal del suelo tenía una superficie de 238,655 ha que correspondían al 65% del total de la zona de estudio. Los bosques templados abarcaban 214,345 ha, de las cuales, 137,390 ha pertenecían a bosques primarios y 76,955 ha pertenecían a bosques secundarios. Las cinco comunidades vegetales con mayor distribución en la zona fueron: el bosque de pino-encino primario (13%), el bosque mesófilo de montaña primario (9.3%), el bosque de encino secundario (7.7%), el bosque de encino primario (7.2%) y el bosque de pino (6.5%). El 7% de la región estaba cubierta por selva baja caducifolia, ubicada principalmente en las vertientes de los ríos Grande y Cajonos y sobre algunos lomeríos con altitudes menores a 1000 m. Los cultivos eran el tipo de cubierta con mayor extensión equivalente al 33%. El pastizal inducido y los asentamientos humanos ocupaban alrededor del 1% de la superficie total de la zona (Fig. 13 y 14).

Fig. 13. Superficie de las cubiertas del suelo en 2000



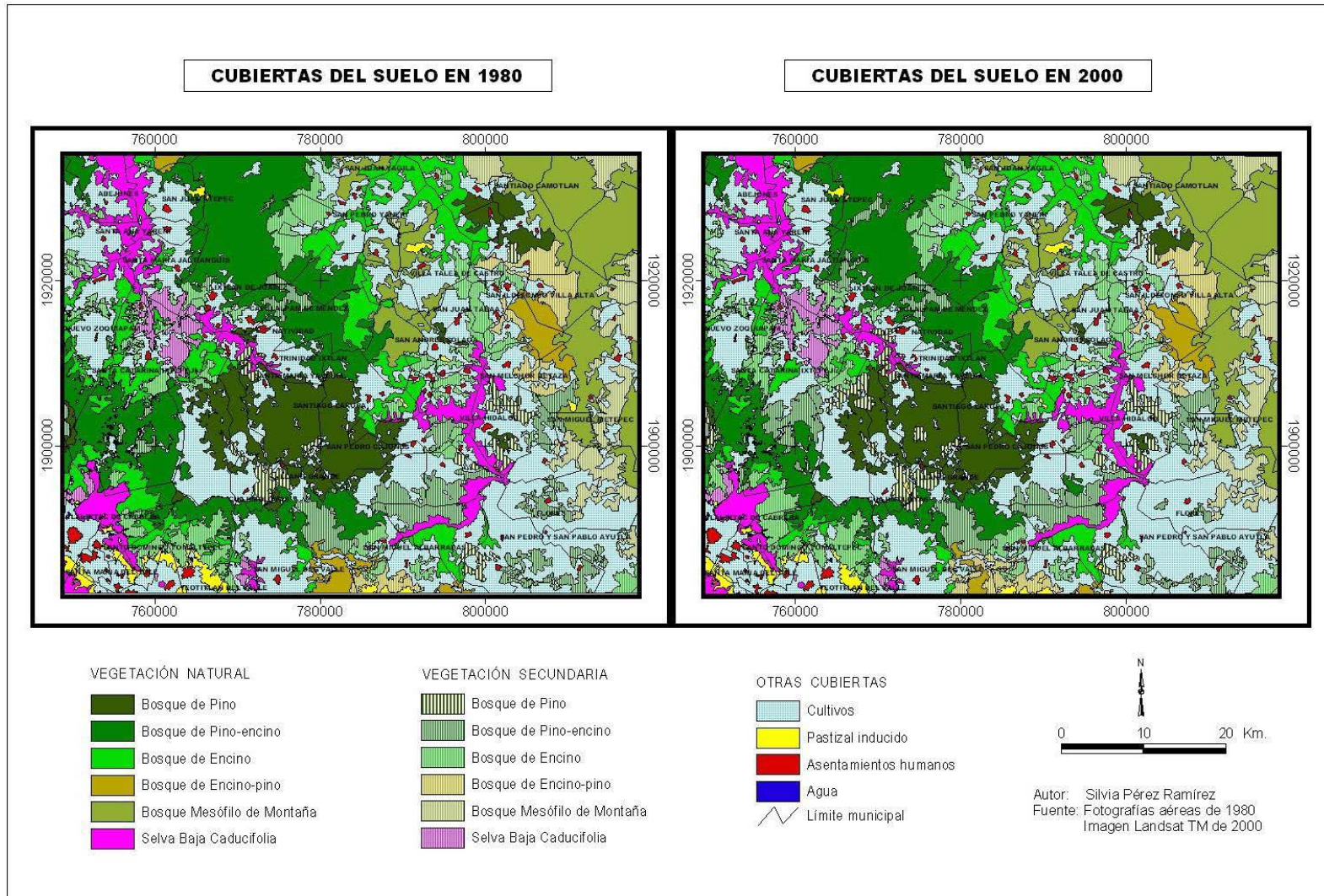
De los 72 municipios que integran la zona de estudio, el municipio que contaba con mayor superficie de vegetación era Ixtlán de Juárez ya que tenía cerca de 25,000 ha de bosque templado, de las cuales 79% pertenecían a bosques primarios y 21% a bosques secundarios. En orden de importancia le seguían los municipios Santa Catarina Ixtepeji, Villa Díaz Ordaz y Totontepec Villa de Morelos, que poseían entre 10,000 y 20,000 ha de bosque mientras que Santiago Laxopa, Capulalpam de Méndez, San Ildefonso Villa Alta, Santa María Yavesía, San Juan Petlapa, Teotitlán del Valle, Santiago Camotlán y Santiago Choapam contaban con una cubierta forestal entre 6,000 a 10,000 ha. El 51% de los municipios presentaban entre 1,000 y 6,000 ha de bosque y 33% de los municipios tenían menos de 1,000 ha (Cuadro 10).

Cuadro 10. MUNICIPIOS Y SUPERFICIE FORESTAL EN EL AÑO 2000

Municipio	Superficie en hectáreas			Municipio	Superficie en hectáreas		
	Bosques templados	Otras cubiertas ¹	Total		Bosques templados	Otras cubiertas ¹	Total
Abejones	1067	4261	5328	San Pablo Macuiltanguis	818	197	1015
Asunción Cacalotepec	2	0	2	San Pablo Villa de Mitla	2778	3095	5873
Capulalpam de Méndez	8639	931	9571	San Pablo Yaganiza	2220	2122	4342
Guelatao de Juárez	148	341	489	San Pedro Cajonos	2	350	352
Ixtlán de Juárez	24548	5628	30176	San Pedro y San Pablo Ayutla	2431	8781	11213
Mixistlan de la Reforma	2153	2794	4948	San Pedro Yaneri	1607	603	2210
Natividad	56	168	224	Santa Ana del Valle	358	1232	1590
Nuevo Zoquiapam	3306	3364	6670	Santa Ana Yareni	500	3623	4123
Rojas de Cuauhtemoc	0	1000	1000	Santa Catarina Ixtepeji	14604	6549	21154
San Andrés Huayapam	362	97	458	Santa Catarina Lachatao	4786	5192	9978
San Andrés Solaga	1569	2390	3959	Santa María del Tule	0	1223	1223
San Andrés Yaa	2972	846	3817	Santa María Guelace	0	30	30
San Baltazar Yatzachi El Bajo	995	2655	3650	Santa María Jaltepec	1391	4371	5763
San Bartolome Zoogocho	500	174	673	Santa María Temaxcalapa	367	211	577
San Cristóbal Lachirioag	432	846	1278	Santa María Tepantlali	39	0	39
San Francisco Cajonos	2475	1618	4094	Santa María Tlahuitoltepec	3934	8132	12066
San Francisco Lachigolo	0	1302	1302	Santa María Yalina	4062	642	4705
San Ildefonso Villa Alta	7434	3666	11100	Santa María Yavesía	7374	1396	8769
San Jerónimo Tlacoahuaya	94	1674	1768	Santiago Camotlán	6370	866	7236
San Juan Atepec	1811	3767	5577	Santiago Choapam	6110	0	6110
San Juan Chicomezuchil	1001	1001	2002	Santiago Lalopa	1183	647	1830
San Juan Comaltepec	1200	0	1200	Santiago Laxopa	8751	2838	11590
San Juan Evangelista Analco	131	1512	1643	Santiago Xiacui	1484	3162	4646
San Juan Juquila Vijanos	1263	1564	2827	Santiago Zochila	460	610	1070
San Juan Petlapa	6954	0	6954	Santo Domingo Albarradas	3895	3223	7118
San Juan Tabaa	686	1190	1876	Santo Domingo Roayaga	5856	840	6696
San Juan Yae	2108	1694	3803	Santo Domingo Tomaltepec	1636	1557	3192
San Juan Yatzone	1189	691	1879	Santo Domingo Xagacia	1791	3029	4820
San Mateo Cajonos	153	803	956	Tamazulapam del Espíritu Santo	1750	4001	5750
San Melchor Betaza	1335	2202	3537	Tanetze de Zaragoza	1102	948	2050
San Miguel Aloapam	373	529	902	Teococuilco de Marcos Pérez	1746	3062	4809
San Miguel Amatlán	4075	2943	7018	Teotitlán del Valle	6571	3507	10078
San Miguel del Río	1435	963	2398	Tlalixtac de Cabrera	2440	4601	7041
San Miguel Talea de Castro	4049	3395	7444	Totontepec Villa de Morelos	11855	4150	16005
San Miguel Yotao	3274	574	3848	Villa Díaz Ordaz	13649	8086	21735
San Pablo Etla	19	6	25	Villa Hidalgo	2619	4456	7075
				Total	214345	153923	368268

1. Otras cubiertas incluyen superficies de selva baja caducifolia, cultivos, pastizal inducido, agua y asentamientos humanos

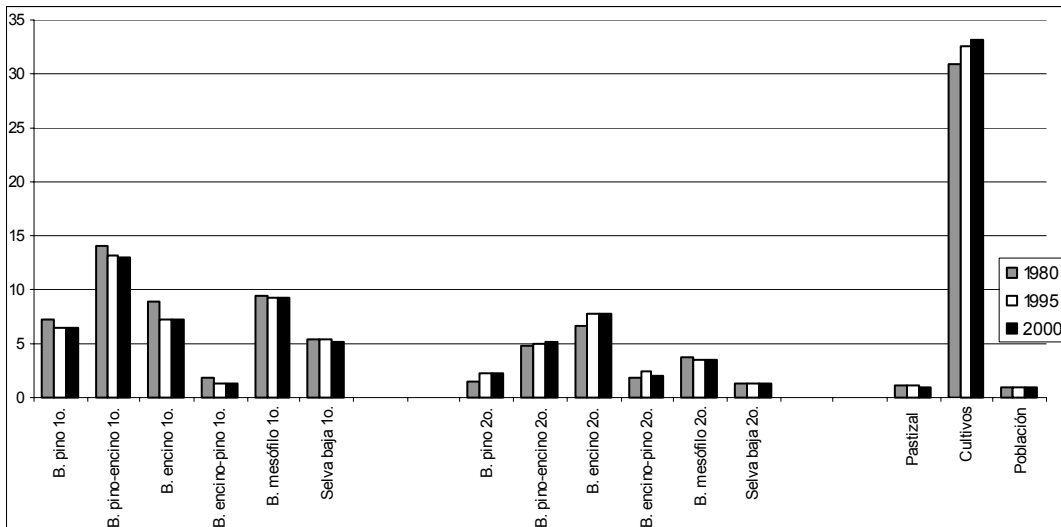
Fig. 14. Cubiertas del suelo en la Sierra Norte de Oaxaca en 1980 y 2000



3.3.4. TRANSFORMACIÓN DE LAS CUBIERTAS DEL SUELO: 1980-2000

Entre 1980 y 2000, todos los tipos de vegetación primaria disminuyeron su superficie original, la cubierta que perdió mayor porcentaje fue el bosque de encino-pino con 28% (1,954 ha eliminadas), seguida del bosque de encino con 19% (6,223 ha), el bosque de pino 11% (2,878 ha), el bosque de pino-encino 8% (4,099 ha), el bosque mesófilo de montaña 2% (870 ha) y la selva baja caducifolia 1% (152 ha). Todos los tipos de vegetación secundaria aumentaron su superficie en más de 9% (exceptuando al bosque mesófilo de montaña que perdió 6% de su cubierta original). El pastizal inducido perdió 9% de su extensión mientras que los cultivos incrementaron su superficie en 7% (Fig. 14).

Fig. 15. Porcentaje de la superficie ocupada por tipo de cubierta del suelo



Los 16 tipos de cubiertas del suelo identificados, se agruparon en tres categorías para su análisis. El primero esta integrado por las comunidades de vegetación natural primaria (bosque de pino, encino, mixto, bosque mesófilo de montaña), el segundo incluye tipos de vegetación secundaria y el tercer bloque comprende cubiertas del suelo creadas por el hombre (cultivos, pastizal inducido, presas y poblaciones).

Durante el período 1980-2000 la vegetación primaria perdió 16,175 ha, lo que significó una disminución del 4% de su extensión original. La vegetación secundaria aumentó su extensión en 8,268 ha y la superficie ocupada por otras cubiertas ganó 7,907 hectáreas.

En 1980, la vegetación primaria ocupó 172,915 ha (47% del total del área de estudio) de las cuales, 8% (14,104 ha) se convirtieron en vegetación secundaria y 2% (2,865 ha) se transformaron en terrenos agropecuarios, mientras alrededor del 90% de este tipo de vegetación permaneció sin cambio. El 8% (5,534 ha) de la superficie de vegetación secundaria cambió a cultivos y pastizales y sólo el 1% (792 ha) se recuperó como vegetación primaria. Las cubiertas creadas por el hombre permanecieron casi sin cambio pues sólo el 0.4% (491 ha) de su extensión presentó revegetación, proceso que implica el establecimiento de vegetación secundaria por abandono de parcelas agrícolas o pecuarias (Ramírez y Zubieta, 2005) (Cuadro 11).

Cuadro 11. MATRIZ DE CAMBIO EN LAS CUBIERTAS DEL SUELO ENTRE 1980 Y 2000 (ha)

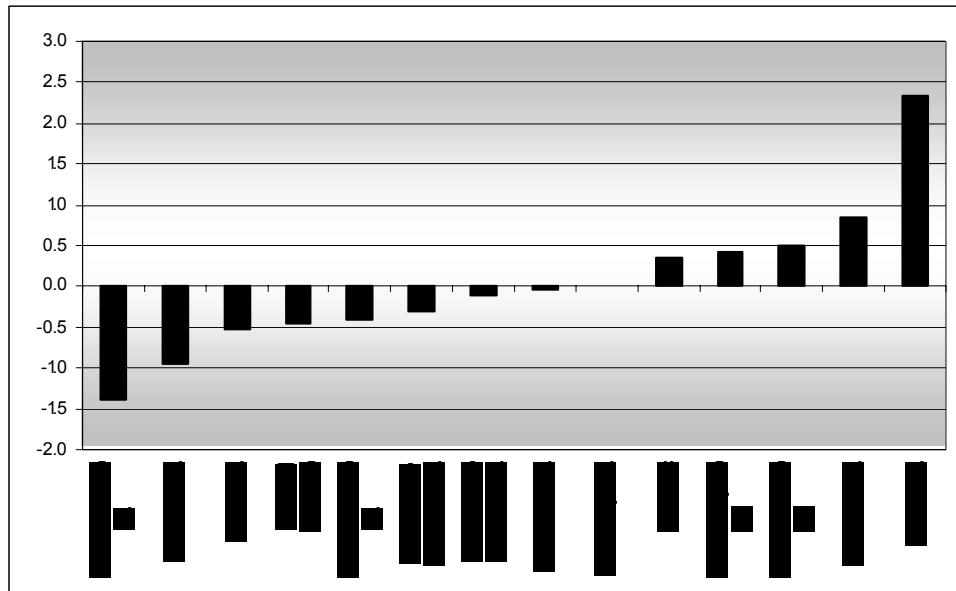
2000 \ 1980	Vegetación primaria	Vegetación secundaria	Otras cubiertas	Total	%
Vegetación primaria	155948	14104	2865	172915	47
Vegetación secundaria	792	67321	5534	73647	20
Otras cubiertas	0	491	121215	121706	33
Total	156740	81915	129613	368268	100
Porcentaje	43	22	35	100	

3.3.4.1. TASAS DE CAMBIO

Las tasas de cambio obtenidas en el período 1980-2000 que se muestran en la Fig. 16, contienen barras con valores negativos, lo que significa una pérdida en la extensión de las cubiertas del suelo, éste comportamiento es característico de las comunidades vegetales primarias y las barras con valores positivos muestran el fenómeno contrario.

El bosque primario de encino-pino presentó la tasa más alta de cambio por pérdida de superficie (1.4% anual), seguido del bosque primario de encino (1% anual) y de los bosques primarios de pino y mesófilo de montaña (<0.5% anual). Mientras que casi todos los tipos de vegetación secundaria tuvieron un incremento en su superficie, al presentar una tasa de cambio entre 0.5% y 2%, exceptuando al bosque mesófilo de montaña que disminuyó su área a una tasa de 0.3%. Este fenómeno en el bosque mesófilo refleja el proceso de pérdida total del ecosistema ya que se está sustituyendo por cultivos y pastizales (Fig. 16). La selva baja caducifolia tuvo cambios mínimos y los terrenos dedicados a la agricultura incrementaron su área en 0.4% anualmente. Comparando las tasas de cambio obtenidas en este análisis con las tasas de cambio calculadas en el estado de Oaxaca para el período 1980-2001 (Velázquez et al. 2003), se puede decir que en general, los resultados son similares, ya que el trabajo de Velázquez (idem), reportó que los bosques primarios pierden alrededor de 1% de su superficie por año, mientras que los bosques secundarios incrementan en promedio 1% anualmente. La tasa de deforestación anual en la zona resultó de 0.3%.

Fig. 16. Tasas de cambio por tipo de cubierta del suelo: 1980-2000



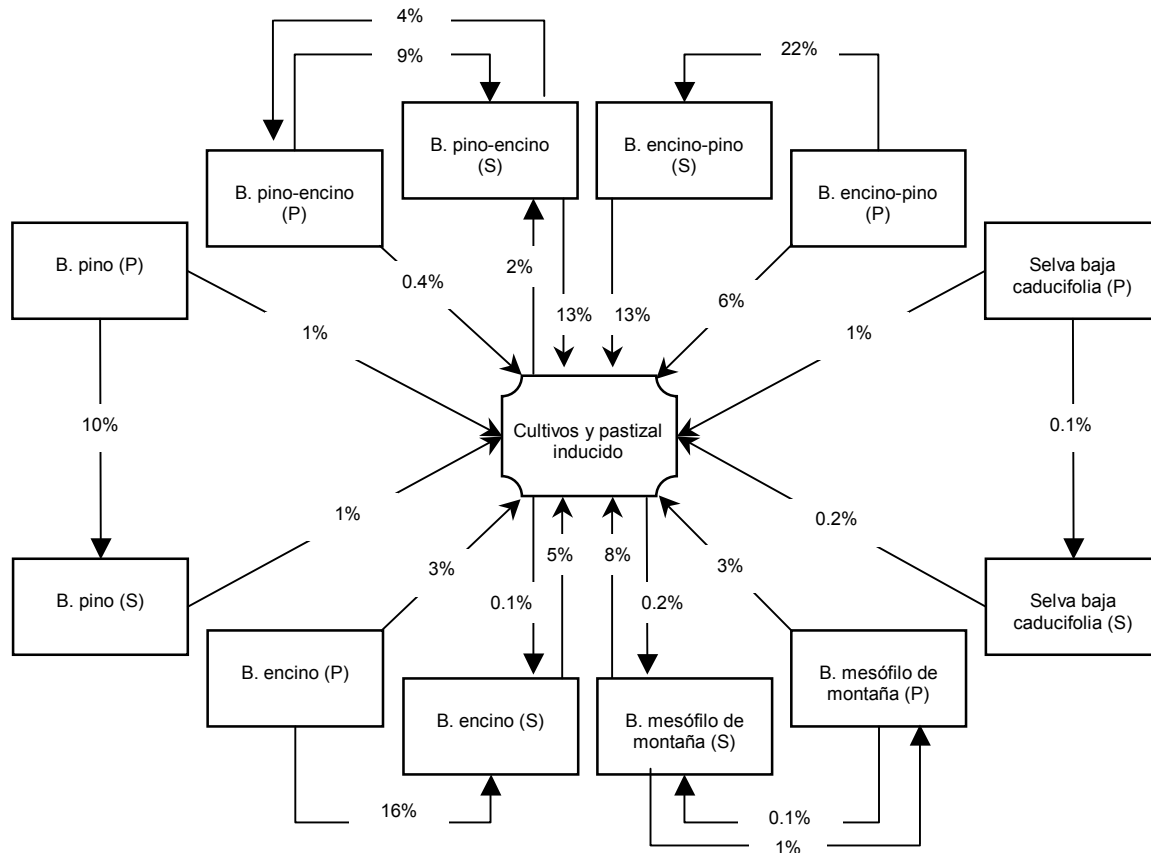
3.3.4.2. PROCESOS Y FACTORES DE CAMBIO EN LAS CUBIERTAS DEL SUELO

El diagrama de transición de la figura 17, refleja la dinámica de cambio de uso del suelo en la zona. Existe un patrón de pérdida y recuperación determinado por las prácticas agropecuarias de usufructo y descanso de la tierra en 5 tipos de bosque: pino-encino secundario (perdió 13% y recuperó 2%), pino-encino primario (perdió 9% y recuperó 4%); mesófilo de montaña primario (perdió 3.1% y recuperó 1%) y los bosques secundarios de encino y mesófilo (perdieron más del 5% y recuperaron menos de 0.2%). Otro patrón observado es la pérdida total de los siete 7 ecosistemas restantes pues no presentan ninguna recuperación (bosques de pino, de encino, de encino-pino y las selvas bajas).

Los ecosistemas forestales de la Sierra Norte de Oaxaca sufren una deforestación motivada por la expansión de la superficie dedicada a la agricultura y la ganadería. La agricultura de subsistencia altera los ecosistemas y provoca el desprendimiento de grandes cantidades de CO₂ que se concentran en la atmósfera. El manejo forestal inadecuado y la tala clandestina en la región constituyen otros factores de cambio en las cubiertas del suelo. La tala clandestina del bosque provoca la fragmentación de los ecosistemas y la pérdida de hábitats.

La deforestación es un proceso que afecta de manera negativa la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, ya que la reducción de la cubierta vegetal ocasiona cambios regionales de los regímenes de temperatura y precipitación, favoreciendo con ello el calentamiento global y la disminución en el secuestro de bióxido de carbono (Mata, 1994; INE-SEMARNAT, 2001; Munn, 2002).

Fig. 17. Diagrama de transición de las cubiertas del suelo: 1980-2000



En el diagrama (P) corresponde a vegetación primaria y (S) a vegetación secundaria

La deforestación neta durante el período de estudio fue de 22,502 ha, que corresponden a un promedio de 1,125 ha perdidas anuales. Los bosques primarios de encino y pino-encino redujeron su superficie entre 200 y 300 hectáreas por año; el bosque de pino perdió 144 ha anuales y los bosques de encino-pino y mesófilo de montaña perdieron un área menor a 100 ha/año. Por otro lado, todas las comunidades vegetales secundarias aumentaron su superficie anual entre 30 y 200 hectáreas, exceptuando al bosque mesófilo secundario que perdió 40 ha/año (Cuadro 12).

Cuadro 12. SUPERFICIES Y CAMBIOS EN LAS CUBIERTAS DEL SUELO EN 1980, 1995 Y 2000

TIPOS DE CUBIERTA	SUPERFICIE EN 1980		SUPERFICIE EN 1995		SUPERFICIE EN 2000		CAMBIOS			CAMBIO ANUAL ha/año
	ha	%	ha	%	ha	%	1980-1995	1995-2000	1980-2000	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	ha	ha	
VEGETACIÓN NATURAL										
Bosque de pino	26795	7.3	24195	6.6	23918	6.5	-2600	-277	-2878	-144
Bosque de pino-encino	51730	14.0	48526	13.2	47631	12.9	-3204	-895	-4099	-205
Bosque de encino	32710	8.9	26882	7.3	26487	7.2	-5829	-395	-6223	-311
Bosque de encino-pino	7061	1.9	5107	1.4	5107	1.4	-1954	0	-1954	-98
Bosque mesófilo de montaña	35043	9.5	34305	9.3	34173	9.3	-737	-132	-870	-44
Selva baja caducifolia	19576	5.3	19544	5.3	19424	5.2	-31	-121	-152	-8
SUBTOTAL	172915	47.0	158560	43.1	156740	42.6				
VEGETACIÓN SECUNDARIA										
Bosque de pino	5710	1.6	8145	2.2	8379	2.3	2436	233	2669	133
Bosque de pino-encino	17657	4.8	18645	5.1	19382	5.3	987	737	1725	86
Bosque de encino	24415	6.6	28422	7.7	28481	7.7	4007	58	4066	203
Bosque de encino-pino	7154	1.9	8725	2.4	7780	2.1	1571	-945	626	31
Bosque mesófilo de montaña	13825	3.8	13161	3.6	12988	3.5	-664	-174	-838	-42
Selva baja caducifolia	4886	1.3	4894	1.3	4905	1.3	9	11	20	1
SUBTOTAL	73647	20.0	81993	22.3	81915	22.2				
OTRAS CUBIERTAS										
Pastizal inducido	4034	1.1	4056	1.1	3657	1.0	22	-398	-377	-19
Cultivos	114074	31.0	120060	32.6	122357	33.2	5987	2296	8283	414
Asentamientos humanos	3558	1.0	3558	1.0	3558	1.0	0	0	0	0
Agua	40	0.0	42	0.0	42	0.0	1	0	1	0
SUBTOTAL	121706	33.0	127715	34.7	129613	35.2				
ÁREA TOTAL	368268	100.0	368268	100.0	368268	100.0				

Además de la deforestación, otro de los factores de cambio en la cubierta forestal de la Sierra Norte de Oaxaca fueron los incendios registrados en 1998 y 1999. Durante el año 1998 se presentaron 31 eventos que afectaron 10,797 ha, cerca del 1.2% de su superficie. El mayor número de hectáreas incendiadas se registraron en el estrato arbustivo con 4,776 ha quemadas y en áreas de renuevo con 3,634 ha afectadas. El 96.5% (10,418 ha) de la superficie quemada, se incendió a causa de las actividades agropecuarias en la región (González, 2005). En 1999, la región registró 41 incendios que dañaron 3,356 ha. El distrito más afectado en ese año fue el Mixe que presentó 25 incendios y 1,890 ha quemadas, Villa Alta tuvo 1,377 ha afectadas por 3 incendios e Ixtlán 89 ha quemadas y 13 incendios (INEGI, 2000).

Los ocho cambios registrados en la zona fueron clasificados en 4 grupos (Cuadro 13):

1. Pérdida: eliminación de la vegetación natural o secundaria por cambio a usos agropecuarios.
2. Perturbación: pérdida o aclarado del arbolado sin cambio en el uso del suelo (Ramírez y Zubieta, 2005).

3. Recuperación: restablecimiento del arbolado denso sobre áreas perturbadas, aclaradas o de vegetación arbustiva y restablecimiento del arbolado sobre terrenos agropecuarios abandonados (Ramírez y Zubieta, 2005).
4. Otros cambios: incremento o disminución de la superficie agropecuaria y aumento o descenso en el nivel de los cuerpos de agua.

Cuadro 13. TIPOS DE CAMBIO EN LAS CUBIERTAS DEL SUELO DE LA SNO: 1980,1995 y 2000

GRUPO	No.	CAMBIOS	1980-1995 ha	1995-2000 ha	1980-2000 ha
Pérdida	1	Pérdida de vegetación natural por aumento de la superficie agropecuaria	2453	412	2865
	2	Pérdida de vegetación secundaria por aumento de la superficie agropecuaria	4047	1487	5534
Perturbación	3	Perturbación de vegetación natural	12512	1592	14104
Recuperación	4	Recuperación de vegetación secundaria	792		792
	5	Recuperación por abandono de terrenos agropecuarios	491		491
Otros cambios	6	Expansión de superficie agrícola sobre pastizal inducido	1	398	399
	7	Expansión de pastizal inducido sobre terrenos agrícolas	1		1
	8	Extensión de cuerpos de agua sobre terrenos agrícolas	1		1

La pérdida de vegetación primaria y secundaria a causa de la expansión de la superficie agropecuaria alcanzó cerca de 8,400 ha, es decir, 2.3% del área total de la zona de estudio. Fueron eliminadas 2,865 ha de vegetación primaria y 5,534 ha de vegetación secundaria. El proceso de perturbación de la vegetación natural afectó 14,104 ha, es decir, a casi 4% de la superficie total (Cuadro 13). La perturbación es un evento que destruye parte de la biomasa vegetal, como resultado de la acción de los agentes naturales (viento, fuego, procesos de remoción en masa y la actividad de algunos animales), sin embargo el principal agente de perturbación es la actividad del hombre. Las áreas perturbadas son terrenos de aptitud forestal donde la vegetación ha sido destruida por desmontes, incendios o pastoreo excesivo y se encuentra en recuperación conformando comunidades vegetales secundarias (SEMARNAP, 1998).

El proceso de recuperación de la superficie forestal abarcó un área mucho menor al 0.5% (1,283 ha), con 792 ha recuperadas de vegetación secundaria y 491 ha recuperadas por el abandono de terrenos agropecuarios. Los suelos delgados con aptitud forestal que son utilizados para la agricultura son productivos únicamente durante dos o tres años ya que pierden fertilidad y se erosionan rápidamente. Cuando los terrenos agrícolas son abandonados, una cubierta de arbustos y árboles se restablece, excepto en el suelo que fue seriamente erosionado. Dentro del grupo denominado otros cambios, la transformación más importante fue la expansión de 399 ha de superficie agrícola sobre el pastizal inducido.

Cuadro 14. MATRIZ DE CAMBIO EN LAS CUBIERTAS DEL SUELO: 1980-2000 (hectáreas)

1980 \ 2000	P	PQ	Q	QP	M	Bc	Ptr	PQtr	Qtr	QPtr	Mtr	Bctr	I	A	H	C
P	23918						2732							146		
PQ		46910					4600						9	211		
Q			26483					5149					45	1034		
QP				5107					1565					390		
M			(E)		34107		(B)				38		(A)	898		
Bc						19423						20		132		
Ptr							5645						44	21		
PQtr		721						14666						2271		
Qtr			4						23204					1207		
QPtr	(C)			1			(E)			6209			(A)	945		
Mtr					66						12723			1036		
Bctr						0						4875	11			
I								87		(C)			3547	399	(D)	(D)
A							2	29	128	7	227	11	1	113668		1
H													(D)		3558	
C																40

En el cuadro, (A) corresponde a pérdida, (B) a perturbación, (C) a recuperación, (D) otros cambios y (E) sin cambios. Para la simbología ver Cuadro 9. Descripción de la leyenda.

3.3.4.3. PROCESOS DE CAMBIO EN LOS MUNICIPIOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el período 1980-2000, seis municipios presentaron recuperación de sus bosques por abandono de terrenos agropecuarios: Santa Ana Yareni (con 116 hectáreas recuperadas), Tanetze de Zaragoza (113 ha), Teococuilco de Marcos Pérez (9 ha), Santiago Lalopa (5%), Santiago Camotlán y Santa María Temascalapa (ambos con cerca de 1 ha). Tres municipios tuvieron recuperación de sus bosques a partir de la vegetación secundaria: San Pablo Yaganiza (355 ha recuperadas), Tanetze de Zaragoza (33 ha) y Santiago Lalopa (5 ha). 25 municipios presentaron perturbación de sus bosques primarios, de los cuales, 5 municipios tuvieron más de mil hectáreas afectadas: Santa Catarina Ixtepeji (3,427 ha), Villa Díaz Ordaz (1,839 ha), Tlaxiactac de Cabrera (1,477 ha), Santa Catarina Lachatao (1,337 ha) e Ixtlán de Juárez (1,100 ha). De los 72 municipios analizados, 55 registraron pérdida de vegetación. Cuatro municipios tuvieron una pérdida mayor a 500 ha: Santa Catarina Ixtepeji (1,367 ha), Santa María Tlahuitoltepec (1,294 ha), San Pedro y San Pablo Ayutla (814 ha) y Totontepec Villa de Morelos (719 ha). Doce municipios registraron entre 100 y 500 ha de superficie forestal eliminada (San Ildefonso Villa Alta, Teotitlán del Valle, Mixistlán de la Reforma, San Cristóbal Lachirioag, Nuevo Zoquiapam, San Juan Juquila Vijanos, San Juan Yatzona, Santo Domingo Roayaga, Santo Domingo Xagacia, San Andrés Yaa, Ixtlán de Juárez y San Pablo Yaganiza) y 39 municipios tuvieron menos de 100 ha perdidas (Fig. 20).

El análisis a nivel municipal es importante porque una vez identificadas las zonas con mayor pérdida de vegetación será posible definir áreas prioritarias de conservación, reforestación o para la aplicación de un tipo de manejo forestal y será más fácil gestionar los proyectos. Las opciones de mitigación y captura de carbono pueden desarrollarse con éxito a nivel municipal, si son planteadas como estrategias que brinden beneficios sociales, económicos y ambientales.

Fig. 18. Procesos de cambio en las cubiertas del suelo de la Sierra Norte de Oaxaca de 1980 a 1995

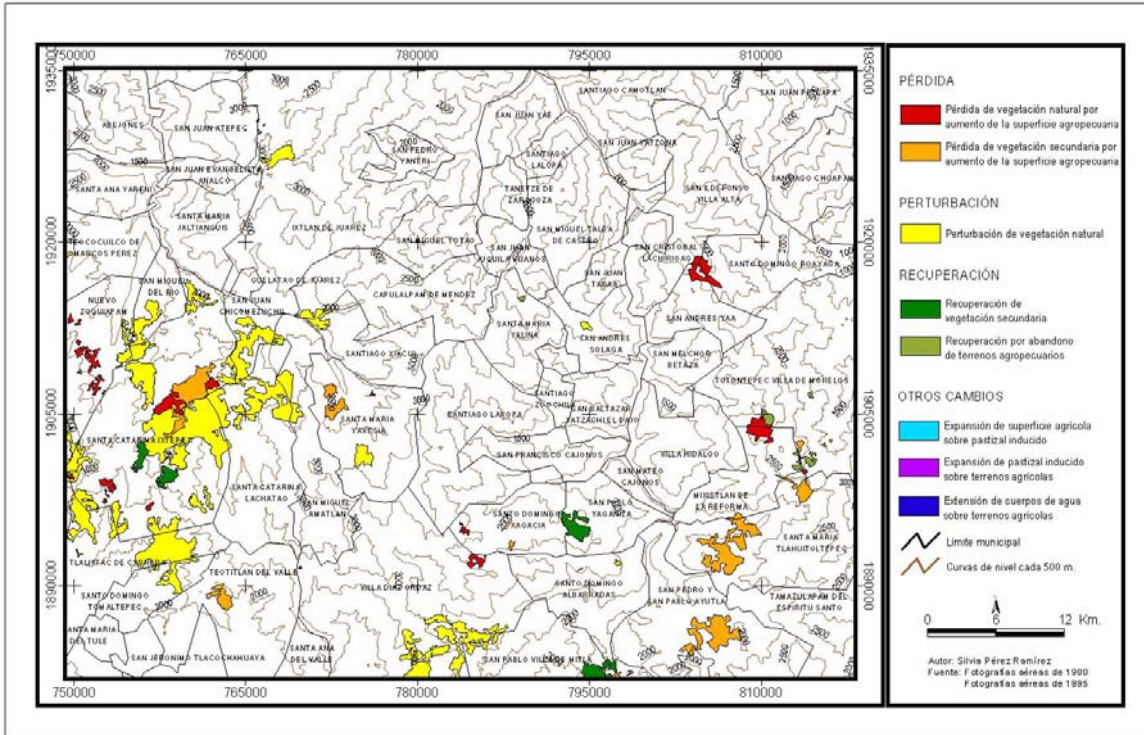


Fig. 19. Procesos de cambio en las cubiertas del suelo de la Sierra Norte de Oaxaca de 1995 a 2000

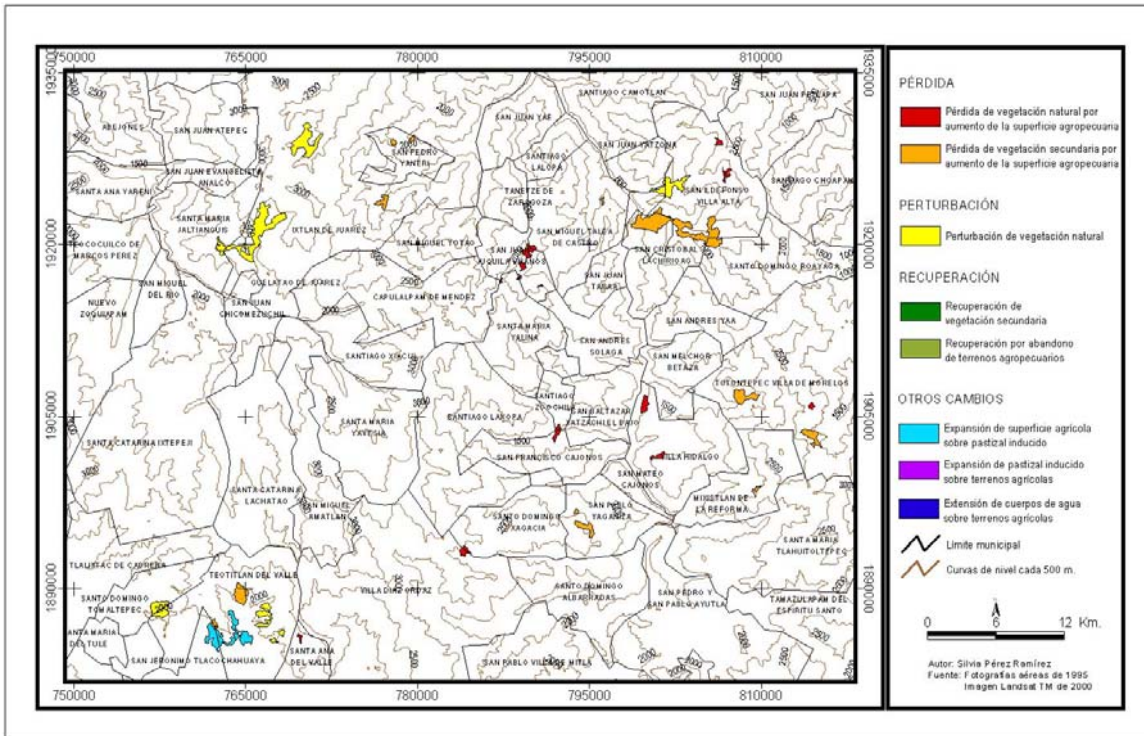
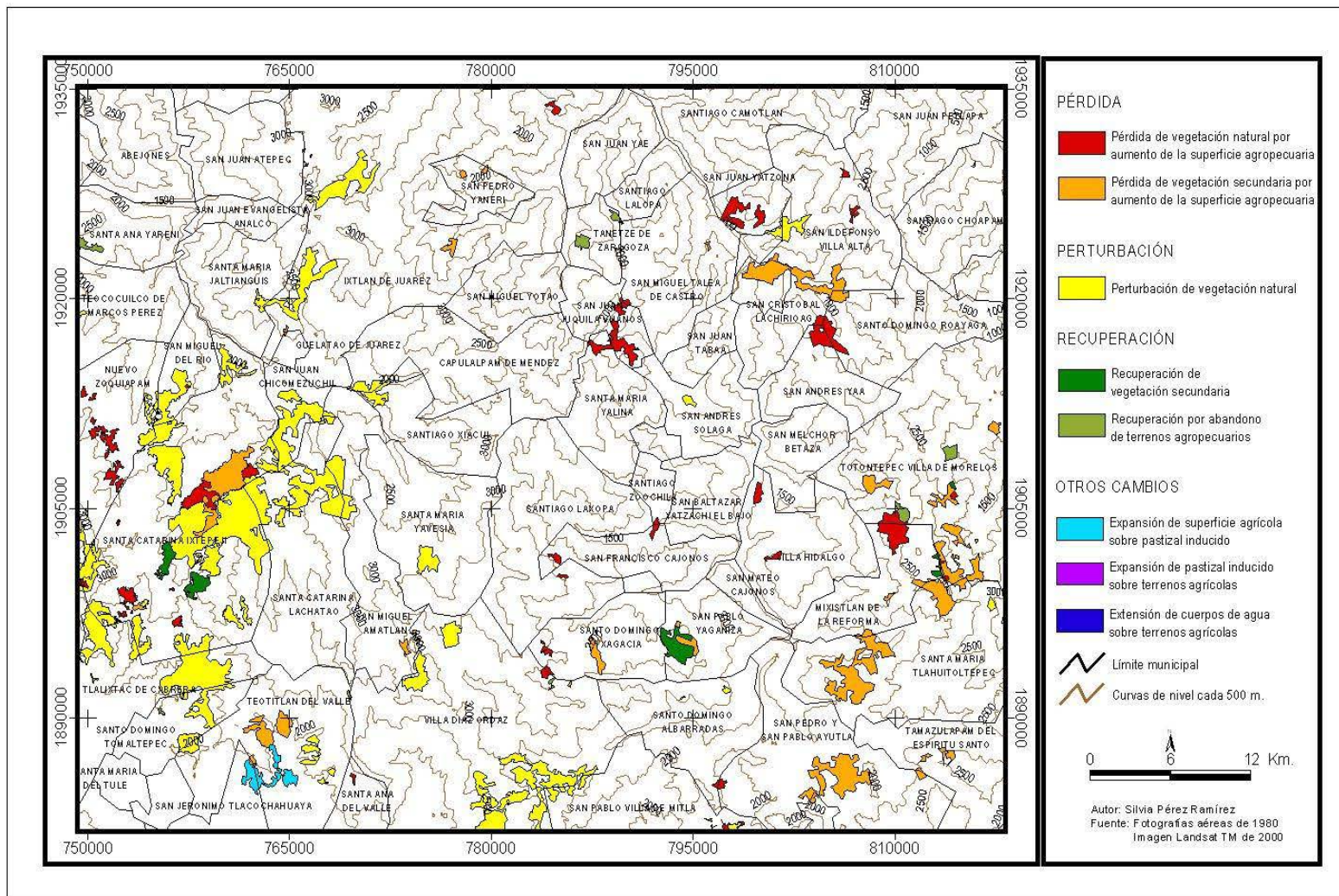


Fig. 20. Procesos de cambio en las cubiertas del suelo de la Sierra Norte de Oaxaca de 1980 a 2000



3.4. CONCLUSIÓN

En la zona de estudio, es evidente el reemplazo del bosque natural por bosque secundario, cultivos y pastizal inducido. Los ecosistemas que presentaron una pérdida total de su cubierta fueron los bosques de pino, encino y encino-pino. Los ecosistemas más afectados por las prácticas de usufructo y descanso de la tierra, fueron los bosques de pino-encino y mesófilo de montaña, en los que la superficie perdida fue en promedio 6% mayor a la superficie recuperada. En el periodo 1980-2000, los procesos de pérdida y perturbación de la vegetación correspondieron al 2.3% y 4% del total de la superficie forestal respectivamente, mientras que el proceso de recuperación únicamente representó el 0.5%. La tasa de deforestación anual en la zona resultó de 0.3%, éste valor es menor al registrado para el país (>0.5%). Sin embargo, si se mantiene esta tendencia, en 20 años menos del 59% de la superficie conservará su cubierta vegetal.

De los 72 municipios analizados, 76% registraron pérdida de su vegetación y el resto presentaron procesos de perturbación y recuperación derivados de la dinámica de cambio de usos del suelo. Los municipios con mayor pérdida y perturbación de la cubierta vegetal fueron: Ixtepeji, Tlahuitoltepec, Ayutla, Totontepec, Díaz Ordaz, Tlalixtac, Lachatao e Ixtlán. De éstos sólo Ixtepeji e Ixtlán cuentan con planes de manejo forestal. Es necesaria la creación de proyectos de manejo sustentable en el 42% de los municipios de la zona de estudio que tienen una superficie mayor a 2000 ha de bosque, y que actualmente presentan importantes procesos de deforestación y fragmentación.

Los mapas de cubiertas del suelo que fueron generados para los años 1980, 1995 y 2000; y el análisis de cambio en las cubiertas realizado en éste capítulo, sirvieron de base para caracterizar la dinámica espacio-temporal de la fragmentación de los bosques templados en la Sierra Norte de Oaxaca.

CAPÍTULO IV. DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA FRAGMENTACIÓN EN LOS BOSQUES TEMPLADOS DE LA SIERRA NORTE DE OAXACA: 1980-2000

4.1. INTRODUCCIÓN

La fragmentación es definida como una serie de mecanismos que provocan la discontinuidad en la distribución espacial de los ecosistemas, modifican las condiciones microclimáticas presentes y afectan la ocupación, reproducción y supervivencia de algunas especies forestales (Franklin et al. 2002). Un bosque fragmentado se presenta cuando éste es afectado por actividades agropecuarias y solamente quedan manchones de la vegetación original. La superficie de perturbación en estos ecosistemas cubre alrededor del 40% (INEGI, 1999; SARH, 1994 en Ramírez, 2001).

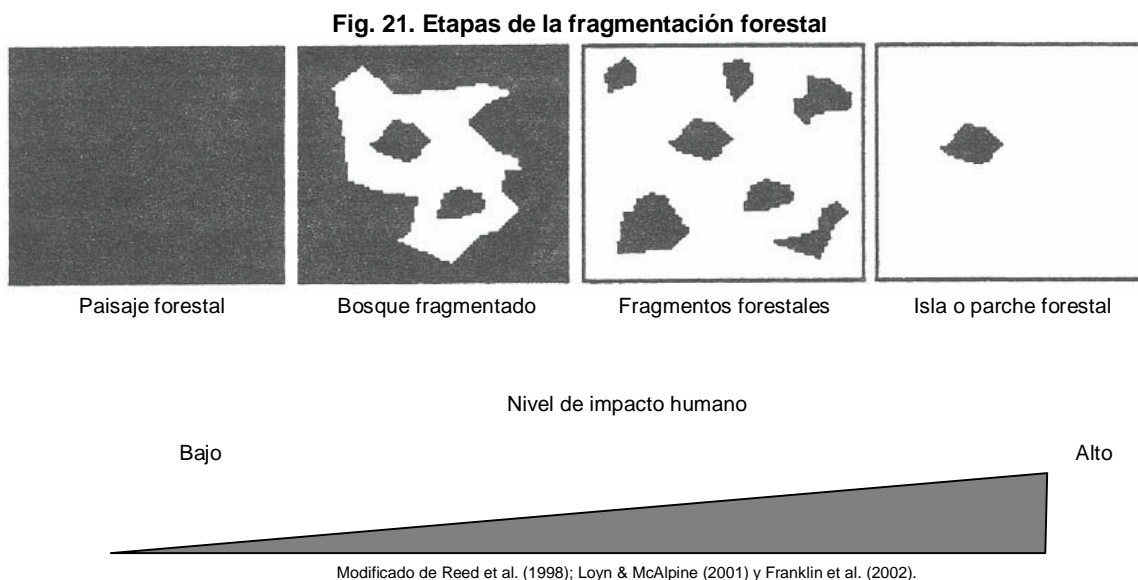
La mayoría de los paisajes fragmentados son producto del desarrollo de las actividades humanas. Los bosques están siendo fragmentados debido a la expansión agrícola, la creación de vías de comunicación, la expansión urbana y actividades asociadas a la extracción de recursos naturales (Robinson, 1992; Calow, 1998; INE-SEMARNAP, 2000; Mas y Correa, 2000; Köhler, 2003). La conversión de zonas forestales a cultivos o pastizales transforma las áreas afectadas en fuentes de carbono que se añade a la atmósfera (Terradas, 2001). En el proceso de fragmentación, grandes áreas de bosque presentan una gradual segmentación en unidades discontinuas más pequeñas, geométricamente más complejas y aisladas, como resultado de perturbaciones naturales y actividades humanas. Esto involucra cambios en la composición, estructura y funcionamiento de las reservas de C (Dramstad et al. 1996; Reed et al. 1998; Turner et al. 2001; Burel & Baudry, 2002).

La fragmentación se presenta como un mosaico de parches. Los parches son áreas homogéneas que difieren de la superficie que las rodea en contenido, apariencia, tamaño, forma, origen y tipo (Turner et al. 2001; Mendoza, 2004). Los parches se clasifican en tres tipos: parches naturales que son restos de un ecosistema precedente; parches inducidos que son creados por las actividades humanas y los parches generados por perturbaciones naturales. El análisis de parches en cuanto a su tamaño, número y localización, refleja los efectos de la fragmentación sobre las especies presentes en una reserva de C (Dramstad et al. 1996). El grado de fragmentación determina la capacidad de un parche para almacenar carbono, puesto que dependiendo del número y tipo de individuos en el parche, la cantidad de biomasa forestal y la cantidad de carbono capturado será distinta (Terradas, 2001).

Los parches tienen un borde que corresponde a una porción del ecosistema o tipo de cubierta cercana a su perímetro y dentro del cual las condiciones ambientales pueden diferir de las condiciones al interior del parche, también se usa como una medida de longitud o adyacencia entre dos tipos de cubierta en el paisaje (Turner et al. 2001). Existen bordes entre comunidades con características ecológicas similares pero en distinto estado de desarrollo, como los huecos producidos por la caída de una cantidad significativa de árboles o bordes entre un bosque adulto y un bosque joven. En los bosques perturbados por el hombre, los fragmentos están rodeados por parches estructuralmente distintos como pastizales o cultivos (Liu & Ashton, 1998; Turner et al. 2001).

4.1.1. DINÁMICA DE LA FRAGMENTACIÓN

La fragmentación es un estado de la dinámica del patrón del paisaje, el cual es resultado de ciclos de perturbación y recuperación de la vegetación. La fragmentación tiene cuatro etapas: inicialmente una superficie cubierta por bosque natural que presenta procesos de perturbación se transforma en un bosque fragmentado, cuando tales procesos aumentan progresivamente, la superficie de bosque se convierte en cierto número de parches forestales, para que finalmente resulte una isla o parche residual de bosque (Reed et al. 1998; Loyn & McAlpine, 2001; Franklin et al. 2002). Este fenómeno crea un mosaico de cubiertas forestales y no forestales (Fig. 21), se reduce el área interior, incrementa la extensión de los bosques abiertos y disminuye la acumulación de C en la vegetación y los suelos.



4.1.2. INDICADORES ESPACIALES DE LA FRAGMENTACIÓN

Las medidas del paisaje son estadísticas que describen la localización y los atributos de los elementos del paisaje. Existe un gran número de medidas para caracterizar patrones espaciales y evaluar la fragmentación de un bosque y pueden ser agrupadas de la forma siguiente (Loyn & McAlpine, 2001):

1. Medidas de superficie. Miden el tamaño de los parches y su área interior.
2. Medidas lineares. Miden la longitud, amplitud y forma del borde y la conectividad entre parches.
3. Medidas topológicas. Miden las relaciones espaciales entre los elementos del paisaje en términos de dispersión, asociación, extensión, aislamiento y conectividad.

Los indicadores que permiten analizar si el patrón de un paisaje se mantiene o se modifica son los indicadores de área, estructura del parche, rasgos del borde y conectividad (Mendoza, 2004). El área del parche proporciona información básica para el análisis de la fragmentación de las reservas forestales. Entre mayor sea el tamaño del parche, mayor es la acumulación de C. El número de especies arbóreas por unidad de área declina con la disminución del tamaño del parche y por lo tanto se reduce la cantidad de biomasa. La estructura del parche brinda información sobre el número, tamaño, dominancia e índice de forma de los elementos del paisaje. El índice de forma es el resultado de la relación área-perímetro y mide la configuración del parche, las áreas naturales tienden a presentar formas más complicadas que las superficies alteradas por el hombre (MacGarigal & Marks, 1995; Mas, 1998; Loyn & McAlpine, 2001).

4.1.3. EFECTOS DE LA FRAGMENTACIÓN

La fragmentación reduce la cubierta vegetal, elimina biomasa e induce a la pérdida de carbono en los suelos y la vegetación. La reducción de la cubierta vegetal ocasiona cambios regionales de los regímenes de temperatura y precipitación y provoca la emisión de bióxido de carbono favoreciendo con ello el calentamiento global (Dale, 1997; Laurance et al. 1998; Greenpeace, 2001; Loyn & McAlpine, 2001; Laurance, 2004). La biomasa de un bosque fragmentado es menor significativamente comparada con un área similar no fragmentada. Un estudio reportó que la fragmentación derivada de las actividades humanas, tiene efectos negativos en la acumulación de biomasa en los bosques al calcular una pérdida de 5 toneladas de biomasa por hectárea al año, es decir 2.5 tC/ha/año, en parches menores a 100 ha (Holsinger, 2003).

La fragmentación provoca la pérdida de hábitats para las especies forestales limitando su capacidad de captura y almacenamiento de C (Lawrence et al. 1998). También altera los procesos biogeoquímicos en el ecosistema, incrementa la erosión del suelo y disminuye la calidad del agua. Por lo tanto, la fragmentación representa un serio problema a escala mundial en los aspectos ambiental, ecológico y socioeconómico (Reed et al. 1998; Greenpeace, 2001; Spellerberg, 2002; Laurance, 2004).

La fragmentación afecta la composición de las reservas forestales de C, su configuración (tamaño, forma y distribución de los parches) y su funcionamiento (Loyn & McAlpine, 2001; Turner et al. 2001; Peterken, 2002). Con respecto al efecto del cambio en la composición de las especies, un ejemplo es la conversión de un bosque mixto a un bosque de encino que reduciría las reservas de carbono en 24 tC por hectárea, ya que el bosque mixto contiene en promedio mayor cantidad de C (202 tC/ha) que el de encino (178 tC/ha) (Ver Cuadro 18 en cap. V). Los cambios en la estructura del ecosistema también disminuye la cantidad de C, dependiendo del área que se pierda.

Otro impacto de la fragmentación es el efecto borde. La magnitud de los efectos de borde es inversamente proporcional a la calidad de los parches adyacentes. El efecto de borde se acentúa en los bosques secundarios. Hay tres tipos de efectos de borde (Greenpeace, 2001; Carabelli et al. 2002; Spellerberg, 2002; WWF-Perú, 2003; López, 2004):

1. Efecto abiótico que involucra cambios en las condiciones medioambientales por causa de la proximidad a un parche distinto. Las características microclimáticas (intensidad y duración de la luz, humedad, temperatura y velocidad del viento) producen un gradiente ambiental desde el borde hacia el interior del fragmento. El microclima del borde es hostil a la regeneración del bosque. También se modifican las propiedades del suelo: niveles de carbono, pH, nitrógeno, fósforo, temperatura y humedad. En un bosque perturbado, la cantidad de C en los suelos puede reducirse de 134 tC/ha hasta 59 tC/ha y la cantidad de carbono en la vegetación puede disminuir de 168 tC/ha hasta 10 tC/ha (Houghton et al. 1991). El efecto de borde puede penetrar hasta 250 metros hacia el interior del fragmento.
2. Efectos biológicos directos, los cuales involucran cambios en la abundancia y distribución de las especies por el cambio en las condiciones físicas cercanas al borde y determinados por la tolerancia fisiológica de las especies. Un claro ejemplo es la mortalidad de los árboles cercanos al borde y la consecuente pérdida de carbono. La mortalidad y caída de árboles ocurren entre los 30 y 300 m a partir del borde. Las plantas que requieren mayor luz y menor humedad invaden los bordes. El cambio en la composición de la comunidad tiene efectos negativos en el funcionamiento de las reservas de C.
3. Efectos biológicos indirectos que involucran cambios en la interacción de las especies (polinización, dispersión de semillas, competencia).

El tamaño, forma y posición de la reserva en la matriz tienen influencia sobre el grado de fragmentación. La cantidad de área interior está en función tanto del área total como de la forma del ecosistema. A medida que el tamaño de la reserva disminuye, un porcentaje mayor del área se vuelve un área de borde más susceptible a la perturbación (Laurance et al. 1998; Peterken, 2002; Spellerberg, 2002). Por otro lado, la fragmentación favorece la aparición de incendios durante épocas de sequía, lo que resulta en la liberación de las reservas de carbono contenidas en los árboles. Un bosque primario fragmentado puede regenerarse con vegetación secundaria, sin embargo el área disponible para el almacenamiento de carbono disminuye y se empobrece (Laurance et al. 1998; Greenpeace, 2001; Laurance, 2004). La fragmentación de los bosques provoca la pérdida de sus funciones ecológicas y de los servicios ambientales que proporciona. Estos cambios son probablemente irreversibles como resultado de las perturbaciones recurrentes, tanto naturales como derivadas de la actividad humana, aún cuando no se descarta la posibilidad que en el largo plazo se recupere el ecosistema (Laurance et al. 1998; Peterken, 2002; WWF-Perú, 2003; Laurance, 2004).

4.1.4. PATRONES ESPACIALES

Los ecosistemas forestales presentan una gran heterogeneidad espacial y temporal definida por la variabilidad de las condiciones ambientales y por un régimen de perturbación. Los patrones espaciales pueden ser homogéneos o heterogéneos, dependiendo de la escala de observación. Tales patrones muestran el contraste de un paisaje como consecuencia de su complejidad ecológica y del uso del suelo al que está sujeto (Reed et al. 1998; Loyn & McAlpine, 2001). El patrón espacial es la capa física de todos los parches que componen el paisaje. La estructura del paisaje regula los flujos e interacciones de energía, materiales y especies entre los distintos parches. Por lo tanto, los cambios en la composición y la estructura de un paisaje tienen implicaciones en su funcionamiento. La fragmentación produce un paisaje disfuncional y provoca la pérdida de especies, de agua, de nutrientes y de elementos como el carbono, contenidos en el suelo y en la vegetación (Loyn & McAlpine, 2001; Spellerberg, 2002). Los patrones de fragmentación permiten conocer qué implicaciones tiene este proceso en la capacidad de los bosques para el almacenamiento de carbono. Los biomas forestales pueden tener distintos patrones espacio-temporales creados por la fragmentación natural o inducida por el hombre. La fragmentación está determinada por el grado de alteración de un ecosistema e implica la ruptura de la continuidad del paisaje en pequeños parches. Estos parches tienen distintos atributos: tipo, tamaño, forma y características del borde (Reed et al. 1998; Loyn & McAlpine, 2001). La tala, la expansión de terrenos agrícolas y los incendios son las principales causas de perturbación de la estructura del paisaje y pueden causar distintos grados de fragmentación. Los patrones espaciales son producto de tales perturbaciones.

4.2. MÉTODO

4.2.1. SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE INDICADORES

La fragmentación del paisaje se puede analizar a diferentes niveles (MacGarigal & Marks, 1995; Mas, 1998):

- a) Nivel de parche
- b) Nivel de clase
- c) Totalidad del paisaje

Este trabajo analiza las superficies cubiertas por bosque en la Sierra Norte de Oaxaca a nivel de clase y a nivel de paisaje. Los índices de clase definen la cantidad y distribución de cada tipo de parches dentro de un paisaje, mientras que, los índices de paisaje representan el patrón espacial de todos los tipos de parche en el mosaico. La mayor parte de los índices de clase pueden ser interpretados como índices de fragmentación porque miden la configuración de un tipo particular de parches. Los índices de paisaje pueden interpretarse como índices de heterogeneidad del paisaje porque miden la totalidad del mismo (MacGarigal & Marks, 1995; Mendoza, 2004).

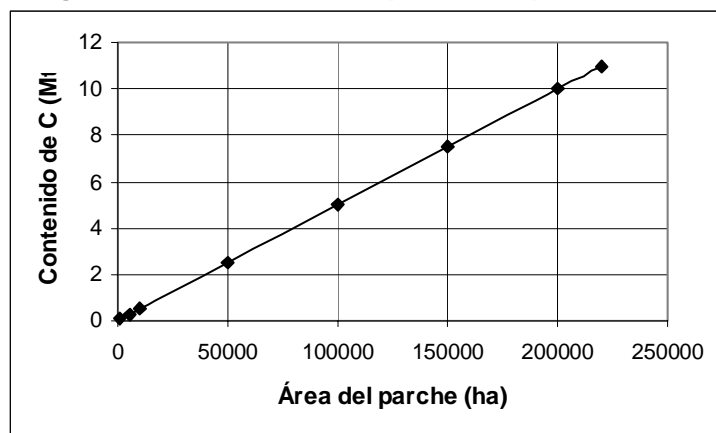
El presente estudio se enfoca en la fragmentación de las reservas de C de la Sierra Norte de Oaxaca, por lo tanto, las categorías de cubiertas del suelo de los mapas analizados en el capítulo anterior, se simplificaron a través del proceso *Dissolve* en el programa *Patch Analyst*, para obtener en primer lugar, las superficies cubiertas por bosque y las superficies con otras cubiertas, que reagrupa, las clases de cultivos, pastizal, agua, poblaciones y selva baja caducifolia. Este tipo de vegetación se distribuye en comunidades aisladas alrededor de los ríos Grande y Cajonos. La selva baja caducifolia se agrupó dentro de la clase denominada otras cubiertas debido a que únicamente se requiere el análisis de las cubiertas de bosque templado. En segundo lugar se reclasificaron las categorías para obtener tres clases: bosque primario, bosque secundario y otras cubiertas y finalmente se analizaron las diez clases de bosque en la región (5 clases de bosque primario y 5 clases de bosque secundario).

Existen varios indicadores para determinar el grado de fragmentación de un ecosistema pero la caracterización de la dinámica espacio-temporal de la fragmentación forestal en la SNO se realizó a través de trece parámetros calculados por el programa *Patch Analyst* con base en los mapas de cubiertas del suelo elaborados para las fechas 1980, 1995 y 2000. Los índices calculados son agrupados de la manera siguiente (MacGarigal & Marks, 1995):

1. INDICADORES DE ÁREA
 - Superficie de clase (SC)
 - Área total del paisaje (ATP)
2. INDICADORES DE TAMAÑO DEL PARCHE
 - Número de parches (NP)
 - Tamaño del parche más grande (TPG)
 - Tamaño promedio de los parches (TPP)
3. INDICADORES DE FORMA
 - Índice de forma (IF)
 - Proporción perímetro-área (P/A)
 - Dimensión fractal promedio (DF)
4. INDICADORES DE BORDE
 - Promedio de borde por parche (PBP)
 - Superficie total del área de borde (STB)
 - Proporción del área de borde (PAB)
5. INDICADORES DE ÁREA CENTRAL
 - Superficie total (STC)
 - Proporción de las áreas centrales (PAC)

INDICADORES DE ÁREA Y TAMAÑO. Los parches forestales grandes aseguran el funcionamiento de las reservas de carbono y poseen más espacio para que habite un mayor número de especies. Existe una relación directamente proporcional entre el tamaño del parche y su contenido de carbono: un parche que mide una hectárea contiene en promedio 220 tC, un parche que mide 100 ha contiene 22,000 tC y un parche que mide 500 ha contiene alrededor de 110,000 tC. (Fig. 22).

Fig. 22. Contenido de carbono por área del parche forestal

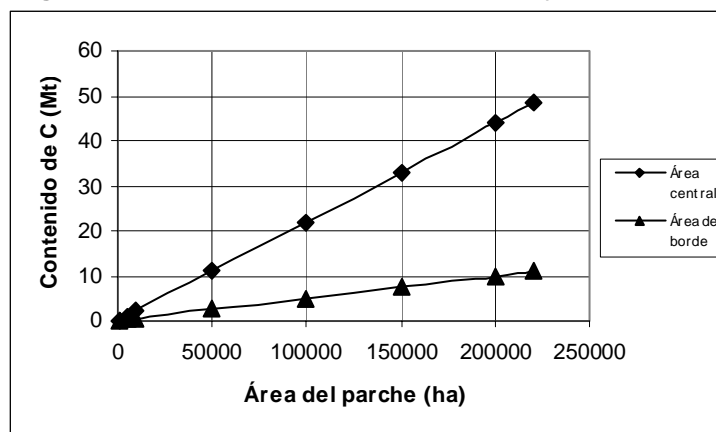


Línea de tendencia de almacenamiento de C en parches. Elaboración propia con datos de C tomados de Goodale et al. 2002 y Broadmeadow y Matthews, 2003.

INDICADORES DE FORMA Y DE BORDE. Los bordes pueden tener consecuencias negativas para el secuestro y almacenamiento de C al modificar la estructura espacial de las reservas y al reducir el área interior de un parche. El efecto de borde provoca la perturbación del bosque. El contenido de carbono en un bosque perturbado se estima entre 50 tC/ha (Salisbury & Ross, 1992; Hopkins, 1999) y 69 tC/ha (Houghton et al. 1991) y almacena 4 veces menos carbono que un bosque sin efectos de borde (Fig. 23). Es relativamente rara la presencia de bordes en un ecosistema no perturbado, por lo tanto la proporción p/a tiene un valor bajo. Desde una perspectiva ecológica, un solo hábitat-parche de gran extensión es mejor que un grupo de pequeños parches aún cuando tengan la misma superficie, ya que el último caso, es menos deseable debido a su alta proporción p/a. De acuerdo a la proporción p/a un parche circular es mejor que un parche alargado y un borde irregular tendrá mayores efectos que un borde recto (MacGarigal & Marks, 1995; Spellerberg, 2002). El índice de forma se obtiene de la relación área-perímetro y mide la complejidad del parche. Los bosques tienen formas más irregulares que las áreas perturbadas por el hombre. Un valor alto en el índice de forma indica la presencia de parches forestales que contienen importantes reservas de carbono mientras que un valor bajo (cercano a 1) en este índice indica la presencia de parches de bosque perturbado o de parches creados por las actividades humanas.

INDICADORES DE ÁREA CENTRAL. El área central de un parche es la superficie ubicada a cierta distancia del borde del parche, en este parámetro se utilizó una distancia de 250 metros para determinar el área interior. Esta distancia se definió con base en los resultados de investigaciones realizadas sobre fragmentación, donde se indica que, las propiedades del área central se mantienen intactas a distancias mayores a 250 m desde el límite de las áreas intervenidas (Greenpeace, 2001; Turner et al. 2001; Carabelli et al. 2002; Peterken, 2002; Spellerberg, 2002). El área central total es la superficie derivada del resultado de la adición de las áreas núcleo individuales dentro de la clase de paisaje correspondiente (WWF-Perú, 2003). El área central de una reserva contiene mayor cantidad de carbono que la superficie del borde ya que almacena 220 tC/ha (Fig. 23) (Goodale et al. 2002).

Fig. 23. Contenido de carbono en área central y área de borde



Elaboración propia considerando que el área central contiene 220 tC/ha y el área de borde contiene 50 tC/ha. Datos de C tomados de Salisbury & Ross, 1992; Hopkins, 1999 y Goodale et al. 2002.

4.2.2. ESTIMACIÓN DE INDICADORES

Para estimar el papel de los bosques templados de la Sierra Norte de Oaxaca en el almacenamiento de carbono, es preciso determinar la intensidad de la fragmentación, ya que este proceso afecta la cantidad de biomasa y la densidad de carbono en los ecosistemas.

El **número de parches** es una medida simple del nivel de subdivisión por clase y se calcula con la fórmula siguiente:

$$(2) \text{NP}_{iht} = n$$

Donde: NP_{iht} = número de parches j que constituyen un ecosistema i , en un área de interés h en un período de tiempo t ; n = es el número de fragmentos j en el que se encuentra dividido el ecosistema i , en un área h en un tiempo t (Cuadro 15). El indicador es igual a uno cuando el ecosistema no está fragmentado y el valor aumenta con la fragmentación (MacGarigal & Marks, 1995).

Cuadro 15. VARIABLES DE LOS INDICADORES DE FRAGMENTACIÓN

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	TIPO
h	Área de interés	Sierra Norte de Oaxaca
t	Período de tiempo	1980
		2000
i	Ecosistema	Bosque
j	Tipo de parche o fragmento	Forestal
		No forestal
		Bosque primario
		Bosque secundario
		Otras cubiertas
		P
		PQ
		Q
		QP
		M
Ptr		
PQtr		
Qtr		
QPtr		
Mtr		

El **tamaño promedio de los parches**. Es el área ponderada entre los diferentes parches de la misma clase. Describe el nivel de fragmentación en términos de su impacto global sobre la pérdida de estructura de la clase seleccionada (WWF-Perú, 2003). La fórmula para su obtención es:

$$(3) \text{ TPP}_{ih} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

Donde: TPP_{iht} = superficie promedio (ha) de los fragmentos j de un ecosistema i de un área de interés h en el período de tiempo t; a_j = superficie del fragmento j del ecosistema i, en el área h en un tiempo t; n = es el número de fragmentos j en el que se divide el ecosistema i, en el área h en un tiempo t. El indicador se aproxima a cero cuando el tamaño de los fragmentos es pequeño y aumenta conforme el tamaño es mayor (MacGarigal & Marks, 1995).

El **índice de forma** tiene valores cercanos a uno para formas simples y los valores aumentan con la complejidad del parche y se estima con:

$$(4) \text{ IF} = \frac{p}{2\sqrt{\pi \cdot S}}$$

Donde: IF= índice de forma; p= perímetro; S= superficie

La **dimensión fractal** también mide la forma de los parches y los valores varían entre 1 y 2. Los valores cercanos a uno indican figuras geométricas como círculo o cuadrado y los valores cercanos a 2 indican formas irregulares (MacGarigal & Marks, 1995; Mas y Correa, 2000).

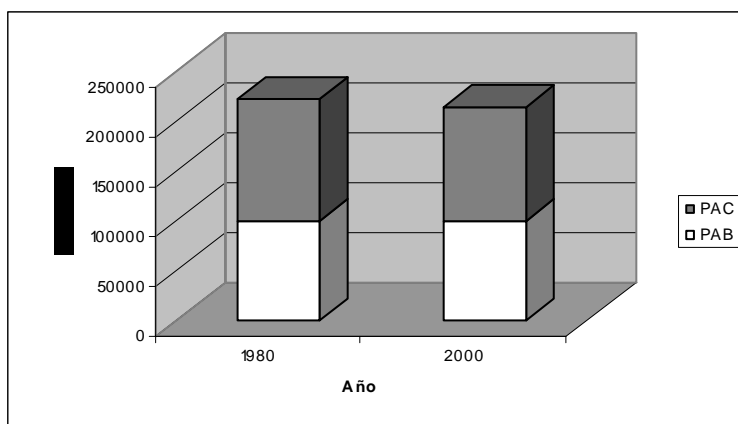
$$(5) \text{ DF} = \frac{2 \ln(p)}{\ln(S)}$$

Donde: DF= dimensión fractal; p= perímetro; S= superficie

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la dinámica de fragmentación en los bosques del sur de la Sierra Norte de Oaxaca entre 1980 y 2000, muestra que más del 45% de las reservas de carbono tenían especies vulnerables a los efectos de borde (Fig. 24), lo anterior implica la perturbación de una superficie mayor a 100,500 ha de bosque.

Fig. 24. Proporción del área de borde (PAB) y del área central (PAC) en la superficie forestal en 1980 y 2000



En el período 1980-2000, la superficie del bosque disminuyó 3.5% de su área original. Se crearon 17 nuevos parches forestales y el tamaño promedio de los parches se redujo 14%. La proporción ocupada por el parche forestal más grande en 1980 fue de 8.3% y para el año 2000 descendió a 7.9%. La reducción en el tamaño de los fragmentos definió un mayor efecto de borde. El promedio de borde por parche aumentó 12% y la proporción perímetro-área de los parches casi se duplicó, pues pasó de 50 m/ha a 95 m/ha. El 2% (7,862 ha) de la superficie ocupada por áreas centrales fue eliminada (Cuadro 16). La dimensión fractal permaneció constante aunque el índice de forma reveló que la configuración irregular de los fragmentos cambió a estructuras más simples debido a la tala y a la creación de terrenos agropecuarios.

En el período 1980-2000, la superficie de los parches forestales varió entre 3 y 30,000 ha. En 1980 se conservaba un gran polígono de bosque de 30,592 ha que garantizaba el funcionamiento de las reservas de C. Esta condición se modificó en 20 años con la creación de zonas agropecuarias pues para el año 2000 el parche forestal continuo más grande tenía 29,333 ha (Fig. 25). Los parches más grandes contienen mayor cantidad de biomasa y por lo tanto almacenan más carbono por unidad de superficie.

En 1980, de 144 parches forestales, sólo cinco (3%) tenían una superficie mayor a 10,000 ha, 18 parches (13%) tenían entre 2,500 y 5,000 ha, 16 parches (11%) tenían entre 1,000 y 2,500 ha, 21 parches (15%) tenían entre 500 y 1,000 ha y 84 parches (58%) tenían menos de 500 ha. En el año 2000, de 161 parches forestales, sólo cuatro (2%) tenían una superficie mayor a 10,000 ha, 16 parches (10%) tenían entre 2,500 y 10,000 ha, 20 parches (12%) tenían entre 1,000 y 2,400 ha, 23 parches (14%) tenían entre 500 y 1,000 ha y 98 parches (61%) tenían menos de 500 ha.

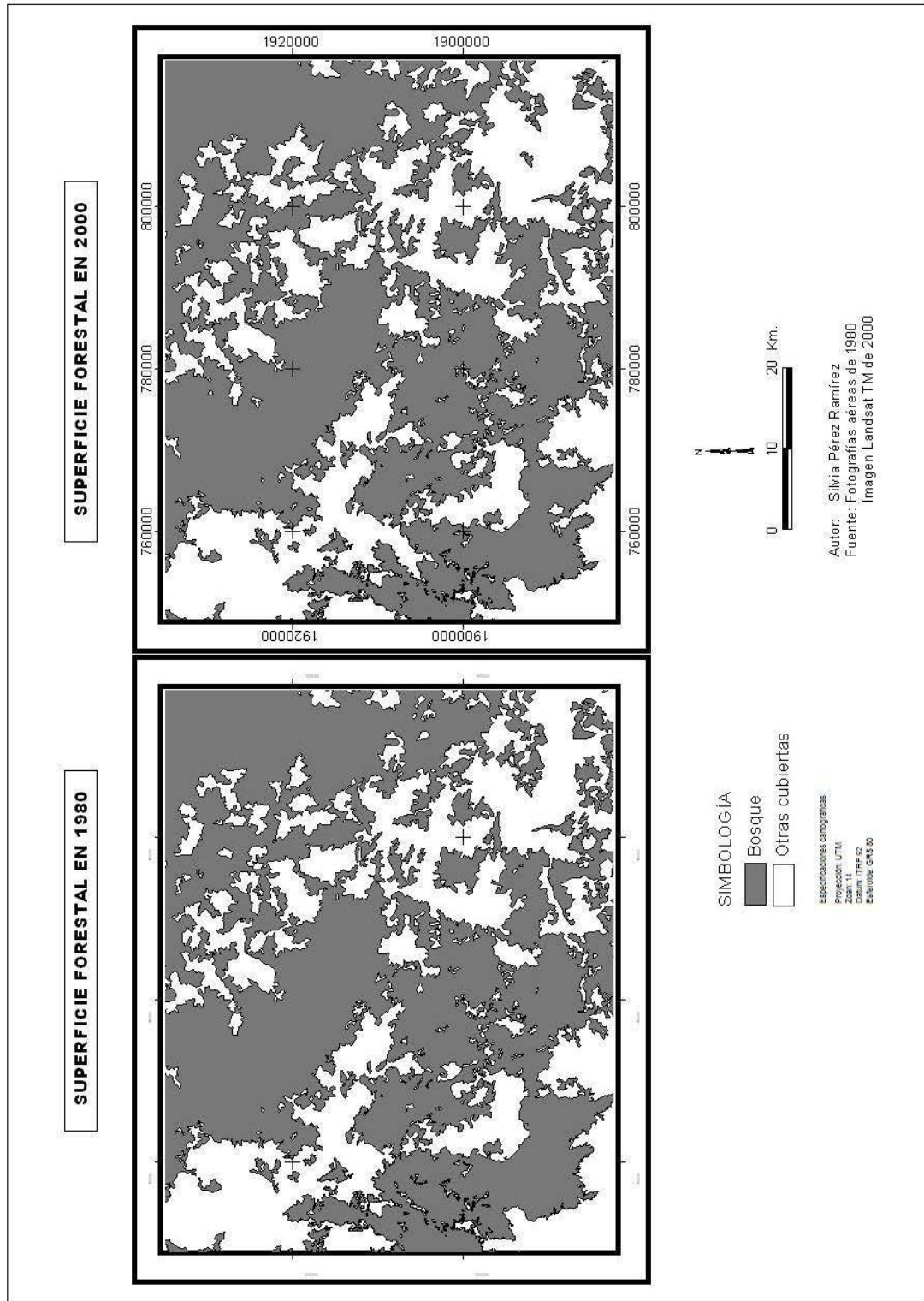
La presencia de un gran número de parches menores a 500 ha es un factor negativo para la obtención de créditos por captura de carbono pues sólo se otorga a parches de bosque con una extensión mayor a 500 ha (IPCC, 2000; Canell, 2004; Stavins & Richards, 2005).

La reducción del área de los fragmentos del bosque representa un riesgo para las especies en peligro de extinción registradas en la zona como: *Abies guatemalensis*, *Abies hickelii*, *Pinus leiophylla*, *Pseudotsuga menziesii*, *Quercus MacDougalli*, *Taxus globosa*, *Carpinus caroliniana*, *Cupressus lusitanica*, *Cyathea fulva*, *Nolina longifolia* (SEMARNAT, 2000). Las especies de *Abies* y *Pinus* son las más importantes para el almacenamiento de C.

Cuadro 16. INDICADORES DE LA FRAGMENTACIÓN FORESTAL EN LA SIERRA NORTE DE OAXACA: 1980 y 2000

INDICADORES	1980	2000
DE ÁREA		
Superficie forestal - SC (ha)	222103	214345
Área total del paisaje - ATP (ha)	368268	368268
DE TAMAÑO DEL PARCHE		
Número de parches - NP	144	161
Tamaño del parche más grande - TPG (ha)	30592	29333
Tamaño promedio de los parches - TPP (ha)	1544	1331
DE FORMA		
Índice de forma - IF	2.6	2.5
Proporción perímetro-área - P/A (m/ha)	50	95
Dimensión fractal promedio - DF	1.3	1.3
DE BORDE		
Promedio de borde por parche - PBP (m/parche)	31038	34834
Superficie total del área de borde - STB (ha)	100587	100691
Proporción del área de borde - PAB (%)	45	47
DE ÁREA CENTRAL		
Superficie total - STC (ha)	121516	113654
Proporción de las áreas centrales - PAC (%)	55	53

Fig. 25. Fragmentación de los bosques templados en la Sierra Norte de Oaxaca: 1980 - 2000

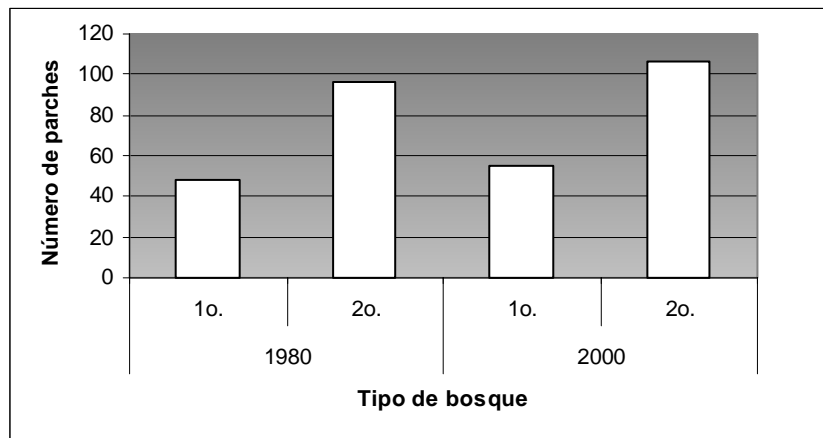


4.3.1. FRAGMENTACIÓN EN BOSQUES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

INDICADORES DE ÁREA Y TAMAÑO DE LOS PARCHES

Con respecto a los indicadores de área y del tamaño de los fragmentos, el patrón consistente es la reducción de la superficie de los parches, lo que se traduce en la pérdida del carbono almacenado en las reservas y su consecuente emisión a la atmósfera. En 20 años los bosques primarios perdieron 10% de su superficie mientras los bosques secundarios aumentaron su extensión casi 12%. El área promedio de los parches de bosque primario pasó de 9,584 ha en 1980 a 7,633 ha en el año 2000 y el área promedio de los parches de bosque secundario se incrementó en 25 hectáreas (Cuadro 16). El número de fragmentos de bosque primario y secundario se elevó durante el período de estudio en 7 y 10 parches respectivamente (Fig. 26).

Fig. 26. Incremento en el número de parches forestales primarios y secundarios: 1980-2000



INDICADORES DE FORMA

La complejidad de los parches de bosque primario se refleja con el resultado del índice de forma que fue superior a 3.5 en 1980 y en el años 2000 se redujo a 3.3 a causa de la desaparición de fragmentos provocada por las actividades humanas. El índice de forma de los parches de bosque secundario no se modificó y la dimensión fractal se mantuvo con un valor de 1.3 (Cuadro 17). Por otro lado, la proporción perímetro-área en los parches de bosque primario se elevó casi 10 m/ha por parche a causa de la perturbación y la división de los fragmentos. Esto tiene graves implicaciones porque se modifican las condiciones microclimáticas de la zona y las especies vegetales son más vulnerables a la depredación y a los cambios en los patrones de precipitación y temperatura.

Cuadro 17. INDICADORES DE LA FRAGMENTACIÓN EN BOSQUES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS: 1980 y 2000

INDICADORES	1980		2000	
	1o.	2o.	1o.	2o.
DE ÁREA				
Superficie forestal - SC (ha)	153340	68763	137390	76955
DE TAMAÑO DEL PARCHE				
Número de parches - NP	48	96	55	106
Tamaño del parche más grande - TPG (ha)	30592	5029	29333	4455
Tamaño promedio de los parches - TPP (ha)	9584	849	7633	874
DE FORMA				
Índice de forma - IF	3.5	2.4	3.3	2.4
Proporción perímetro-área - P/A (m/ha)	48	61	57	56
Dimensión fractal promedio - DF	1.3	1.3	1.3	1.3
DE BORDE				
Promedio de borde por parche - PBP (m/parche)	122782	24501	147752	24794
Superficie total del área de borde - STB (ha)	50050	38398	47336	42811
Proporción del área de borde - PAB (%)	33	56	34	56
DE ÁREA CENTRAL				
Superficie total - STC (ha)	103290	30364	90054	34143
Proporción de las áreas centrales - PAC (%)	67	43	66	44

INDICADORES DE BORDE Y DE ÁREA CENTRAL

La extensión del área interior depende del tamaño y de la forma de los parches, así como de la distancia utilizada para determinar el efecto de borde. El área interior se definió a partir de un borde de 250 metros. En 1980, los bosques primarios tenían 103,290 ha sin los efectos de borde, pero en el año 2000, el área central se redujo 13% y quedaron 90,054 ha. En más del 30% de la superficie de bosques primarios y en el 56% de la extensión de bosques secundarios, predominan las condiciones de borde con serios efectos de perturbación en la cubierta vegetal (Fig. 27). Los vientos, la disminución de la humedad del suelo y la exposición solar generan condiciones para un deterioro progresivo de los bordes hacia el interior del bosque. Los resultados obtenidos con respecto al área de borde y áreas núcleo, muestran una tendencia a la degradación funcional de las reservas de C.

Fig. 27. Superficie total, área de borde y área central de los bosques primarios y secundarios en la SNO

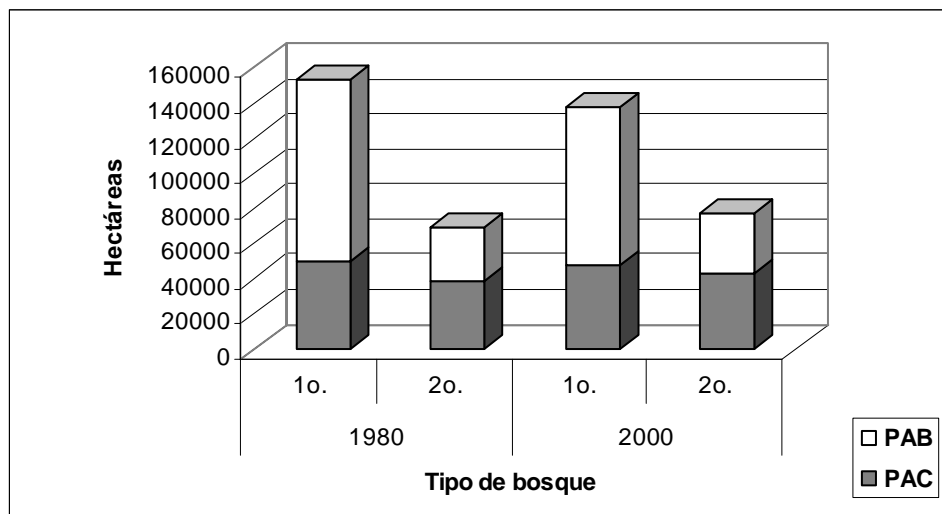
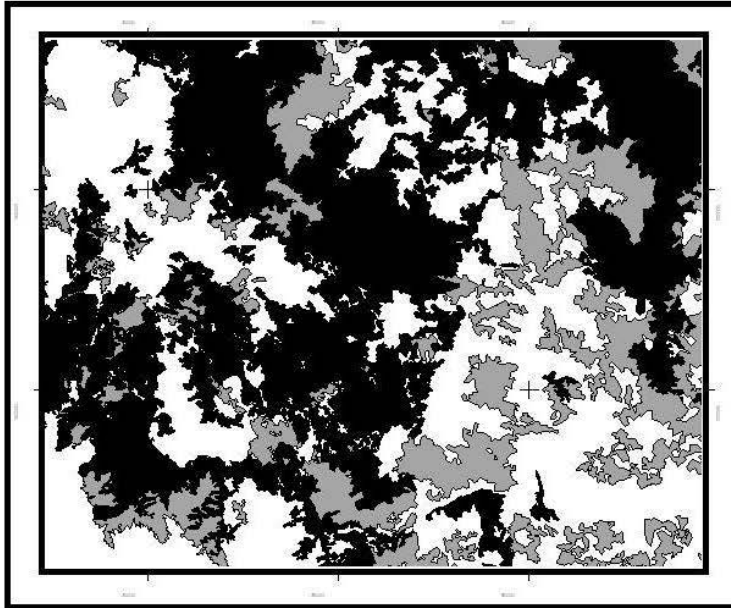
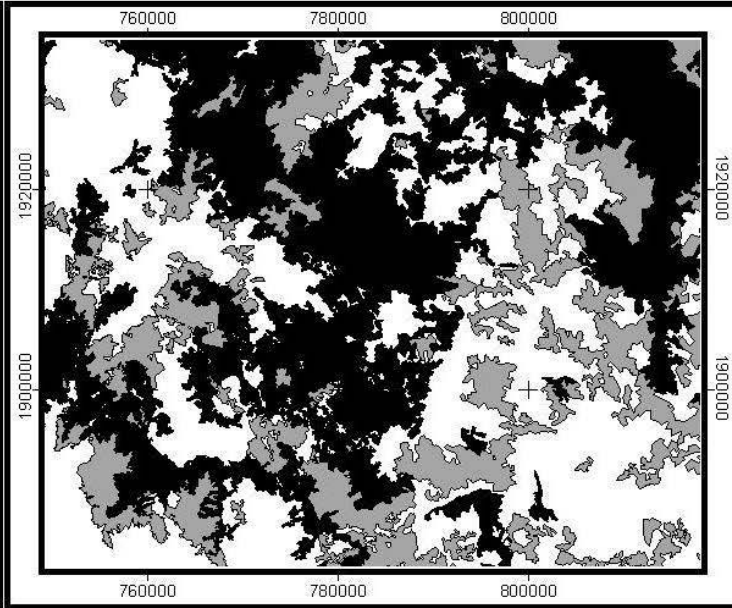


Fig. 28. Fragmentación de bosques primarios y secundarios en la Sierra Norte de Oaxaca: 1980 - 2000




SUPERFICIE FORESTAL EN 1980



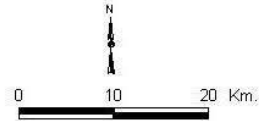
SUPERFICIE FORESTAL EN 2000



SIMBOLOGÍA

-  Bosque primario
-  Bosque secundario
-  Otras cubiertas

Especificaciones cartográficas:
Proyección: UTM
Zona: 14
Datum: ITRF 92
Estruado: GRS 90



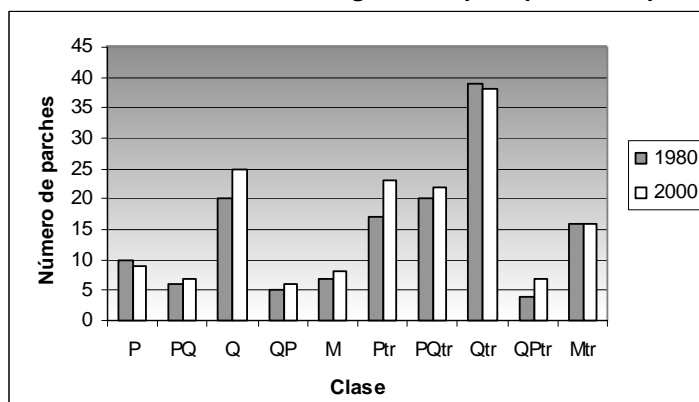
Autor: Silvia Pérez Ramírez
Fuente: Fotografías aéreas de 1980
Imagen Landsat TM de 2000

4.3.2. FRAGMENTACIÓN POR TIPO DE BOSQUE

INDICADORES DE ÁREA Y TAMAÑO DE LOS PARCHES

El bosque primario de pino y el bosque secundario de encino registraron pérdida en el número de fragmentos debido a la expansión de la frontera agrícola. Y los bosques secundarios de pino y encino-pino y el bosque primario de encino presentaron mayor fragmentación, ya que el número de sus parches aumentó. Por otro lado, el bosque mesófilo de montaña secundario no presentó ninguna variación en su número de fragmentos (Fig. 29).

Fig. 29. Variación en el número de fragmentos por tipo de bosque: 1980-2000

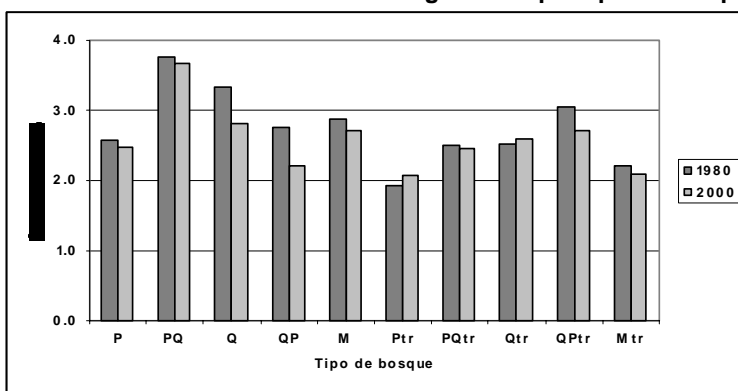


Durante el período analizado, únicamente el bosque primario de pino contaba con un gran parche que cubría el 80% de la superficie total y el resto de los bosques primarios contaban con un parche que cubría alrededor del 60% de su extensión, mientras que el tamaño del parche más grande en los bosques secundarios cubría menos del 50% de su superficie total. Con respecto al tamaño promedio de los parches (TPP), el bosque de pino-encino primario fue el más afectado pues disminuyó su superficie en 1,814 ha. Los bosques primarios de encino, encino-pino y mesófilo de montaña redujeron su TPP alrededor de 730 ha y los parches que aumentaron su tamaño promedio correspondieron a bosques secundarios de pino (+35 ha) y encino (+124 ha) (Cuadro 18).

INDICADORES DE FORMA

De los indicadores de forma analizados, el índice de forma es el más importante porque muestra la complejidad de los parches y permite deducir el grado de perturbación de los mismos. Entre 1980 y 2000, el bosque primario de encino-pino presentó una disminución de 0.6 puntos en el indicador de forma, mientras que los bosques primarios de encino y mesófilo de montaña y el bosque secundario de encino-pino presentaron un descenso de 0.2 a 0.5 puntos. El resto de los bosques tuvieron un descenso menor a 0.1 en el índice de forma (Fig. 30). Este fenómeno indica que la estructura irregular de los parches cambió a una forma más simple como consecuencia de la deforestación y de las actividades agropecuarias realizadas en la región. Los bosques secundarios de encino incrementaron 0.1 puntos debido a la recuperación de algunas zonas con este tipo de vegetación, como se mencionó en el capítulo anterior. La dimensión fractal no reveló datos destacables pues siempre tuvo un valor promedio constante de 1.3 (Cuadro 18).

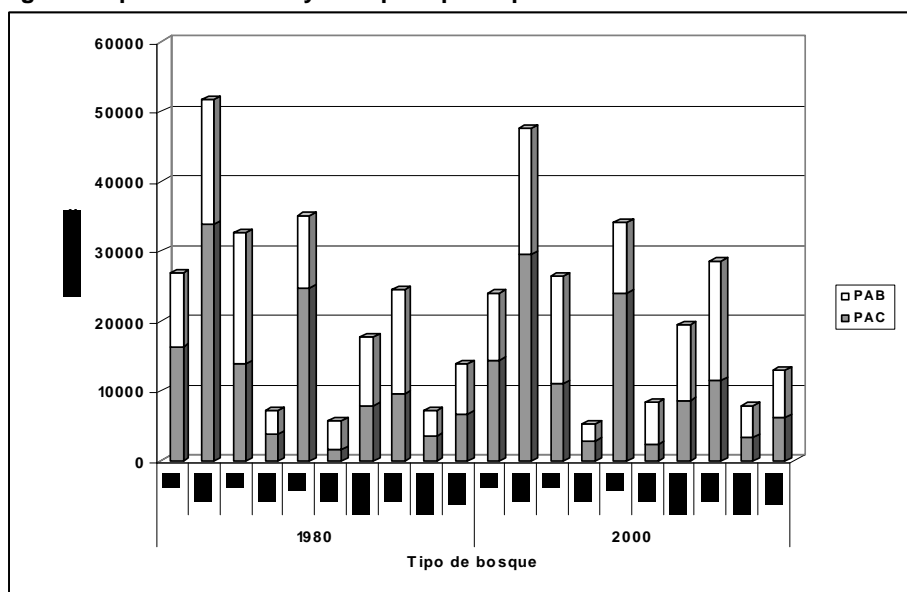
Fig. 30. Transición del índice de forma de los fragmentos por tipo de bosque: 1980-2000



INDICADORES DE BORDE Y DE ÁREA CENTRAL

Durante 1980 y 2000, todos los bosques secundarios tuvieron una grave reducción en su extensión, determinada por los efectos de borde (EB). Este fenómeno reduce la cantidad de biomasa y las reservas de C en la vegetación y los suelos. La clase más afectada por el EB fue el bosque secundario de pino pues superó el 70% de PAB, el resto de los bosques secundarios presentaron más del 50% de su superficie alterada por los efectos de borde. Los bosques primarios tuvieron una proporción de área central entre 50% y 70%, con excepción del bosque de encino que contaba con menos del 42% de PAC (Fig. 31). Sólo cuatro de los diez tipos de bosque analizados (bosques primarios de pino, mesófilo de montaña y mixtos) podrían mantener su potencial como reservas de C ya que el resto de los ecosistemas son muy vulnerables a la perturbación, aunque este comportamiento se puede revertir a través de opciones de manejo forestal orientadas a la mitigación de CO₂.

Fig. 31. Superficie de PAB y PAC por tipo de parche forestal en la SNO: 1980-2000



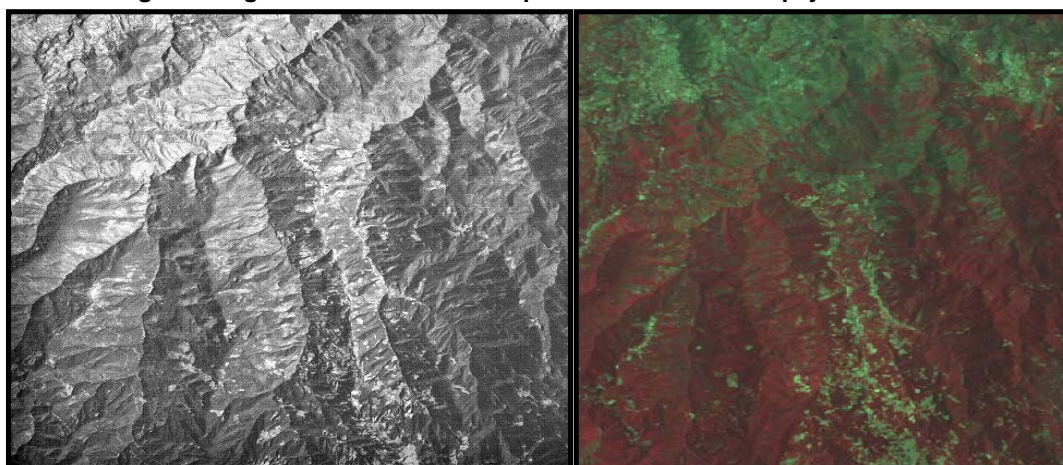
Cuadro 18. INDICADORES DE LA FRAGMENTACIÓN POR TIPO DE BOSQUE EN LA SIERRA NORTE DE OAXACA: 1980 y 2000													
AÑO	CLASE	SC ha	NP	TPG ha	TPP ha	IF	P/A m/ha	DF	PBP m/parche	STB ha	PAB %	STC ha	PAC %
1980	P	26795	10	21368	2680	2.6	53	1.3	49284	10575	39	16220	61
	PQ	51730	6	30592	8622	3.8	28	1.3	139933	17851	35	33879	65
	Q	32710	20	10037	1635	3.3	46	1.3	48690	18808	58	13902	42
	QP	7061	5	3774	1412	2.8	61	1.3	35055	3371	48	3690	52
	M	35043	7	23470	5006	2.9	24	1.3	66774	10251	29	24792	71
	Ptr	5710	17	1317	336	1.9	54	1.3	12331	4056	71	1654	29
	PQtr	17657	20	5029	883	2.5	372	1.3	25023	9779	55	7878	45
	Qtr	24415	39	4086	626	2.5	53	1.3	21182	14953	61	9462	39
	QPtr	7154	4	4002	1789	3.0	30	1.3	43320	3722	52	3432	48
Mtr	13825	16	3992	864	2.2	63	1.3	22358	7218	52	6607	48	
2000	P	23918	9	19670	2658	2.5	54	1.3	48832	9535	40	14383	60
	PQ	47631	7	29333	6807	3.7	31	1.3	122136	18149	38	29482	62
	Q	26487	25	9755	1060	2.8	44	1.3	31930	15497	59	10990	41
	QP	5107	6	3414	852	2.2	59	1.3	19730	2360	46	2747	54
	M	34173	8	23054	4277	2.7	26	1.3	57630	10089	30	24084	70
	Ptr	8379	23	1747	371	2.1	51	1.3	13953	6042	72	2337	28
	PQtr	19382	22	4455	873	2.5	63	1.3	24254	10737	55	8645	45
	Qtr	28481	38	3975	750	2.6	49	1.3	24096	16928	59	11553	41
	QPtr	7780	7	3207	1111	2.7	45	1.3	31598	4462	57	3318	43
Mtr	12988	16	3666	809	2.1	60	1.3	20858	6872	53	6116	47	

Para la simbología de la columna "Clase" ver Cuadro 9. Descripción de la leyenda, del capítulo III. Para la simbología del resto de las columnas ver Cuadro 16. Indicadores de la fragmentación.

4.3.3. FRAGMENTACIÓN EN LOS MUNICIPIOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El 5% de los municipios presentaron más de 500 ha de bosque afectadas por la fragmentación (Santa Catarina Ixtepeji -Fig. 32, Santa María Tlahuitoltepec, San Pedro y San Pablo Ayutla -Fig. 33 y Totontepec Villa de Morelos). El 17% de los municipios presentaron entre 100 y 500 ha de superficie forestal afectadas por la fragmentación (San Ildefonso Villa Alta, Teotitlán del Valle, Mixistlán de la Reforma, San Cristóbal Lachirioag, Nuevo Zoquiapam, San Juan Juquila Vijanos, San Juan Yatzona, Santo Domingo Roayaga, Santo Domingo Xagacia, San Andrés Yaa, Ixtlán de Juárez y San Pablo Paganiza). Y 78% de los municipios en la zona de estudio (56 municipios) presentaron menos de 100 ha de bosque afectadas (Fig. 34).

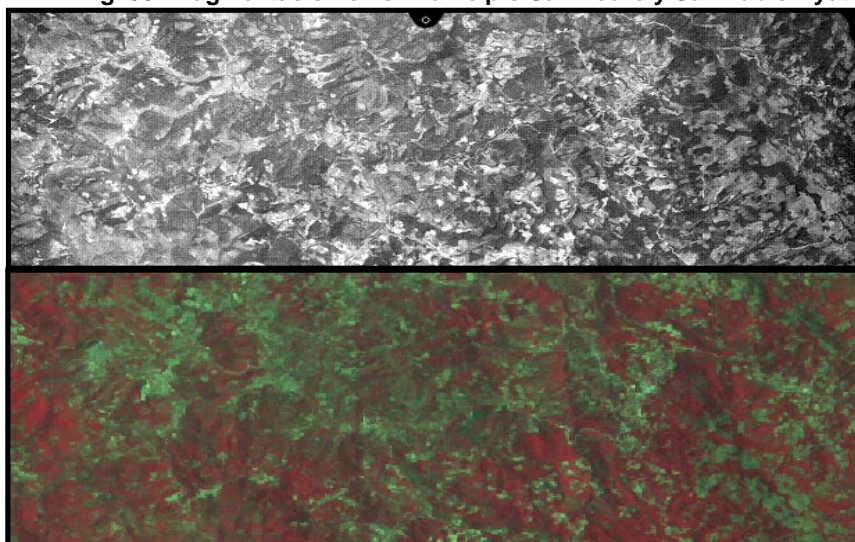
Fig. 32. Fragmentación en el municipio Santa Catarina Ixtepeji: 1980 - 2000



Fecha de vuelo: noviembre de 1980; rollo 453, línea 7c, núm. de fotografía 28

Imagen Landsat TM 2000

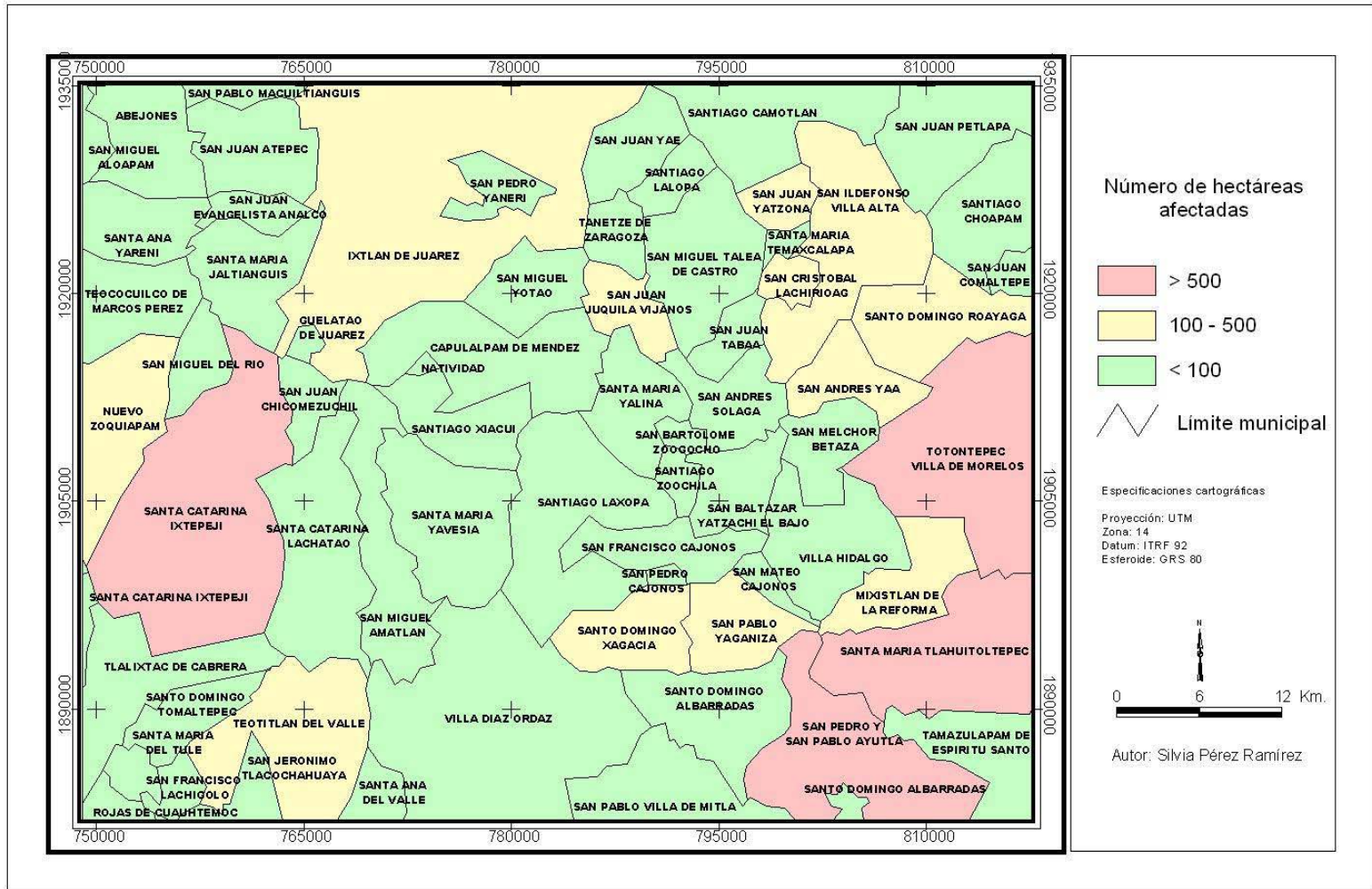
Fig. 33. Fragmentación en el municipio San Pedro y San Pablo Ayutla: 1980 – 2000



Arriba: fotografía aérea con fecha de vuelo - noviembre de 1980, rollo 525, línea 9b, número de fotografía 35. Abajo: Imagen Landsat TM 2000.

En la imagen de satélite, el color rojo corresponde a vegetación y el color verde corresponde a cultivos y pastizal inducido.

Fig. 34. Superficie afectada por la fragmentación en los municipios del área de estudio: 1980 - 2000



4.4. CONCLUSIÓN

A nivel de la totalidad del paisaje, entre 1980 y 2000, la superficie forestal disminuyó 3.5% (7,758 ha) de su área original, lo que aproximadamente corresponde a 2 MtC perdidas y a una emisión de más de 6 Mt CO₂. El número de parches aumentó y se redujo su tamaño pues en el año 2000 más del 60% de los parches tenían menos de 500 ha. Esto es un factor negativo para la obtención de créditos por captura de carbono pues sólo se otorga a parches de bosque con una extensión mayor a 500 ha. La reducción en el tamaño de los fragmentos definió un mayor efecto de borde pues en el año 2000, más del 47% (100,500 ha) de la superficie forestal presentaba perturbación, esto significa que en lugar de que los reservorios tuvieran la capacidad de almacenar 22.1 MtC, sólo almacenaron 5.1 MtC, es decir, cuatro veces menos carbono. En 1980 se conservaba un gran parche de bosque de 30,592 ha que se redujo en 1,259 ha para el año 2000 a causa de la expansión de zonas agropecuarias. Esta disminución en la superficie del fragmento se puede traducir en la emisión de 1 Mt de CO₂. El promedio de borde por parche aumentó, la proporción perímetro-área de los parches se duplicó y el índice de forma se redujo. Estos indicadores reflejan el proceso de fragmentación en la zona, lo que implica mayor vulnerabilidad de las especies forestales a los cambios microclimáticos, cambios en su fenología y menor capacidad de almacenamiento de carbono en su biomasa. De acuerdo con los resultados obtenidos, los bosques más afectados por el proceso de fragmentación en orden descendente fueron los bosques primarios de encino, pino-encino, pino y encino-pino que se distribuyen en el suroeste y en el oriente de la región de estudio. El bosque mesófilo de montaña fue el ecosistema menos afectado por la fragmentación. Finalmente los municipios que requieren de mayor atención para reducir los efectos de la fragmentación son: Ixtepeji, Tlahuitoltepec, Ayutla y Totontepec. El análisis a nivel municipal es importante porque una vez identificadas las zonas con mayor fragmentación será más fácil definir y gestionar proyectos de captura de carbono que brinden beneficios socioeconómicos en cada municipio.

CAPÍTULO V. PATRONES TERRITORIALES DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN LA SIERRA NORTE DE OAXACA: 1980 – 2000

5.1. INTRODUCCIÓN

Determinar la magnitud de las reservas de carbono en la Sierra Norte de Oaxaca es relevante para las políticas relacionadas con el cambio climático global a nivel nacional debido al acuerdo de México con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC). La conservación de los bosques y su adecuado manejo pueden contribuir en el secuestro de dióxido de carbono presente en la atmósfera y en la mitigación del calentamiento global. El pago por tonelada de carbono capturado va de \$1 a \$90 dólares y para un programa de conservación se otorgan entre \$10 y \$82 dólares por tonelada de C (IPCC, 2000; Sedjo, 2001; Stavins & Richards, 2005). El valor económico de una reserva puede ser significativamente alto dependiendo de su magnitud, lo que demuestra, que su conservación no sólo tiene implicaciones ecológicas sino también económicas a escala local y regional.

Se estima que la cantidad de carbono en un ecosistema forestal está asociado con sus concentraciones en la biomasa y en el suelo. Cuevas (2004) obtuvo el índice diferencial normalizado de la vegetación (NDVI) por tipo de comunidad vegetal en el estado de Oaxaca. Los valores más altos de NDVI indican grandes áreas fotosintéticamente activas, es decir, que hay mayor producción de biomasa y por lo tanto mayor cantidad de carbono en la vegetación. Los resultados de Cuevas muestran que las comunidades vegetales y sus valores acumulados de NDVI para el año 2003, en orden descendente son: Bosque mesófilo de montaña (14.8), Bosque de pino-encino (14.3), Bosque de encino-pino (14.1), Bosque de pino (13.9), Bosque de encino (12.3), Selva baja caducifolia (12.2) y los cultivos y pastizales presentan valores más bajos. La cantidad de biomasa y el contenido de carbono en las diferentes comunidades vegetales están determinados por la fragmentación del ecosistema y su grado de perturbación por un lado, y por otro están definidos por la composición vegetal, la talla, la estructura del arbolado y de la densidad de individuos por unidad de área (Peña del Valle, 2003). El estudio que realizó López (2005) en bosques templados en la Sierra Norte de Oaxaca, reveló que la densidad promedio de pinos (873 individuos por hectárea) es menor que la densidad promedio de encinos (1773 individuos por hectárea) debido al aprovechamiento forestal selectivo de pino en la zona. Sin embargo, la biomasa aérea es mayor en los bosques de coníferas debido a que la talla de los pinos es más grande que la talla de los encinos. Los pinos de la región, tienen un diámetro promedio a la altura del pecho (DAP) 3 veces más extenso que los encinos y una altura promedio 2 veces superior. Finalmente, el trabajo de Canto (2004) muestra que el suelo de los bosques maduros húmedos en la Sierra Norte de Oaxaca contiene 1.5 veces más carbono que el suelo de bosques maduros secos y el suelo con cubierta forestal (64.4 mgC/kg) almacena 3 veces más carbono que los suelos con cultivos (19.3 mgC/kg).

5.2. MÉTODO

Con base en distintas fuentes se calculó el valor de la densidad de carbono promedio para las comunidades vegetales presentes en la zona de estudio. Este procedimiento se realizó porque no existen datos concretos de densidad de C en la zona. Además la cantidad de C almacenado en los bosques es muy variable pues depende de diversos factores como: el tipo y la condición del hábitat, la composición de especies, la edad, los procesos de PPB, PPN y PNE, la cantidad de biomasa aérea y subterránea, el clima, la fertilidad del suelo, la disponibilidad de agua y el grado de fragmentación. El valor promedio de densidad de C por tipo de bosque es el siguiente: 220 tC/ha en bosque de pino, 178 tC/ha en bosque de encino, 202 tC/ha en bosque mixto, 303 tC/ha en bosque mesófilo de montaña, 110 tC/ha en bosque secundario y 148 tC/ha en selva baja caducifolia. Las superficies cubiertas por cultivos y pastizales contienen en promedio 5 y 7 tC/ha respectivamente (Cuadro 19 y Fig. 35). Los datos obtenidos son compatibles con los valores acumulados de NDVI y cantidad de C en los suelos, reportados para la región.

Para calcular la reserva total de carbono en la vegetación por área y tiempo determinados, se utilizó la ecuación siguiente (Flint & Richards, 1994; Gaston et al. 1998; Kojima, 1998):

$${}^{(6)} \text{RTC}_i = D_{ij} A_{ij}$$

Donde:

RTC_i : es la reserva total de carbono en el tipo de vegetación x en el tiempo i

D_{ij} : es la densidad de carbono en el tipo de vegetación j en el tiempo i

A_{ij} : es el área del tipo de vegetación j en el tiempo i .

Por ejemplo, la reserva total de carbono en el bosque de pino para el año 2000 se calculó como sigue:

$$\begin{aligned} \text{RTC} &= 220 \text{ tC/ha} * 23,918 \text{ ha} \\ \text{RTC} &= 5,261,960 \text{ tC (toneladas de carbono)} \\ \text{RTC} &= 5.3 \text{ MtC (megatoneladas de carbono)} \end{aligned}$$

A partir de la ecuación **RTC**, se obtiene la variación en la magnitud de las reservas de C en la Sierra Norte de Oaxaca entre 1980 y 2000.

Si $\text{RTC}_{i+1} < \text{RTC}_i$,

Entonces la diferencia entre los dos valores representa la cantidad de carbono perdido en la reserva durante el intervalo **(i + 1) – (i)**. Esta diferencia refleja el cambio ocasionado por la fragmentación y la deforestación (Flint & Richards, 1994; Gaston et al. 1998; Kojima, 1998; De Jong, 2000).

Cuando $RTC_{i+1} > RTC_i$,

La diferencia entre los dos valores representa la cantidad de C secuestrado por la vegetación durante ese período de tiempo (Flint & Richards, 1994; Gaston et al. 1998; Kojima, 1998; De Jong, 2000).

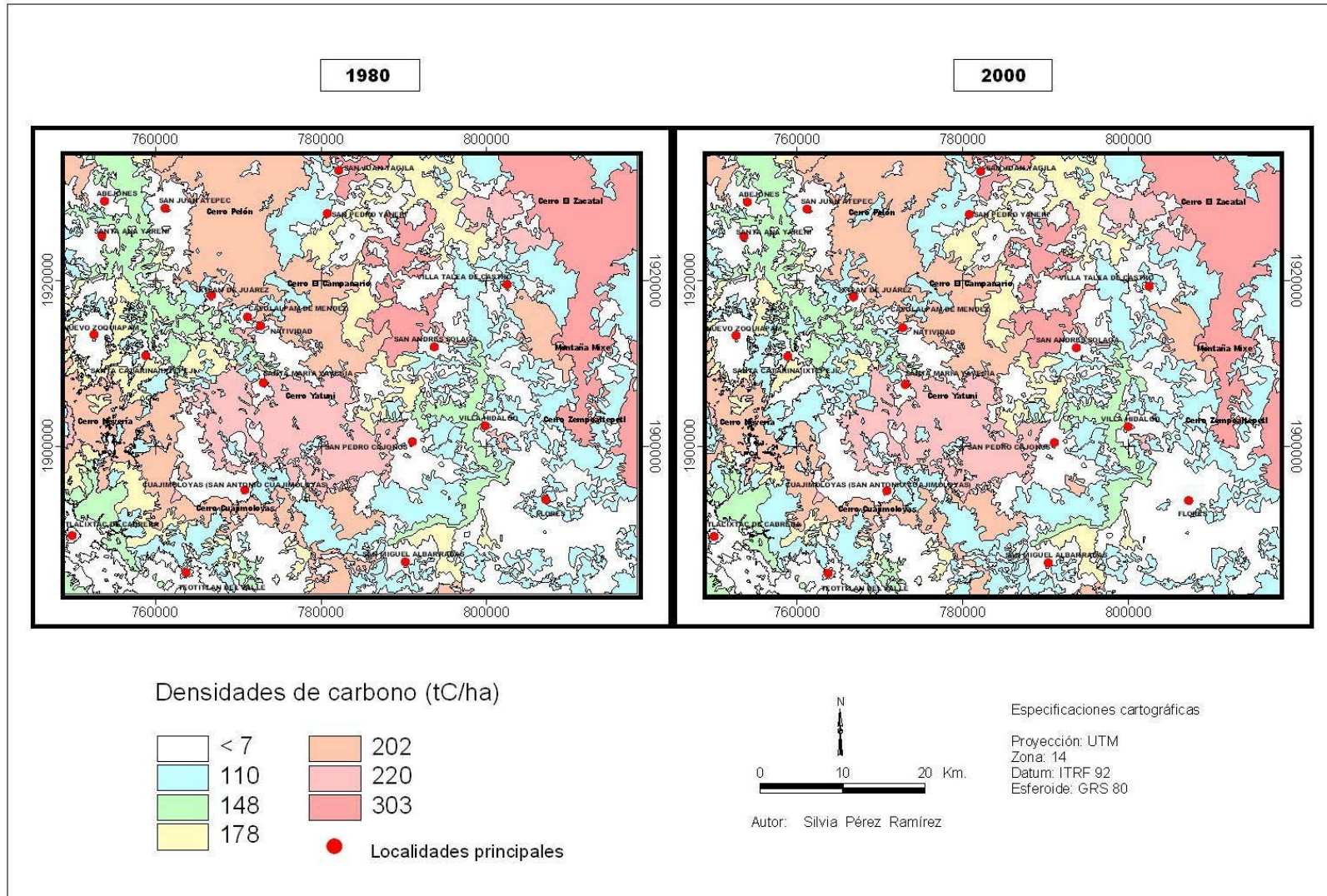
Cuadro 19. COMPARACIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE DENSIDADES DE CARBONO EN BOSQUES TEMPLADOS

VEGETACIÓN	BIOMASA tC/ha	SUELO tC/ha	TOTAL tC/ha	FUENTE
BOSQUE TEMPLADO	80	118	198	3
	46	113	159	4
	130	120	250	8
			220	11
			350	13
			215	14
	59	100	159	15
			240	17
			150	18
		123	134	257
	172	42	214	25
			228	27
Promedio			220	
BOSQUE DE PINO	21	213	234	3
	202	59	261	4
			194	6
	120	156	276	7
			285	10
	99	120	180	19
	60	120	180	20
	79	100	179	21
	225	121	346	22
	136	81	217	22
145	91	236	22	
74	94	217	24	
138	36	171	28	
		175	29	
		142	30	
	78		142	31
Promedio			220	
BOSQUE DE ENCINO	52	43	52	1
	205	103	307	16
	69	120	162	19
	42	120	162	20
	53	100	153	21
			210	29
		135	31	
		284	31	
		208	31	
Promedio			178	
BOSQUE MIXTO	135	151	220	5
	157	64	221	14
			193	15
	99	74	173	17
	90	120	210	23
			107	26
		108	26	
		300	31	
Promedio			202	
BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA	103	141	244	1
	204	40	244	9
	220	200	420	31
Promedio			303	
PASTIZAL			7	1
			5	5
			7	10
			1	26
			16	31
Promedio			7	

VEGETACIÓN	BIOMASA tC/ha	SUELO tC/ha	TOTAL tC/ha	FUENTE
BOSQUE SECUNDARIO	30	169	33	1
			199	9
			197	12
			50	13
			90	25
		50	29	
		150	30	
Promedio			110	
SELVA	164	115	212	15
			248	16
			216	17
			73	16
		220	17	
		279	20	
		182	31	
Promedio			312	
SELVA CADUCIFOLIA	65	104	150	2
			169	3
			110	19
			100	19
55	70	125	31	
Promedio			148	
CULTIVOS			5	10
			4	28
Promedio			5	
CAFÉ			14	13
			14	29
Promedio			14	

Número de fuente	FUENTE
1	Acosta et al. 2002
2	Bass et al. 1992 en Brown, 1992
3	Bonan, 2002
4	Breymeyer et al. 1996
5	Broadmeadow y Matthews, 2003
6	De Jong et al. 1995
7	De Jong et al. 2000
8	Dixon et al. 1994
9	Etchevers et al. 2002
10	Flint & Richards, 1994
11	Goodale et al. 2000
12	Gutiérrez y Lopera, 1992 en Brown, 1992
13	Hopkins, 1999
14	INE-SEMARNAT, 2001
15	IPCC, 2000
16	Ito y Oikawa, 1992 en Brown, 1992
17	Kojima, 1998
18	Kozłowski et al. 1991
19	Masera y Ordóñez, 1997 en Ordóñez, 1999
20	Masera, 1995
21	Masera, 1997
22	Nabuurs, 1993 en Ordóñez, 1999
23	Nilsson, 1995 en Ordóñez, 1999
24	Ordóñez, 1999
25	Peng et al. 1992 en Brown, 1992
26	Peña del Valle, 2003
27	Raev et al. 2002
28	Roy, 2001
29	Salisbury & Ross, 1992
30	Svirezhev, 1992 en Brown, 1992
31	Terradas, 2001

Fig. 35. Reservas de carbono en la Sierra Norte de Oaxaca: 1980 y 2000

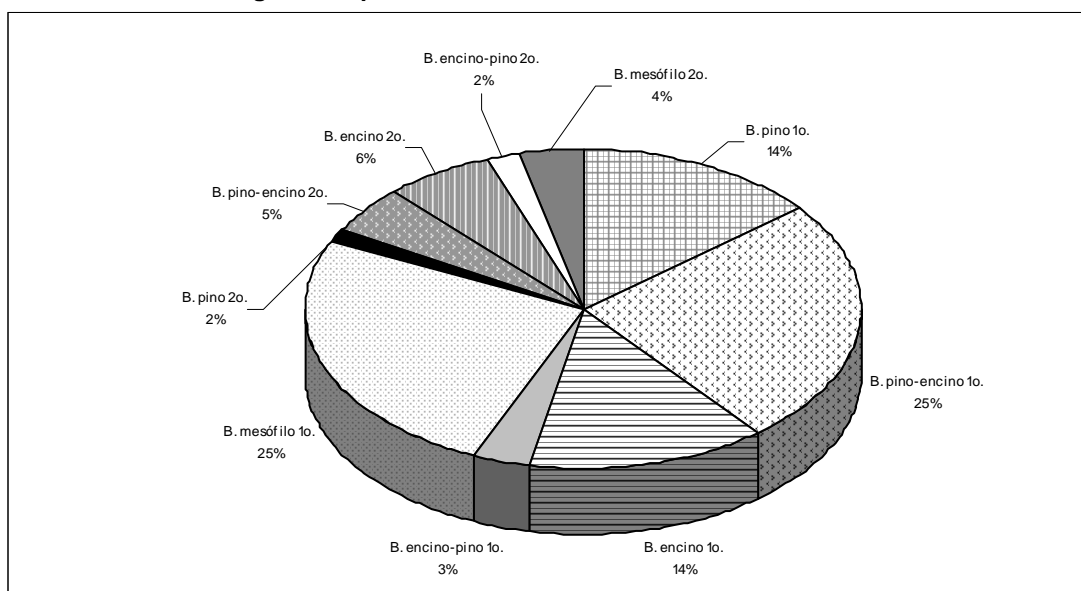


5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1. CONTENIDO DE CARBONO POR TIPO DE BOSQUE Y POR MUNICIPIO EN 1980

En 1980, las reservas de carbono almacenaron 41.8 MtC. El 82% (34.2 MtC) del total de las reservas se concentró en los bosques primarios y el 18% (7.6 MtC) se concentró en los bosques secundarios. Los ecosistemas secundarios son incapaces de almacenar grandes cantidades de C porque son más susceptibles a los cambios microclimáticos derivados de la fragmentación. El porcentaje de las reservas de C en los bosques primarios por orden de importancia fue: mesófilo de montaña (25%), pino-encino (25%), pino (14%), encino (14%) y encino-pino (3%). El porcentaje de las reservas de C en los bosques secundarios por orden de importancia fue: encino (6%), pino-encino (5%), mesófilo (4%), encino-pino (2%) y pino (2%) (Fig. 36 y Cuadro 20).

Fig. 36. Proporción de las reservas de C en la SNO, 1980



En 1980, de los 72 municipios que integran la zona de estudio, el único municipio con reservas de carbono mayores a 4.7 MtC fue Ixtlán de Juárez. Los municipios con reservas mayores a 2 MtC fueron: Santa Catarina Ixtepeji, Totontepec Villa de Morelos y Villa Diaz Ordaz, que correspondían al 4% del total de los municipios. Los municipios con reservas entre 1 y 2 MtC fueron: Laxopa, Choapam, Petlapa, Capulalpam, Yavesía, Villa Alta, Camotlán, Roayaga, Teotitlán y Yalina y correspondían al 14%. Los municipios que almacenaban en sus bosques entre 0.5 y 1 MtC eran: Talea de Castro, Lachatao, Amatlán, Tlahuiloteppec, Zoquiapam, Yotao, Yaa y Albarradas, y representaban el 11%. Los municipios que concentraban entre 0.1 y 0.5 MtC correspondían al 40% del total de

los municipios (29 municipios) y el resto de los 21 municipios acumulaban en su superficie forestal menos de 0.1 MtC (Cuadro 20).

Cuadro 20. MUNICIPIOS CON LAS PRINCIPALES RESERVAS DE CARBONO EN EL ÁREA DE ESTUDIO

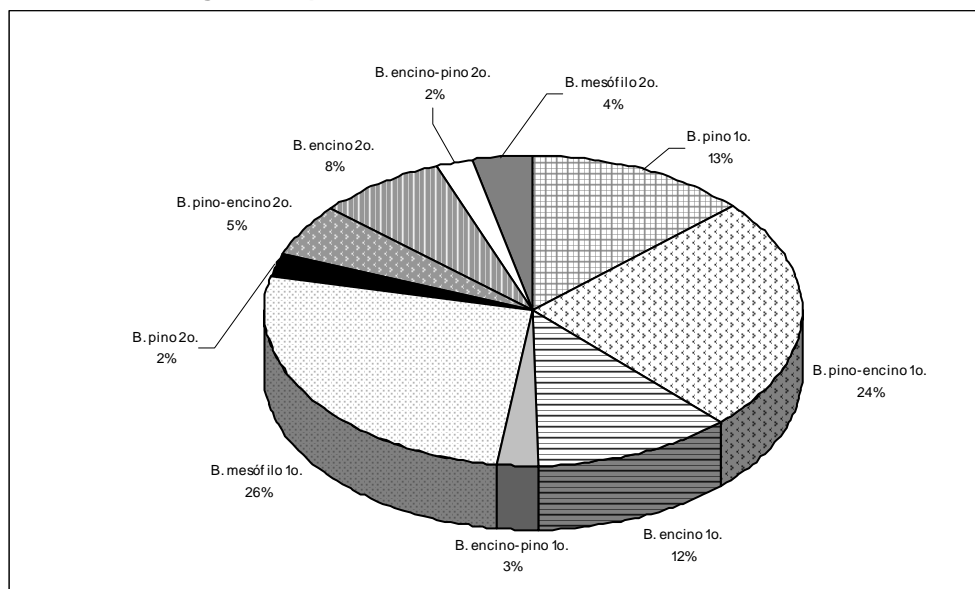
MUNICIPIOS	RESERVAS DE CARBONO (miles de toneladas)			MUNICIPIOS	RESERVAS DE CARBONO (miles de toneladas)		
	1980	2000	cambio		1980	2000	cambio
Abejones	199.8	199.8	0.0	San Pablo Maculitanguis	158.8	158.8	0.0
Asunción Cacalotepec	0.2	0.2	0.0	San Pablo Villa de Mitla	373.7	354.7	-18.9
Capulalpam de Méndez	1587.8	1574.4	-13.4	San Pablo Yaganiza	255.9	276.8	20.9
Guelatao de Juárez	16.8	16.3	-0.5	San Pedro Cajonos	0.2	0.2	0.0
Ixtlán de Juárez	4713.1	4580.3	-132.9	San Pedro y San Pablo Ayutla	380.1	288.5	-91.7
Mixistlán de la Reforma	499.5	413.2	-86.3	San Pedro Yaneri	194.9	190.7	-4.2
Natividad	11.3	11.3	0.0	Santa Ana del Valle	51.0	48.0	-3.0
Nuevo Zoquiapam	659.3	573.5	-85.8	Santa Ana Yareni	42.2	55.0	12.7
San Andrés Huayapam	74.6	65.7	-8.8	Santa Catarina Ixtepeji	2929.2	2382.1	-547.2
San Andrés Solaga	263.1	257.9	-5.3	Santa Catarina Lachatao	939.7	802.6	-137.0
San Andrés Yaa	558.5	525.9	-32.6	Santa María Jaltepec	260.9	254.5	-6.5
San Baltazar Yatzachi El bajo	109.5	109.5	0.0	Santa María Temascalapa	67.1	62.2	-4.9
San Bartolome Zoogocho	64.4	64.4	0.0	Santa María Tepantlali	4.3	4.3	0.0
San Cristóbal Lachirioag	89.1	52.5	-36.6	Santa María Tlahuitoltepec	744.3	594.4	-149.8
San Francisco Cajonos	416.4	408.4	-7.9	Santa María Yalina	1038.7	1015.6	-23.1
San Ildefonso Villa Alta	1493.5	1407.8	-85.7	Santa María Yavesia	1563.6	1539.4	-24.2
San Jerónimo Tlacoahuaya	11.8	10.9	-0.9	Santiago Camotlán	1258.3	1258.3	0.1
San Juan Atepec	344.0	343.5	-0.5	Santiago Choapam	1822.4	1821.7	-0.6
San Juan Chicomezuchil	173.4	122.5	-50.8	Santiago Lalopa	255.8	257.2	1.4
San Juan Comaltepec	239.8	239.8	0.0	Santiago Laxopa	1825.0	1821.9	-3.2
San Juan Evangelista Analco	26.5	26.5	0.0	Santiago Xiacui	302.3	285.6	-16.7
San Juan Juquila Vijanos	420.3	333.4	-86.9	Santiago Zoochila	78.1	78.1	0.0
San Juan Petlapa	1815.3	1815.3	0.0	Santo Domingo Albarradas	546.5	544.0	-2.5
San Juan Tabaa	124.6	124.6	0.0	Santo Domingo Roayaga	1176.8	1134.6	-42.2
San Juan Yae	380.1	380.1	0.0	Santo Domingo Tomaltepec	256.8	229.2	-27.6
San Juan Yatzona	299.9	248.0	-51.8	Santo Domingo Xagacia	294.8	270.4	-24.4
San Mateo Cajonos	16.9	16.9	0.0	Tamazulapam del Espíritu Santo	200.9	192.5	-8.4
San Melchor Betaza	165.8	165.8	0.0	Tanetze de Zaragoza	288.8	307.7	18.9
San Miguel Aloapam	75.4	75.4	0.0	Teococuilco de Marcos Pérez	250.2	249.4	-0.9
San Miguel Amatlán	761.7	716.3	-45.4	Teotitlán del Valle	1043.9	983.7	-60.1
San Miguel del Río	228.0	201.6	-26.5	Tlaxiact de Cabrera	450.3	348.3	-102.0
San Miguel Talea de Castro	955.2	949.8	-5.3	Totontepec Villa de Morelos	2600.0	2495.9	-104.1
San Miguel Yotao	642.7	642.7	0.0	Villa Díaz Ordaz	2349.8	2167.2	-182.6
San Pablo Etla	5.4	2.0	-3.4	Villa Hidalgo	326.3	318.7	-7.6
SUBTOTAL	17443.7	16676.2	-767.6	TOTAL	41774.9	39455.2	-2319.7

5.3.2. CONTENIDO DE CARBONO POR TIPO DE BOSQUE Y POR MUNICIPIO EN 2000

En el año 2000, las reservas de carbono almacenaron 39.5 MtC. El 79% (31 MtC) del total de las reservas se concentró en los bosques primarios y el 21% (8.5 MtC) se concentró en los bosques secundarios. El porcentaje de las reservas de C en los bosques primarios por orden de importancia fue: mesófilo de montaña (26%), pino-encino (24%), pino (13%), encino (12%) y encino-pino (3%). El porcentaje de las reservas de C en los bosques secundarios por orden de importancia fue: encino (8%), pino-encino (5%), mesófilo (4%), encino-pino (2%) y pino (2%) (Fig. 37 y Cuadro 21). En el año 2000, de los 72 municipios que integran la zona de estudio, el municipio con reservas de C mayores a

4.5 MtC fue Ixtlán. Este municipio representó 12% del total de los depósitos de C y su valor económico equivalía a \$45 millones de dólares.

Fig. 37. Proporción de las reservas de C en la SNO, 2000



Los municipios Totontepec, Ixtepeji y Díaz Ordaz con más de 2 MtC en su extensión forestal, contenían el 18% del total de las reservas de C y su valor económico fue aproximadamente de \$24 millones de dólares. Los municipios Laxopa, Choapam, Petlapa, Capulalpam, Yavesía, Villa Alta, Camotlán, Roayaga, y Yalina tuvieron entre 1 y 2 MtC, concentraron el 34% de la reserva total y su valor económico correspondió a \$15 millones de dólares en promedio. Teotitlán, Talea de Castro, Lachatao, Amatlán, Yotao, Tlahuitoltepec, Zoquiapam, Albarradas y Yaa concentraron entre 0.5 y 1 MtC, almacenaron sólo el 16% y su valor económico promedio fue de \$7 millones de dólares. Los cincuenta municipios restantes acumularon en sus bosques menos de 0.5 MtC, por lo que a pesar de representar casi el 70% de todas las unidades político-administrativas en la región, únicamente concentraron 20% del carbono total y el valor económico promedio de sus reservas equivalía a \$1.7 millones de dólares. El valor económico de las reservas en cada municipio podría aumentar mediante la consolidación de sistemas de manejo forestal.

5.3.3. CAMBIOS EN LAS RESERVAS DE CARBONO: 1980 - 2000

El cambio total de las reservas de carbono en la zona de estudio, entre 1980 y 2000, corresponde a 2.3 MtC y se traduce en una disminución del 6% del total de sus reservas. Dicho de otra manera, en la región se eliminaron 115,985 tC por año y esta cantidad representó el 0.1% del total de las emisiones derivadas del sector forestal a nivel nacional, que fue de 187 MtC en el año 2000. En general durante el periodo de estudio, todos los bosques primarios redujeron sus reservas de carbono entre 0.3 MtC y 1.1 MtC, como resultado de la fragmentación. Entre 1980 y 2000, la mayor reducción en las reservas de

carbono de los bosques primarios se manifestó en el bosque de encino que perdió más de 1.1 MtC y esto significó una pérdida del 20% de sus reservas (Cuadro 21).

Las 1,107,693 tC eliminadas en el bosque de encino representaron una disminución del 2% de la reserva total de carbono en la zona de estudio. El bosque de pino-encino disminuyó 0.8 MtC y perdió el 28% del carbono contenido en su vegetación. El bosque de pino redujo 0.6 MtC y perdió 11% del total de sus depósitos de C. Los bosques de encino-pino y mesófilo de montaña tuvieron una reducción menor a 0.4 MtC que correspondieron a una reducción del 8% y 2% de sus reservas respectivamente.

Durante el período 1980-2000, los bosques primarios de encino y pino-encino perdieron en conjunto 1.9 MtC, esta cifra representó el 83% del total de las reservas eliminadas en 20 años. Este fenómeno se explica porque precisamente estos ecosistemas fueron los más afectados por la fragmentación. Los indicadores mostraron que el número de parches aumentó, disminuyó el área de clase en más de 20% y el tamaño promedio de los parches se redujo más de 570 ha. El índice de forma descendió 0.5 puntos, lo que refleja la perturbación del bosque a causa de la tala y la expansión de la frontera agrícola. Y casi el 60% de la superficie es vulnerable a los efectos de borde. El bosque mesófilo de montaña y el bosque de encino-pino casi no presentaron cambios en sus reservas (Cuadro 21). Esto se explica porque los indicadores de área, tamaño, forma y área de borde analizados en el capítulo anterior, revelaron que estos ecosistemas fueron menos afectados por la fragmentación. El bosque mesófilo y el bosque de encino-pino casi no presentaron variación en el número de parches y el tamaño del parche más grande abarcaba una buena parte de la superficie forestal de cada tipo de vegetación (más del 60%). Los índices de forma tuvieron una variación mínima y menos del 40% de la superficie de estos ecosistemas es vulnerable a los efectos de borde.

Cuadro 21. CONTENIDO DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN LA SNO: 1980 Y 2000

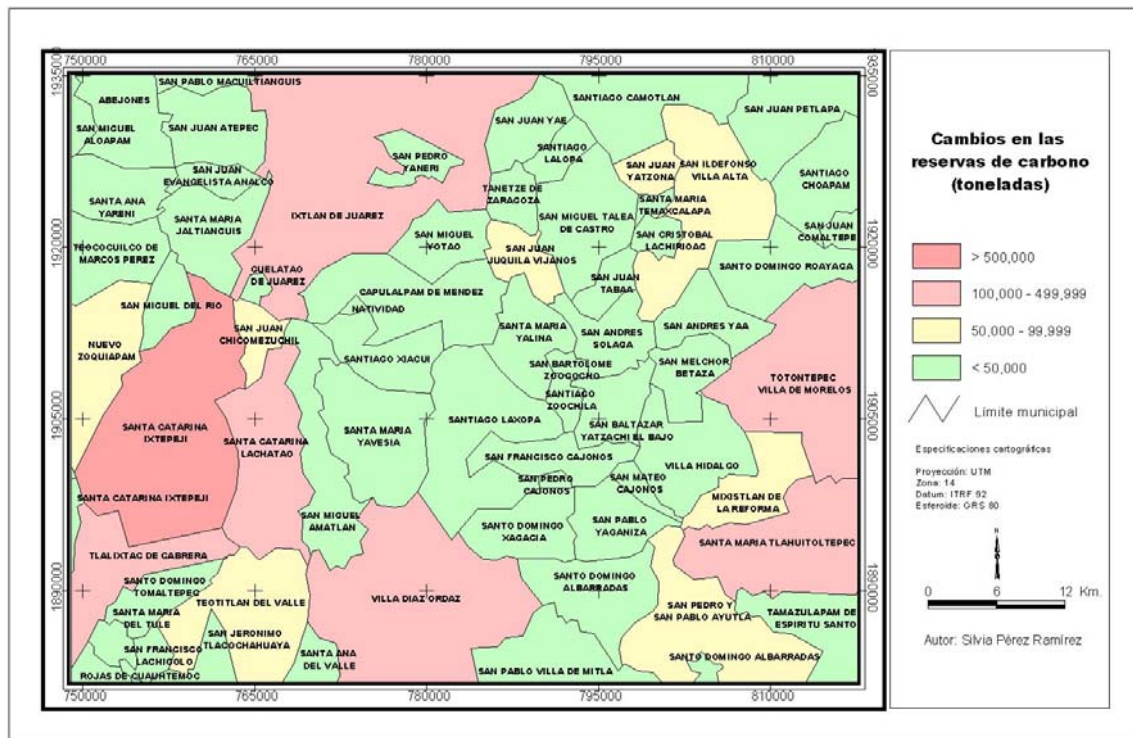
TIPO DE BOSQUE	RESERVAS EN 1980		RESERVAS EN 2000		Cambio 1980-2000	
	Toneladas	MtC	Toneladas	MtC	Toneladas	MtC
VEGETACIÓN PRIMARIA						
Bosque de pino	5894946	5.9	5261960	5.3	-632986	-0.6
Bosque de pino-encino	10449548	10.4	9621462	9.6	-828086	-0.8
Bosque de encino	5822379	5.8	4714686	4.7	-1107693	-1.1
Bosque de encino-pino	1426385	1.4	1031614	1.0	-394771	-0.4
Bosque mesófilo de montaña	10617974	10.6	10354419	10.4	-263555	-0.3
SUBTOTAL	34211232	34.2	30984141	31.0	-3227091	-3.2
VEGETACIÓN SECUNDARIA						
Bosque de pino	628065	0.6	921690	0.9	293625	0.3
Bosque de pino-encino	1942270	1.9	2132020	2.1	189750	0.2
Bosque de encino	2685650	2.7	3132910	3.1	447260	0.4
Bosque de encino-pino	786966	0.8	855800	0.9	68834	0.1
Bosque mesófilo de montaña	1520750	1.5	1428680	1.4	-92070	-0.1
SUBTOTAL	7563701	7.6	8471100	8.5	907399	0.9

TOTAL	41774933	41.8	39455241	39.5	-2319692	-2.3
--------------	-----------------	-------------	-----------------	-------------	-----------------	-------------

El análisis a nivel municipal es importante porque una vez identificadas las zonas prioritarias para conservación, reforestación o para aplicar otro tipo de manejo forestal, es más fácil gestionar los proyectos. Lo anterior, está concebido bajo la idea de que las opciones de mitigación y captura de carbono pueden desarrollarse con éxito a nivel municipal, si son planteadas como estrategias que brinden beneficios sociales, económicos y ambientales.

La cantidad de carbono perdido en el municipio Santa Catarina Ixtepeji (> 500,000 toneladas) representa el 24% de la reducción total del carbono en la región durante el periodo 1980-2000 y muestra claramente el efecto ocasionado por la fragmentación y la extensión de terrenos agropecuarios. El municipio Villa Díaz Ordaz perdió 182,564 tC que correspondieron al 8% de las reservas eliminadas. Cinco municipios (Tlahuitoltepec, Lachatao, Ixtlán, Totontepec y Tlalixtac) perdieron entre 100,000 y 500,000 tC representando el 27% de la proporción total de C eliminado. Por otro lado, en 8 de 72 municipios (Ayutla, Vijanos, Mixistlán, Zoquiapam, Villa Alta, Teotitlán, Yatzona y Chicomezuchil) se presentó el 26% del cambio total en las reservas de C con una reducción entre 50,000 y 100,000 tC. En los municipios restantes se presentó el 15% del cambio total y la reducción de sus reservas fue menor a 50,000 tC (Fig. 38).

Fig. 38. Cambios en las reservas de carbono en los municipios de la SNO: 1980-2000



5.3.4. OPCIONES PARA EL MANEJO DE LAS RESERVAS DE CARBONO EN LA SIERRA NORTE DE OAXACA

Una vez analizada la distribución de las reservas de carbono en la Sierra Norte de Oaxaca, es posible definir áreas prioritarias de conservación y plantear alternativas de manejo de los ecosistemas. Las opciones de manejo forestal tienen la finalidad de almacenar y secuestrar C a mediano y largo plazos. Existen tres posibles opciones de manejo de las reservas de C (Harkin & Bull, 2001; Kirschbaum, 2001; Sedjo, 2001; Broadmeadow y Matthews, 2003):

- **Conservación.** Consiste en la preservación de los bosques que tienen grandes cantidades de carbono por unidad de área a través del control de la deforestación, incendios y plagas. Los bosques maduros contienen más cantidad de carbono que los bosques jóvenes y, por lo tanto, la conservación de los primeros contribuye mejor a la concentración de este elemento en las reservas. Esta opción es adecuada para el bosque mesófilo de montaña y para el 18% de los municipios con reservas mayores a 1 MtC (Ixtlán, Totontepec, Ixtepeji, Díaz Ordaz, Laxopa, Choapam, Petlapa, Capulalpam, Yavesía, Villa Alta, Camotlán, Roayaga y Yalina).
- **Manejo forestal.** Se practica cuando la vegetación original fue perturbada y el manejo forestal puede aumentar las reservas mediante el reemplazo por especies que tienen un alto potencial en el almacenamiento de este elemento. El beneficio económico obtenido por secuestro de carbono para mitigar el cambio climático es un incentivo para crear plantaciones forestales. Esta alternativa es apropiada para el 8% de los municipios con más del 50% de su superficie cubierta por bosques secundarios (Cacalotepec, Tepantlali, San Pablo Etlá, Yaneri, Comaltepec y Zoogocho). Otro tipo de manejo es la intervención selectiva, que corresponde a un tipo de manejo forestal en bosques con una amplia variedad de especies forestales con un bajo nivel de explotación. Esta opción es adecuada para el bosque mesófilo y bosques mixtos, cercanos a pequeñas poblaciones para que cubran sus necesidades de madera para combustible o para un mercado especializado en la explotación de un tipo de madera, por ejemplo, en algunas localidades de los municipios: Roayaga, Totontepec, Yaa, Tanetze, Juquila Vijanos, Atepec e Ixtepeji.
- **Creación.** Es posible crear nuevas reservas de carbono estableciendo bosques sobre terrenos que nunca fueron ocupados por vegetación o sobre terrenos agropecuarios. En el primer capítulo ya se había mencionado que el establecimiento de árboles en áreas de pastizal, incrementa las reservas aproximadamente en 120 tC por hectárea y la introducción de árboles maderables y frutales entre los cultivos aumenta las reservas en 70 tC/ha. Esta alternativa puede adoptarse en el 21% de los municipios con más de 3,000 ha de superficie agropecuaria como: Ayutla, Tlahuitoltepec, Lachatao, Tamazulapan, Talea de Castro, Villa Hidalgo y Villa de Mitla.

5.4. CONCLUSIÓN

La capacidad de almacenamiento de carbono en los reservorios de la Sierra Norte de Oaxaca se está perdiendo rápidamente a causa de los procesos de deforestación y fragmentación de los ecosistemas, donde es evidente el reemplazo del bosque natural por bosque secundario, cultivos y pastizales. Los bosques primarios de encino y pino-encino fueron los más afectados por tales procesos ya que perdieron más del 20% de su contenido de C. El cambio total de las reservas de carbono entre 1980 y 2000 correspondió a 2.3 MtC y se traduce en una emisión neta a la atmósfera de 8.4 MtCO₂. En el área de estudio se eliminaron 115,985 tC por año. Esta cantidad representa el 0.2% de las emisiones anuales a nivel nacional, que corresponden a 52.3 MtC. El almacenamiento de carbono en el año 2000 fue de 39.5 MtC de las cuales, el 80% se acumuló en los bosques primarios y sólo 20% en los bosques secundarios. La opción más importante de mitigación de C que debe aplicarse en los municipios de la zona, es la conservación de los bosques primarios, seguida de la recuperación de bosques secundarios, la creación de nuevas reservas de C y del manejo forestal. Suponiendo que la región obtenga un pago de \$10 dólares por el servicio ambiental derivado de la captura de carbono en sus bosques, el valor económico de sus reservas en el año 2000 equivaldría a \$1.4 millones de dólares, cifra que supera 1.2 veces al valor de la producción agrícola en el mismo año (\$12.2 millones de pesos) y supera 23 veces al valor de la producción no maderable (\$660,800); aunque es 3.5 veces menor que la producción maderable de la región (\$54 millones de pesos). Estos recursos aumentarían los ingresos económicos de la población y podrían invertirse mejor en la conservación y el manejo sustentable de los ecosistemas para seguir obteniendo otros beneficios como la regulación del clima, protección de cuencas hidrológicas, generación y conservación del suelo, el almacenamiento y reciclaje de nutrientes y la conservación de la diversidad biológica de la región.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo indican la necesidad de establecer programas de manejo forestal sustentable dirigidos a ofrecer un servicio ambiental de captura y almacenamiento de carbono, en los cuales se creen zonas de amortiguamiento para la recuperación de los parches remanentes, así como interconexiones entre los parches para revertir el proceso de fragmentación actual. Se requieren cambios estructurales en el país para que se implementen proyectos de manejo forestal adecuados a las necesidades socioeconómicas del sector rural a escalas locales. Es necesario crear proyectos con bases económicas muy amplias, tener en cuenta la producción, los costos y los beneficios económicos para la población. Y aunque es cierto que el servicio ambiental de secuestro de C no es el objetivo principal de los proyectos, puede ser considerado como un beneficio adicional. En las comunidades de la Sierra Norte de Oaxaca se deben crear esquemas de secuestro de carbono y establecer un sistema administrativo de evaluación y monitoreo. Si se aplican programas de manejo forestal dirigidos a ofrecer un servicio ambiental de captura de C, se contribuirá a:

1. Reducir la cantidad de CO₂ atmosférico, mitigar el calentamiento global y el consecuente cambio climático
2. Disminuir las emisiones de CO₂ evitando la deforestación
3. Detener el proceso de fragmentación
4. Conservar la cubierta forestal y obtener otros beneficios como la conservación del suelo, almacenamiento y reciclaje de nutrientes, acumulación de agua y protección de la biodiversidad.
5. Mejorar el aprovechamiento de los recursos naturales

Por otro lado, la población de la región podría:

1. Obtener beneficios económicos a través del desarrollo de empresas agroforestales y forestales sustentables
2. Aumentar la productividad y ampliar las opciones de ingreso de los comuneros con base en los servicios ambientales del bosque y sus recursos
3. Mejorar las condiciones de vida de la población a través de la inversión del capital derivado de los créditos por captura de carbono y del manejo forestal en infraestructura y equipamiento de las comunidades (educación, salud, vivienda, transporte, etc.).

4. Incrementar la participación de las comunidades forestales en la economía local y regional

Únicamente 8 municipios de la Sierra Norte de Oaxaca cuentan con planes de manejo forestal (Teococuilco de Marcos Pérez, Atepec, Jaltianguis, Zoquiapam, Xiacuí, Ixtepeji, Capulalpam de Méndez e Ixtlán), no obstante, es importante que se apliquen estos planes por lo menos en los 30 municipios que poseen una superficie forestal mayor a 2,000 ha. Es prioritario conservar las reservas de carbono de los municipios que cuentan con más de 8,000 y hasta 25,000 hectáreas de bosque, como: Ixtlán de Juárez, Santa Catarina Ixtepeji, Villa Díaz Ordaz, Totontepec Villa de Morelos, Laxopa y Capulalpam. Además es necesario reforestar los municipios que presentan mayor fragmentación como Ixtepeji, Tlahuitoltepec, San Pedro y San Pablo Ayutla, Totontepec, Villa Alta, Teotitlán, Mixistlán, Lachirioag y Zoquiapam. Los municipios que poseen menor cubierta de bosque debido a la presencia de actividades agropecuarias como Xagacia, Tamazulapam, Tomaltepec, Yaneri, Solaga y San Miguel del Río, pueden recurrir a estrategias de conversión de los sistemas agrícolas a agroecosistemas así como a la reforestación de sus áreas perturbadas.

Todo lo anterior, con la finalidad de integrar un proyecto común de secuestro y almacenamiento de carbono y obtener resultados satisfactorios en los aspectos ambiental, social y económico de la región. Para ello, se requiere una política forestal más eficiente y bien dirigida con interrelaciones entre los propietarios de la tierra, gestores, políticos, científicos y técnicos. Finalmente se recomienda que en futuras investigaciones se construyan diversos escenarios de captura de C por tipo de reserva y por opciones de mitigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta M., K. Quednow, J. Etchevers y C. Monreal. 2002. Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. En: www.fao.org/clim/does/1-5.HTML
- Agarwal C. et al. 2002. A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. Newton Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station.
- Apan A y J. Peterson. 1998. Probing tropical deforestation. The use of GIS and statistical analysis of georeferenced data. *Applied Geography* 18: 137-152.
- Arriaga, L., J.M. Espinosa, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Art H. W. 1993. *The Dictionary of Ecology and Environmental Science*. Henry Holt and Company. New York, USA.
- Bocco G., M. Mendoza y O. Masera. 2001. La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía* 44: 18-38.
- Bonan G. 2002. *Ecological climatology concepts and applications*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.
- Breymeyer A.I., D.O. Hall, J.M. Melillo & G.I. Agren. 1996. *Global Change. Effects on Coniferous Forest and Grasslands*. John Wiley & Sons. New York, USA.
- Broadmeadow M. & R. Matthews. 2003. *Forest, Carbon and Climate Change: the UK Contribution*. Forestry Commission En: www.forestry.gov.uk/forest_research/
- Brown S. 1992. XI World Forestry Congress Antalya, Turkey 13 to 22 October 1992. En: www.fao.org/clim/does/1-5.HTML
- Brown S. 1993. Tropical forests and the global carbon cycle: the need for sustainable land-use patterns. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 46: 31- 44.
- Burel F. & J. Baudry. 2002. *Ecología del paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*. Mundi-Prensa. España.
- Bush M. 1997. *Ecology of a changing planet*. Prentice Hall. United States of America.
- Calow P. 1998. *The encyclopedia of Ecology & Environmental Management*. Blackwell Science. Malden, M.A. USA.

- Cannell M.G.R. 2004. Land Sinks: the Kyoto Process and Scientific Implications. En: Forests at the Land-Atmosphere Interface. Eds. M. Mencuccini, J. Grace, J. Moncrieff and K.G. McNaughton. CAB International. N.Y. USA.
- Canto J. M. 2004. Capitales de carbono, nitrógeno y fósforo del suelo en bosques templados de la Sierra Norte de Oaxaca. Tesis de licenciatura, Facultad de filosofía y letras, UNAM. México.
- Carabelli F., M. Jaramillo y M. Gómez. 2002. Cambios espaciales y temporales en los patrones del paisaje forestal: fragmentación de bosques nativos en la provincia de Chubut, Patagonia, Argentina. En <http://www.ciefap.org.ar/patagoniaforestal/1-2002/proyecto.htm>
- Cuevas M.L. 2004. Patrones regionales de productividad primaria neta en el Estado de Oaxaca. El uso de la percepción remota en los análisis espaciales. Tesis de licenciatura, Facultad de filosofía y letras, UNAM. México.
- Dale V. 1994. Effects of Land Use Change on Atmospheric CO₂ Concentrations: Southeast Asia as a Case Study. Springer-Verlag. N.Y. USA.
- 1997. The relationship between land-use change and climate change. *Ecological Applications* 7(3): 753-769.
- De Jong B. et al. 1995. Community forest management and carbon sequestration : a feasibility study from Chiapas, México. *Interciencia* 20 (6): 409-416.
- De Jong B. et al. 2000. Carbon flux and patterns of land-use/land-cover change in the Selva Lacandona, México. *Ambio* 29(8): 504-511.
- Dirzo R. y M. García. 1992. Rates of Deforestation in Los Tuxtlas a Neotropical Area in Southeast, México. *Conservation Biology* 6(1): 84-93.
- Dixon R., S. Brown, R. Houghton, A. Solomon, M. Trexler, J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Dramstad W., J. Olson & R. Forman. 1996. *Landscape Ecology. Principles in Landscape Architecture and Land Use Planning*. Island Press. Washington, USA.
- Etchevers J., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednow & L. Jiménez. 2002. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. En: www.fao.org/clim/
- Flint E. & J. Richards. 1994. Trend in carbon content of vegetation in South and Southeast Asia associated with changes in land use. En: *Effects of Land Use Change on Atmospheric CO₂ Concentrations: Southeast Asia as a Case Study*. Ed. Dale V. Springer-Verlag. New York.
- Forman R. y M. Gordon. 1986. *Landscape Ecology*. John Willey & Sons. N.Y. USA.

- Franklin A., B. Noon & T. Luke. 2002. What is habitat fragmentation? *Studies in Avian Biology* 25: 20-29.
- Galicia L., A. García, L. Gómez-Mendoza & M.I. Ramírez. En prensa. El cambio de uso del suelo como factor de degradación ambiental: una perspectiva geográfica. *Ciencia (Rev. de la Academia Mexicana de Ciencias)* 1-13 pp. México.
- García-Mendoza A.J., M.D.J. Ordoñez y M. B. Salas. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM. Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza, WWF, México.
- Gaston G. et al. 1998. State and change in carbon pools in the forests of tropical Africa. *Global Change Biology* 4: 97-114.
- Gómez-Mendoza L., E. Vega-Peña, M.I. Ramírez, J.L. Palacio-Prieto y L. Galicia. 2006. Projecting land-use change processes in the Sierra Norte of Oaxaca, México. *Applied Geography* 26: 276-290.
- González L. 2005. Análisis de la distribución espacial y temporal de los incendios en el Estado de Oaxaca de 1998 al 2003. Tesis de licenciatura, Facultad de filosofía y letras, UNAM. México.
- Goodale, C., M.J. Apps, R.A. Birdsey, C.B. Field, L.S. Heath, R.A. Houghton, J.C. Jenkins, G.H. Kohlmaier, W. Kurz, S. Liu, G. Nabuurs, S. Nilsson & A. Shvidenko. 2000. Forest Carbon Sinks in the Northern Hemisphere. *Ecological Applications* 12(3): 891-899.
- Goudie A. 2002. *Encyclopedia of Global Change. Environmental Change and Human Society*. Oxford University Press. United States of America.
- Greenpeace. 2001. *Fragmentation- A Serious Threat to Ancient Forests: Summary of Current Scientific Knowledge*. Greenpeace Research Laboratories, Department of Biological Sciences, University of Exeter, UK. En: www.greenpeace.to/publications_pdf/fragmentation.PDF
- Griffiths H. & P.G. Jarvis. 2005. *The Carbon Balance of Forest Biomes*. Taylor & Francis Group. USA.
- Harkin Z. & G. Bull, 2001. An Internacional Forest Carbon Accounting Framework a System for Managing, Measuring, Reporting an Trading Forest Carbon from an Operacional to an Internacional Scale. En *Simposio Internacional: Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18 al 20 de Octubre de 2001. Chile. En: www.uach.cl/procarbono/simposio/trabajos/
- Holsinger K. 2003. Habitat Fragmentation. En <http://creativecommons.org/>
- Hopkins W.G. 1999. *Introduction to Plant Physiology*. John Wiley & Sons. N.Y. USA.

- Houghton, R.A., D.L. Skole & D.S. Lefkowitz. 1991. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985. Net release of CO₂ to the atmosphere. *Forest Ecology and Management*, 38: 173-199.
- INEGI. 1985. Anuario estadístico del Estado de Oaxaca. México.
- 1991. Atlas ejidal del Estado de Oaxaca. Encuesta nacional agropecuaria ejidal. México.
- 1995a. Estadísticas del medioambiente. México.
- 1995b. Anuario estadístico del Estado de Oaxaca. México.
- 1999. Estadísticas del medioambiente. México.
- 2000. Anuario estadístico del Estado de Oaxaca. México.
- 2000a. XII Censo General de Población y Vivienda 2000. México.
- 2002. Anuario estadístico del Estado de Oaxaca. México.
- INE-SEMARNAT. 2000. Áreas naturales protegidas de México. México.
- INE-SEMARNAT. 2001. México 2^a. Comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. México.
- Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC). 2000. Land Use, Land User Change and Forestry. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IPCC. 2003. Meeting on Current Scientific Understanding of the Processes Affecting Terrestrial Carbon Stocks and Human Influences upon Them. 21-23 July 2003. Geneva, Switzerland. En <http://ipcc-wg1.ucar.edu/>
- IPCC. 2007. WG1 AR4. Final Report. En <http://ipcc-wg1.ucar.edu/index.html>
- Kauppi P., K. Mielikainen & K. Kuusela. 1992. Biomass and carbon budget of European Forest, 1971 to 1990. *Science* 256: 70-74.
- Kirschbaum M.U.F. 2001. Role of Forests in the Global Carbon Cycle. En: Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management. Eds. Raison R.J., A.G. Brown & D.W. Flinn. CABI Publishing in association with the International Union of Forestry Research Organizations. IUFRO. N.Y. USA.
- Köhler P., J. Chave, B. Riéra, A. Huth. 2003. Simulating the Long-term Response of Tropical Wet Forests to Fragmentation. *Ecosystems* 6: 114-128.
- Koch G. & H. Mooney. 1996. Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems. Academic Press. San Diego, California. USA.
- Kojima T. 1998. The Carbon Dioxide Problem. Integrated Energy and Environmental Policies for the 21st Century. Gordon and Breach Science. Tokyo.
- Kozlowsk T., R. Kramer & S. Pallardy. 1991. The Physiological Ecology of Woody Plants. Academic Press. San Diego, USA.

- Laurance W., S.G. Laurance & P. Delamonica. 1998. Tropical forest fragmentation and greenhouse gas emissions. *Forest Ecology and Management* 110: 173-180.
- Laurance W. 2004. Forest-climate interactions in fragmented tropical landscapes. *The Royal Society*. 359: 345-352.
- Lillesand T. y R. Kiefer. 1994. *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons. New York.
- Liu J. & P.S. Ashton. 1998. Formosaic: An individual based spatially explicit model for simulating forest dynamics in landscape mosaics. *Ecological Modelling* 106: 177-200.
- López J., I. Valdez y J. Ugalde. 1996. Corrección fotogramétrica de segmentos digitizados de fotografías aéreas aplicando un SIG para la determinación del uso del suelo en la Sierra de Quetzaltepec, México. *Boletín de Investigaciones Geográficas* 33: 9-30.
- López E.M., G. Bocco y M.E. Mendoza. 2001. Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía* 45: 56-76.
- López F. 2004. Estructura y función en bordes de bosques. *Ecosistemas*. En <http://www.aeet.org/ecosistemas/041/revision1.htm>
- López R. 2005. Efecto del manejo forestal en la diversidad, composición, estructura y regeneración de especies en un bosque templado en la Sierra Norte de Oaxaca. Tesis de licenciatura, Facultad de filosofía y letras, UNAM. México.
- Loyn R.H. & C. McAlpine. 2001. Spatial Patterns and Fragmentation: Indicators for Conserving Biodiversity in Forest Landscapes. En: *Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management*. Eds. Raison R.J., A.G. Brown & D.W. Flinn. CABI Publishing in association with the International Union of Forestry Research Organizations. IUFRO. N.Y. USA.
- Luo Y. & H. Mooney. 1999. *Carbon Dioxide an Environmental Stress*. Academic Press. California, USA.
- MacGarigal K. & B. Marks. 1995. Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Portland, U.S. Department of Agriculture, Forest.
- Martín, J. 1991. *Fundamentos de climatología analítica*. Editorial Síntesis. Madrid.
- Martínez E. 2005. Análisis del manejo forestal comunitario en la Sierra Norte de Oaxaca, México. Tesis de licenciatura, Facultad de filosofía y letras, UNAM. México.
- Mas J.F. e I. Ramírez. 1996. Comparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing. *ITC Journal* 3/4: 278-283.

- Mas J.F. 1998. Deforestación y fragmentación forestal en la región de la Laguna de Términos, Campeche: un análisis del período 1974-1991, IX Reunión Nacional SELPER-México, Zacatecas, Zac. 8-9 Oct.
- Mas J.F. y J. Correa. 2000. Análisis de la fragmentación del paisaje en el área protegida Los Petenes, Campeche, México. *Investigaciones Geográficas* 43: 42-59.
- Mas J.F. y T. Fernández. 2003. Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía* 51:73-87.
- Masera O. 1995. Carbon mitigation scenarios fore Mexican Forest: methodological considerations and results. *Interciencia* 20(6): 388-395.
- Masera O., M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon Emissions from Mexican Forests: Current Situation and Long-term Scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.
- Masera O. 2006. La ecología global. *Ciencias*, enero-marzo, núm. 81, pp. 4-15.
- Mendoza K. 2004. El valor del paisaje como una propuesta metodológica de diagnóstico sistémico integral en la cuenca del río Papagayo, Guerrero. Tesis de licenciatura. Colegio de Geografía. Facultad de filosofía y letras, UNAM.
- Miranda F. y E. Hernández. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Sociedad Botánica de México. Colegio de Postgraduados. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
- Moncayo F. 1970. Manual para uso de fotografías aéreas en dasonomía. Subsecretaría forestal y de la fauna. Dirección General del Inventario Nacional Forestal. México.
- Munn T. 2002. *Enciclopedia of Global Environmental Change*. John Wiley & Sons. United Kingdom.
- Ordóñez J.A.B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAP. México.
- Paehlke R. 1995. *Conservation and Environmentalism. An Encyclopedia*. Garland Publishing. New York.
- Palacio J. y L. Luna. 1995. Clasificación espectral automática vs clasificación visual. Un ejemplo al sur de la Ciudad de México. *Boletín Instituto de Geografía, UNAM, México*. 29: 25-40.
- Palacio-Prieto J.L., G. Bocco, A. Velázquez, J.F. Mas, F. Takaki, A. Victoria, L. Luna-Gonzalez, G. Gómez, J. López-García, M. Palma, I. Trejo, A. Peralta, J. Prado, A. Rodríguez, R. Mayorga, F. González. 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: Resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 43: 183-203.

- Peña del Valle A.E. 2003. Captura de carbono: un estudio en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala-Puebla. Tesis de maestría en Geografía. FFyL, UNAM, México.
- Peterken G. 2002. Reversing habitat fragmentation of British woodlands. En: www.panda.org/downloads/forests/ukforestsfragmentation.pdf
- Raev I., U. Asan y O. Grozev. 2002. Accumulation of CO₂ in the above-ground biomass of the forest in Turkey and Bulgaria in the recent decades. En: www.fao.org/clim/
- Raison R.J., A.G. Brown & D.W. Flinn. 2001. Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management. CABI Publishing in association with The International Union of Forestry Reserca Organizations IUFRO. N.Y. USA.
- Ramírez I. 2001. Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. Investigaciones Geográficas 45: 39-55.
- Ramírez, M.I. y R. Zubieta. 2005. Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Reporte Técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca. México D.F. Septiembre 2005.
- Reed, R., J. Beiswenger & J. Johnson-Barnard. 1998. Forest Fragmentation In The Rocky Mountains. En <http://www.zoo.utoronto.ca/able/volumes/copyright.htm>
- Robinson G.R., M. Gaines, S. Hamburg, M. Johnson, H. Fitch, E. Marinko. 1992. Diverse and Contrasting Effects of Habitat Fragmentation. Science 257: 524-526.
- Rodrigo L. 1994. Geografía general del Estado de Oaxaca. Carteles editores. México.
- Roy J., B. Saugier, H. Mooney. 2001. Terrestrial Global Productivity. Academic Press. San Diego California.
- Rzedowsky J. 1994. La vegetación de México. Limusa. México.
- Salisbury F. & C.W. Ross. 1992. Plant Physiology. Wadsworth Publishing Company. California, USA.
- SARH. 1980. Plan de desarrollo agropecuario y forestal. Estado de Oaxaca. México.
----- 1985. Inventario Forestal del Estado de Oaxaca. México.
- SARH-INIFAP. 1987. Investigación agrícola, pecuaria y forestal en el Estado de Oaxaca. Marco de referencia, problemas y opciones de solución. CIFAP-Oaxaca. México.
- Sedjo R.A. 2001. Forest Carbon Sequestration: Some Issues for Forest Investments. Resources for the Future. En <http://www.rff.org/rff/Documents/RFF-DP-01-34.pdf>

- SEGOB-Gobierno del Estado de Oaxaca. 1988. Los municipios de Oaxaca. Colección enciclopedia de los municipios del México. México.
- SEMARNAP. 1998. Diagnóstico de la deforestación en México. México.
- SEMARNAT. 2000. Catálogo de especies vulnerables al aprovechamiento forestal en bosques templados del Estado de Oaxaca. Proyecto de Conservación y Manejo Sustentable de Recursos Forestales en México, PROCYMAF. México.
- Solomon A. y H. Herman. 1993. Vegetation dynamics & global change. Ed. IIASA. USA.
- Spellerberg. 2002. Habitat Fragmentation, Barriers and Corridors. En: Ecological Effects of Roads. Academic Press. San Diego, California. USA.
- Stavins R.N. & K.R. Richards. 2005. The cost of U.S. forest-based carbon sequestration. Prepared for the Pew Center on Global Climate Change. En <http://www.pewclimate.org>
- Terradas J. 2001. Ecología de la vegetación. De la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes. Ediciones Omega. Barcelona.
- Turner M., R. Gardner, R. O'Neill. 2001. Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process. Ed. Springer-Verlag. New York.
- Velázquez A., E. Duran, I. Ramírez, J.F. Mas, G. Bocco, G. Ramírez, J.L. Palacio. 2003. Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca, México. *Global Environmental Change* 13: 175-184.
- Velázquez A., J. Mas, R. Mayorga, J. Palacio, G. Bocco, G. Gómez, L. Luna, I. Trejo, J. López, M. Palma, A. Peralta, J. Prado y F. González. 2001. El Inventario Forestal Nacional 2000. *Ciencias* 64: 13-19.
- WWF- Oficina de Programa Perú. 2003. Análisis de cambios de paisaje: Tournavista-Campo Verde y su área de influencia. Pérdida y fragmentación de bosques: 1963-2000. Informe técnico. Lima, Perú.