

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL**

**LOS RESERVORIOS DE CARBONO EN LOS BOSQUES
DE SAN JUAN XOCONUSCO, RESERVA DE LA
BIOSFERA MARIPOSA MONARCA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRA EN GEOGRAFÍA
(Manejo Integrado del Paisaje)

PRESENTA:

SILVIA PÉREZ RAMÍREZ

Directores de Tesis: Dra. María Isabel Ramírez Ramírez

Dr. Francisco Bautista Zúñiga

Sínodo: Dra. Christina D. Siebe Grabach

Dr. Diego Pérez Salicrup

Mtro. René D. Martínez Bravo

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MEXICO



Ciudad Universitaria, México, D.F. junio 2009.

CIGA
CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL



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.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la educación profesional y por la beca otorgada (DGEP/CEP) durante los estudios realizados en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), UNAM Campus Morelia.

A los miembros del sínodo integrados por: Dra. María Isabel Ramírez Ramírez, Dr. Francisco Bautista Zúñiga, Dra. Christina D. Siebe Grabach, Dr. Diego Pérez Salicrup y Mtro. René D. Martínez Bravo. Gracias por destinar parte de su valioso tiempo para la revisión de este trabajo y por sus apreciables comentarios. Gracias a todos por brindarme su apoyo y su confianza desde el inicio de este proyecto.

Al Proyecto “Efectos de la deforestación en el clima local del oriente de Michoacán” PAPIIT-IN 114707, financiado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM y dirigido por la Dra. María Isabel Ramírez Ramírez; porque a través de este se compró el equipo y material necesario para llevar a cabo el trabajo de campo y la preparación de las muestras de suelo en el Laboratorio de Suelos y Agua del CIGA.

Al Dr. Lincoln Brower y a la Dra. Karen Oberhauser que encabezan la Fundación Santuario de la Mariposa Monarca por otorgarme el financiamiento para los viáticos durante el trabajo de campo y para realizar los análisis de carbono en el laboratorio.

A la Coordinación de Docencia del CIGA, por autorizar el préstamo de equipo y material necesario para realizar el trabajo de campo.

A la Dra. Lucy Mora y a la Mtra. Kumiko Shimada que trabajan en el Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología de la UNAM, por brindarme su ayuda para llevar a cabo los análisis de carbono en el suelo.

A las técnicas Rosaura, Estela e Hilda que trabajan en el Laboratorio de Suelos y Agua del CIGA por brindarme su ayuda durante la preparación de las muestras de suelo.

Al comisariado de la comunidad San Juan Xoconusco, Lic. Alfredo Cruz y a Rigoberto por autorizarme trabajar en su territorio, por proporcionarme el programa de manejo forestal y por otorgarme información relacionada con la historia de manejo de sus bosques.

A las gentiles personas que colaboraron en el trabajo de campo: Armando Vieyra, Rigoberto, Angélica Murillo, Arturo Muñiz, José Luis Navarrete, Yuri Quiroz, Giovanni Ramírez, Gustavo Ramírez, Sebastián Yedra, Salvador, Erasmo y Carlos Cortés y a la familia Cortés por su hospitalidad durante la estancia en la comunidad.

A mis padres por su cariño, sus consejos y su respaldo. A amig@s por permanecer en contacto y por brindarme su apoyo a pesar de la distancia.

Tabla de contenido

Listado de figuras.....	3
Listado de cuadros.....	4
Unidades de conversión.....	4
RESUMEN	5
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Planteamiento del problema.....	6
1.2. Justificación	7
1.3. Objetivo general	8
1.4. Objetivos particulares	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. El cambio climático global y los reservorios forestales de carbono	10
2.1.1. <i>El cambio climático global</i>	10
2.1.2. <i>El efecto invernadero</i>	11
2.1.3. <i>El ciclo del carbono y su balance</i>	11
2.1.4. <i>Las políticas internacionales sobre cambio climático global</i>	14
2.2. La emisión de carbono y las políticas de mitigación en México	16
2.2.1. <i>La emisión y captura de carbono</i>	16
2.2.2. <i>La política nacional de mitigación de CO₂</i>	18
2.3. Los reservorios forestales de carbono	20
2.3.1. <i>Los bosques templados: sumideros de carbono</i>	20
2.3.2. <i>Los flujos de carbono en el bosque templado</i>	21
2.3.3. <i>Los reservorios de carbono en el bosque templado</i>	23
2.3.3.1. <i>Biomasa</i>	23
2.3.3.2. <i>Mantillo</i>	24
2.3.3.3. <i>Suelo</i>	25
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1. ZONA DE ESTUDIO.....	29
3.1.1. <i>Localización</i>	29

3.1.2. Características físicogeográficas.....	30
3.1.2.1. Relieve e hidrografía	30
3.1.2.2. Litología	31
3.1.2.3. Suelos	32
3.1.2.4. Clima	32
3.1.2.5. Vegetación y cubiertas del suelo.....	33
3.1.3. Estructura socioeconómica	35
3.1.3.1. Población.....	35
3.1.3.2. Actividades económicas	35
3.1.3.3. Manejo forestal.....	35
3.1.3.4. Problemática de manejo del suelo	36
3.2. MÉTODO	37
3.2.1. Definición de los sitios de muestreo	37
3.2.2 Muestreo	40
3.2.3. El contenido de carbono en la biomasa	42
3.2.4. El contenido de carbono en el mantillo.....	43
3.2.5. El contenido de carbono en los suelos.....	44
3.2.6. La distribución espacial de los reservorios de carbono	45
3.2.7. Análisis estadístico	46
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	47
4.1. La magnitud de los reservorios de carbono en San Juan Xoconusco.....	47
4.1.1. Biomasa	47
4.1.2. Mantillo.....	50
4.1.3. Suelo.....	52
4.1.4. Magnitud total de los reservorios	54
4.2. La distribución espacial de los reservorios de carbono.....	58
4.2.1. Distribución de los bosques por estado de conservación	58
4.2.2. Biomasa	62
4.2.3. Mantillo.....	65
4.2.4. Suelo.....	67
4.2.5. Distribución general	70
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN	73
5.1. Carbono en biomasa	73

5.2. Carbono en mantillo	74
5.3. Carbono en suelo	75
5.4. Magnitud total de los reservorios	77
5.5. Distribución espacial de los reservorios de C.....	78
5.6. Políticas de mitigación de CO ₂	80
CONCLUSIONES.....	82
ANEXOS	84
BIBLIOGRAFÍA	90

Listado de figuras

<i>Figura 1. Concentración Global de GEI al año 2005.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2. Reservas y flujos en el ciclo global del carbono</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3. Emisiones de C al año 2010 en México (INE-SEMARNAT, 2001).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4. Reservas y flujos de carbono en un ecosistema forestal.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5. Modelo de la dinámica de C en el suelo.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6. Carbono organico en los suelos de México (Cruz et al., 2007).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Contenido de carbono orgánico: 0-20cm de profundidad (Segura et al., 2005).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8. Localización de la comunidad San Juan Xoconusco</i>	<i>29</i>
<i>Figura 9. Mapa Altimétrico.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 10. Unidades litológicas.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 11. Porcentaje de la superficie ocupada por tipo de cubierta del suelo</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12. Localización de los sitios de muestreo</i>	<i>38</i>
<i>Figura 13. Forma de las parcelas de muestreo</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14. Promedio de carbono almacenado en la biomasa por tipo de bosque.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 15. Promedio de carbono almacenado en el mantillo por tipo de bosque</i>	<i>50</i>
<i>Figura 16. Promedio de carbono almacenado en el suelo por tipo de bosque</i>	<i>53</i>
<i>Figura 17. Promedio de carbono total almacenado por tipo de bosque</i>	<i>55</i>
<i>Figura 18. Distribución de las reservas de carbono en cada sistema</i>	<i>57</i>
<i>Figura 19. Proporción de los bosques de oyamel por estado de conservación.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 21. Proporción de los bosques de pino-encino por estado de conservación.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 20. Distribución espacial de los bosques templados en San Juan Xoconusco.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 22. Distribución espacial del carbono en la biomasa: San Juan Xoconusco.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 23. Distribución espacial del carbono en el mantillo: San Juan Xoconusco</i>	<i>66</i>
<i>Figura 24. Distribución espacial del carbono en el suelo: San Juan Xoconusco</i>	<i>69</i>
<i>Figura 25. Proporción de CO₂ por tipo de cubierta del suelo en SJX</i>	<i>71</i>
<i>Figura 26. Distribución espacial de los reservorios de C: San Juan Xoconusco</i>	<i>72</i>

Listado de cuadros

<i>Cuadro 1. Balance de carbono</i>	13
<i>Cuadro 2. Potencial de mitigación de CO₂ en México (millones de toneladas)</i>	17
<i>Cuadro 3. Potencial de mitigación del sector forestal (millones de t C)</i>	18
<i>Cuadro 4. Captura de carbono por opción de mitigación forestal</i>	19
<i>Cuadro 5. Sitios de Muestreo</i>	39
<i>Cuadro 6. Ejemplo de datos registrados en cada sitio de muestreo</i>	41
<i>Cuadro 7. Parámetros del modelo de Schumacher</i>	43
<i>Cuadro 8. Volumen de biomasa por tipo de bosque</i>	47
<i>Cuadro 9. Contenido de carbono en la biomasa de bosques con distinto manejo</i>	48
<i>Cuadro 10. Anova de 1 vía: C en la biomasa</i>	49
<i>Cuadro 11. Prueba de comparaciones múltiples de Duncan: C en biomasa</i>	49
<i>Cuadro 12. Contenido de carbono en el mantillo de bosques con distinto manejo</i>	50
<i>Cuadro 13. Anova de 1 vía: C en el mantillo</i>	51
<i>Cuadro 14. Prueba de comparaciones múltiples de Duncan: C en mantillo</i>	52
<i>Cuadro 15. Contenido de carbono en el suelo de bosques con distinto manejo</i>	52
<i>Cuadro 16. Anova de 1 vía: C en el suelo</i>	54
<i>Cuadro 17. Prueba de comparaciones múltiples de Duncan: C en suelo</i>	54
<i>Cuadro 18. Contenido de carbono en bosques de SJX con distinto manejo</i>	55
<i>Cuadro 19. Distribución del carbono en cada reservorio por tipo de bosque</i>	57
<i>Cuadro 20. Anova de 1 vía: carbono total</i>	57
<i>Cuadro 21. Prueba de comparaciones múltiples de Duncan: C total</i>	58
<i>Cuadro 22. CO₂ almacenado en la biomasa de los bosques de San Juan Xoconusco</i>	62
<i>Cuadro 23. CO₂ almacenado en el mantillo de los bosques de San Juan Xoconusco</i>	65
<i>Cuadro 24. CO₂ almacenado en el suelo de los bosques de San Juan Xoconusco</i>	67
<i>Cuadro 25. Superficie y CO₂ total almacenado en los reservorios de San Juan Xoconusco</i>	70

Unidades de conversión

1 tonelada = 1 megagramo

1 kilotonelada = 1 Gg (gigagramo)

1 Mt C (1 megatonelada de carbono) = 1,000,000 t = 1 teragramo

1 Gt C (1 gigatonelada de carbono) = 1,000,000,000 t = 1 petagramo

1 tonelada de carbono = 3.67 toneladas de bióxido de carbono (t CO₂) = 44/12

1 tonelada de CO₂ = 0.273 toneladas de carbono (t C)

Fuente: IPCC, 2000; IPCC, 2003b.

RESUMEN

Los ecosistemas terrestres almacenan dos veces más carbono (1950 Gt C) que la atmósfera (750 Gt C). Por lo tanto, representan grandes reservorios y constituyen un punto importante en las negociaciones internacionales sobre la mitigación del calentamiento global. Un reservorio es un sistema capaz de acumular o liberar carbono. Los bosques son importantes sumideros que retienen alrededor de 550 Gt C, sin embargo, son afectados por deforestación, incendios y cambio de uso del suelo. El propósito del trabajo fue evaluar la distribución espacial y la magnitud de reservorios de C en bosques templados con diferentes formas de manejo. Para ello, se trabajó en los bosques de la Comunidad Indígena San Juan Xoconusco (SJX), dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, donde se realizó un muestreo de vegetación y de suelo en 30 sitios. El análisis estadístico de los datos fue mediante ANOVA y la prueba de comparaciones múltiples de Duncan. El ANOVA mostró que sí existen diferencias significativas ($F_{(5,24)} = 9.18$; $p = 2.71$) en el contenido de C entre los tipos de vegetación presentes (oyamel y pino-encino) bajo tres diferentes condiciones de manejo (conservado, aprovechado y perturbado). Los resultados indicaron que al norte de SJX, el bosque de oyamel conservado tiene mayor potencial de captura puesto que almacenó dos veces más carbono ($1\ 235\ \text{t C ha}^{-1}$) que el bosque de oyamel aprovechado ($661\ \text{t C ha}^{-1}$) y 1.3 veces más que el bosque de oyamel perturbado ($966\ \text{t C ha}^{-1}$). Al sur de la comunidad, el bosque de pino-encino conservado almacenó tres veces más C ($669\ \text{t C ha}^{-1}$) que el perturbado ($205\ \text{t C ha}^{-1}$) y casi dos veces más C que el bosque aprovechado ($457\ \text{t C ha}^{-1}$). Los suelos almacenan dos tercios del C total, mientras que la biomasa almacena sólo un tercio. Los reservorios presentaron una distribución espacial definida en primer lugar por el tipo de vegetación y en segundo lugar por la condición de manejo. El manejo forestal comunitario en SJX podría obtener pagos por el servicio ambiental de captura de C a través de la política *Reduced Emissions from Deforestation and Degradation in Developing Countries*. Esto representaría un beneficio económico adicional para la comunidad además de otorgar otros beneficios ambientales para la región.

Palabras clave: cambio climático global, servicios ambientales, distribución espacial, manejo forestal comunitario.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Los bosques son importantes en los aspectos social, económico y ambiental porque proporcionan diversos bienes y servicios, tales como, la regulación del clima, la preservación biológica, la estabilización y el desarrollo de los suelos, la conservación del ciclo hidrológico y la regulación de las concentraciones de gases de efecto invernadero, principalmente del carbono (C) (Roy, 2001; Bonan, 2002; Munn, 2002). A nivel global, los ecosistemas terrestres (1950 Gt C) almacenan dos veces más carbono que la atmósfera (750 Gt C), por lo tanto, representan grandes reservorios. Un reservorio es un sistema que tiene la capacidad de absorber o liberar C. Los bosques tienen un papel significativo en la captura de CO₂ atmosférico ya que absorben entre 1.5 y 3.5 Gt C año⁻¹ (IPCC, 2000; Stavins & Richards, 2005); además contienen entre 20 y 100 veces más carbono por unidad de área que las tierras agrícolas que los substituyen (Dale, 1994). Los reservorios forestales presentan una distribución espacial definida por el uso del suelo, el historial de manejo, la composición y la edad de las especies vegetales y por factores ambientales (clima, suelo, litología, geoforma, exposición, pendiente) (Terradas 2001; Zhang y Justice, 2001). Los ecosistemas manejados de forma sustentable son capaces de acumular volúmenes significativos de C.

San Juan Xoconusco se ubica dentro de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM). Esta región presenta una problemática socioeconómica generada por la marginación histórica de la población, a la que se suman, los conflictos por la delimitación del territorio y el uso de los recursos naturales. La población demuestra su inconformidad con la imposición del decreto de la RBMM provocando incendios, tala clandestina y cambios de uso de suelo. Los bosques de la comunidad constituyen importantes reservorios de carbono, sin embargo, son afectados por dicha actividad humana. Uno de los efectos de la deforestación es la reducción de los reservorios de C. Cuando se elimina la biomasa, se anula el suministro de materia orgánica y disminuye la cantidad de carbono acumulado tanto en el mantillo como en el suelo. Y en caso de que nunca se recupere la vegetación, la pérdida de C será total. Los bosques de la comunidad pueden transformarse en fuentes de C si continúan los procesos de perturbación. La

actividad humana no sustentable, modifica la estructura espacial de los reservorios de C y reduce su capacidad de almacenamiento (INE-SEMARNAT, 2001; IPCC, 2000).

1.2. Justificación

Existe una considerable incertidumbre asociada con la dimensión de los reservorios de carbono en México debido a la acelerada deforestación. Sin embargo, determinar la distribución espacial y la magnitud de los reservorios de C es relevante desde el punto de vista de las políticas ambientales a nivel nacional. En México existen estudios sobre la distribución espacial del carbono orgánico en los suelos (Segura et. al., 2005; Cruz et. al., 2007); éstos sirven como referencia para localizar los mayores sumideros a nivel nacional, sin embargo, hace falta información sobre los efectos del uso del suelo en la dinámica del COS. También es necesario realizar estudios sobre la distribución y la dinámica del COS a escala local ya que servirían de base para la toma de decisiones sobre el manejo de la tierra y, para la gestión de proyectos de captura de carbono en comunidades y ejidos. El carbono almacenado en el suelo no es fácil de cuantificar pero es necesario hacerlo para entender mejor la distribución y la magnitud relativa de los almacenes aéreos y subterráneos en los ecosistemas (Kirschbaum, 2001; Roy, 2001; Munn, 2002).

Los bosques de San Juan Xoconusco son importantes porque parte de su superficie forestal fue decretada como Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en noviembre del año 2000 (Diario Oficial de la Federación, 2000). La comunidad podría aprovechar esta situación para obtener pagos por el servicio ambiental de captura de C, lo cual representaría un beneficio económico para la población y otros beneficios ambientales (conservación de biodiversidad, protección contra erosión de suelos, captación de agua, mitigación del cambio microclimático, etc). Para obtener el pago es necesario definir una línea base de captura y almacenamiento de CO₂. No obstante, no existe información sobre el contenido de C en la biomasa y en los suelos a escala local y, tampoco se han hecho estudios sobre la variabilidad espacial de los sumideros en la comunidad.

En el presente trabajo se calculó la cantidad de carbono en distintos reservorios (biomasa, mantillo y suelo) dentro de ecosistemas templados bajo diferentes

condiciones de manejo y se elaboró la cartografía de los reservorios en el territorio de San Juan Xoconusco. Los resultados de esta investigación servirán para aumentar la lista de servicios ambientales que ofrece el área natural protegida de la RBMM; serán útiles para definir una línea base de almacenamiento de C para esta comunidad y para proponer programas de manejo forestal orientados a la captura de este elemento.

1.3. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo fue:

- Evaluar la distribución espacial y la magnitud de los reservorios de carbono en bosques templados con diferentes formas de manejo (conservados, aprovechados y perturbados) en la comunidad San Juan Xoconusco.

Con base en los supuestos siguientes: Los bosques templados de San Juan Xoconusco presentan grandes diferencias entre los reservorios de carbono (biomasa, mantillo y suelo) debido a la condición de manejo. A mayor perturbación, la magnitud de carbono será menor. Los bosques contendrán mayor cantidad del carbono total en el suelo y una proporción menor en la biomasa.

1.4. Objetivos particulares

Los objetivos particulares fueron:

- Definir la importancia de los reservorios forestales de carbono en el contexto del cambio climático global.
- Identificar y caracterizar las diferentes reservas de carbono en los bosques templados.
- Calcular el contenido de carbono en la biomasa, en el mantillo y en el suelo, de los bosques de oyamel y de pino-encino.
- Comparar la magnitud de los reservorios en los bosques conservados, aprovechados y perturbados.
- Elaborar la cartografía de los reservorios de carbono en la comunidad San Juan Xoconusco.

La finalidad de esta investigación fue comparar la magnitud de C entre bosques de oyamel y bosques de pino-encino con distintas condiciones de manejo, y conocer las diferencias entre el C almacenado en la biomasa, el mantillo y el suelo dentro de cada ecosistema. Para alcanzar los objetivos se realizó el procedimiento siguiente: se realizó el muestreo de vegetación, de mantillo y de suelo en 30 sitios. Posteriormente los datos fueron procesados a través del análisis de varianza y la prueba de comparaciones múltiples de Duncan. Y a partir de la interpretación de una imagen IKONOS 2004, se generó la cartografía de los reservorios de carbono (biomasa, mantillo y suelo) en la comunidad San Juan Xoconusco.

Cada uno de los objetivos se aborda en los capítulos que integran la tesis. En el capítulo II, se precisa el papel de los reservorios en el ciclo global del carbono, se destaca su contribución en la mitigación del cambio climático global y se exponen las políticas internacionales relacionadas con el tema. También se definen los reservorios de carbono, se describe el flujo de C y se reporta el contenido de este elemento en los bosques templados, a partir de una revisión bibliográfica sobre estudios realizados a nivel nacional e internacional. En el capítulo III, se realiza una descripción de las características físico-geográficas y socioeconómicas de la comunidad San Juan Xoconusco y se describen los métodos utilizados. En el capítulo IV, se evalúa la magnitud de carbono en los distintos reservorios (biomasa, mantillo y suelo) del bosque bajo las tres condiciones de manejo; se presentan los resultados del análisis estadístico y se exhibe la cartografía de los reservorios.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. El cambio climático global y los reservorios forestales de carbono

2.1.1. El cambio climático global

El cambio climático tiene efectos en todas las escalas geográficas y sus consecuencias afectarán negativamente los sistemas ecológicos y socioeconómicos en el mundo (IPCC, 2000; Bonan, 2002). 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), los clorofluorocarbonos (CFC), etc. 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 380 ppm en 2000 (Figura 1), con una tasa anual de incremento entre 0.5 y 1.5 ppm (Calow, 1998; IPCC, 2000; Munn, 2002). Se proyecta que la concentración atmosférica de CO_2 aumentará entre 730 y 1,020 ppm para el año 2100 (IPCC, 2007).

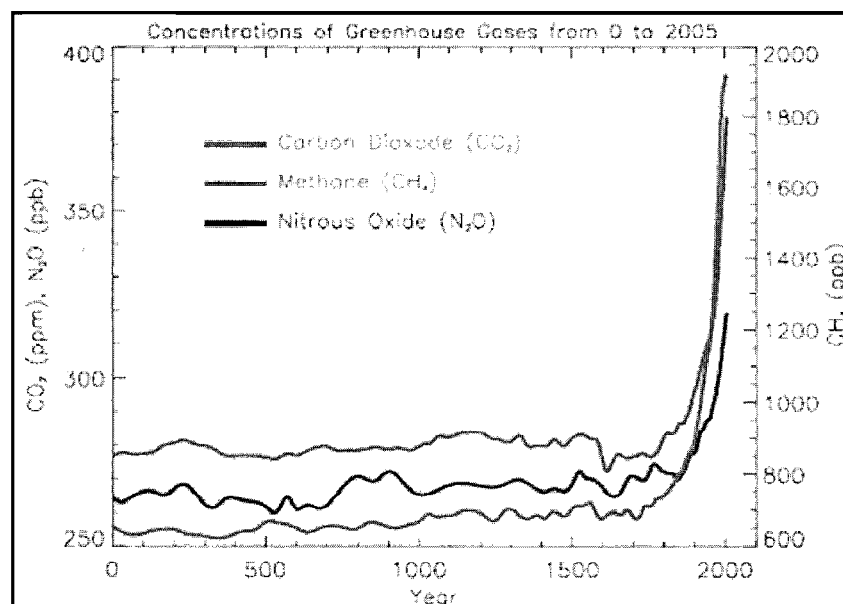


Figura 1. Concentración Global de GEI al año 2005 (IPCC, 2007)

Actualmente la emisión global de CO₂ por combustibles fósiles se estima en 6 Gt C anuales y la deforestación emite 1.6 Gt C año⁻¹ a la atmósfera (Raison et al., 2001; Goudie, 2002; Munn, 2002). La deforestación contribuye con el 20% de las emisiones globales de CO₂ (IPCC, 2007). Los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero 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 calentamiento del planeta, es la captura de carbono en los reservorios forestales. El manejo sustentable de los bosques con estrategias de forestación y reforestación capturan CO₂ atmosférico (IPCC, 2000; Broadmeadow y Matthews, 2003). Entre 1980 y 1990 los bosques en el hemisferio norte capturaron 0.6 Gt C por año. De este carbono, 0.21 Gt C año⁻¹ fueron almacenadas en la biomasa, 0.15 Gt C año⁻¹ fueron acumuladas en la materia en descomposición, 0.13 Gt C año⁻¹ se almacenaron en los suelos forestales y 0.08 Gt C año⁻¹ en los productos forestales (Broadmeadow y Matthews, 2003).

2.1.2. El efecto invernadero

En la atmósfera actúan dos tipos de radiación, la luz visible originada por el sol y la radiación infrarroja emitida por la Tierra. El efecto invernadero se debe a que ciertos gases en la atmósfera permiten que gran parte de la radiación solar penetre hasta la superficie del planeta donde se absorbe y reemite parte de la radiación infrarroja. A mayor concentración de los GEI, menor es la cantidad de radiación infrarroja que la tierra emite libremente al espacio. Al aumentar la concentración de gases, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, elevando la temperatura superficial del planeta (Kojima, 1998; Munn, 2002). Se estima que el bióxido de carbono tiene una aportación del 71.5% en el efecto invernadero. Las actividades humanas han ocasionado un desequilibrio en la temperatura de la superficie terrestre. El uso de combustibles fósiles y el cambio en el uso del suelo son las principales fuentes de carbono a la atmósfera que están relacionadas con el cambio climático global (Dale, 1994; IPCC, 2000).

2.1.3. El ciclo del carbono y su balance

Un reservorio es un sistema que tiene la capacidad de acumular o liberar carbono. La cantidad de C se expresa en unidades de masa (toneladas de carbono- t C).

Un reservorio contiene capitales de carbono que se refieren a la cantidad absoluta del C contenido en un tiempo específico. Un reservorio puede comportarse como sumidero, el cual se define como un proceso de transferencia neta de CO₂ de la atmósfera a otro sistema, el gas absorbido es mayor que el liberado; pero también puede comportarse como fuente, si la cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera es mayor que el absorbido (IPCC, 2007).

El ciclo de 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 C es un elemento clave para la vida en la tierra y es intercambiado entre los grandes reservorios: atmósfera, biosfera, océanos y rocas sedimentarias (Figura 2) (Zhang y Justice, 2001; Bonan, 2002). El océano es un reservorio extenso 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 del gas; por ello, se han fomentado estrategias de captura de CO₂ en la biomasa con la finalidad de reducir el calentamiento global (Kirschbaum, 2001).

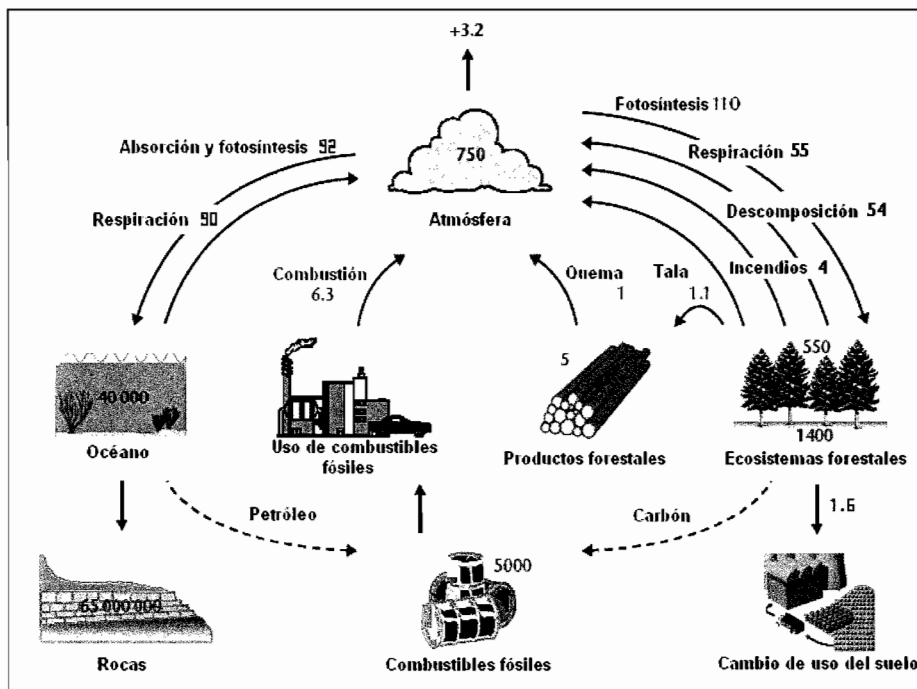


Figura 2. Reservas y flujos en el ciclo global del carbono

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 (1Gt C= 10¹⁵g). Los números junto a las flechas corresponden al flujo neto estimado en gigatoneladas de carbono por año (Gt C año⁻¹). Diagrama modificado de Kirschbaum (2001), Goudie (2002), Munn (2002) y Broadmeadow y Matthews (2003).

El ciclo del carbono inicia con la fijación del anhídrido carbónico atmosférico a través de los procesos de fotosíntesis realizados por la vegetación, 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 (Goudie, 2002; Munn, 2002). La actividad minera obtiene 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 C 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 (IPCC, 2000; Roy et al., 2001; Sedjo, 2001). El flujo de carbono es la transferencia de un contingente a otro y se expresa en unidades de masa por unidad de área y tiempo; por ejemplo, t C ha⁻¹ año⁻¹.

El balance de carbono está determinado por los intercambios entre los distintos reservorios. Sobre la superficie terrestre, la vegetación representa una reserva de 550 Gt C, el suelo tiene 1400 Gt C y la atmósfera contiene 750 Gt C en forma de CO₂. Durante la década de los noventa, el balance correspondió a 3.2 Gt C año⁻¹ (Cuadro 1) como resultado del cambio de uso de suelo que emitió 1.6 Gt C año⁻¹; de la quema de combustibles fósiles que liberó 6.3 Gt C año⁻¹ y como efecto del crecimiento de la vegetación que absorbió 3 Gt C año⁻¹ mientras que el océano secuestró 1.7 Gt C año⁻¹ (Broadmeadow y Matthews, 2003).

Cuadro 1. Balance de carbono

Contribución	Emisión (fuentes) Gt C año ⁻¹	Absorción (sumideros) Gt C año ⁻¹
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

2.1.4. Las políticas internacionales sobre cambio climático global

Debido al incremento de CO₂ en la atmósfera y sus efectos en el cambio climático, el tema de reducción de emisiones de carbono constituye un punto importante en las negociaciones internacionales sobre la mitigación del calentamiento global. En 1997 se firma el Protocolo de Kyoto (PK). Este es un acuerdo entre 41 países que tiene la finalidad de reducir las emisiones de GEI en 5.2% por debajo de los niveles registrados en 1990, esta reducción debe ser lograda en el período 2008-2012 mediante la disminución del consumo de combustibles fósiles y mecanismos que involucren la captura de carbono a través de actividades forestales y el cambio de uso del suelo.

La absorción neta efectiva de GEI por los sumideros es la suma de las variaciones verificables del carbono almacenado en los reservorios que pueden atribuirse a la actividad de los proyectos de forestación o reforestación. 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 GEI. El IPCC reconoce que los sumideros forestales tienen un rol importante en la reducción del CO₂ atmosférico y por lo tanto en la mitigación del cambio climático global (IPCC, 2003b; Cannell, 2004).

El PK otorga certificados de reducción de emisiones (CERs) a los países industrializados que tienen actividades de aprovechamiento forestal y consideran la captura de CO₂ en sus inventarios de GEI. No obstante, los países en vías de desarrollo únicamente pueden adquirir CERs con actividades de forestación y reforestación (UNFCCC, 2007). Se proponen tres mecanismos que permiten a los países industrializados facilitar sus metas de reducción: el Comercio de Emisiones (comercio de permisos de emisión entre países desarrollados); la Implementación Conjunta (transferencia de permisos de emisiones con proyectos de reducción); y 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 forestales para la remoción de CO₂ de la atmósfera; y proyectos de energía, para la reducción de emisiones de GEI, en países en vías de desarrollo. Este mecanismo otorga externalidades positivas (transferencia de

tecnología e impactos socioeconómicos y ambientales locales) pero es muy restrictivo pues sólo admite actividades de forestación-reforestación, excluyendo actividades de aprovechamiento forestal (Argüello, 2006; UNFCCC, 2007):

Los créditos de carbono constituyen un instrumento transferible y convertible a través del cual, una organización obtiene beneficios financieros por la reducción de emisiones. A la compra y venta de estos créditos se le denomina comercio de carbono (IPCC, 2007; Broadmeadow y Matthews, 2003). El pago por captura de C se expresa en dólares por tonelada de CO₂ capturada. Puesto que son diversos los factores que afectan la cantidad de C capturado, existe un amplio intervalo en el costo que va de \$1 a \$90 dólares por tonelada (Sedjo, 2001; Stavins & Richards, 2005).

El PK no considera que los ecosistemas forestales puedan convertirse en fuentes de carbono cuando son talados y, por lo tanto, no ofrece incentivos para disminuir la deforestación a pesar de que ésta ocupa el segundo lugar de emisión de CO₂ a nivel mundial. No obstante, en el año 2005 algunos países propusieron incluir ésta opción para futuros acuerdos y en la sesión 11 de la Conferencia de las Partes (CoP11) en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), se estableció un proceso de revisión científica, técnica y metodológica para considerar una nueva política a partir del año 2012, en la que se proporcione financiamiento a países en vías de desarrollo para reducir la deforestación y las consecuentes emisiones de CO₂ (Skutsch et al., 2007).

El programa "Kyoto: Think Global, Act Local" diseñó una política denominada "Reduced Emissions from Deforestation and Degradation in Developing Countries" (REDD). En diciembre de 2007 ésta política fue discutida durante la sesión 13 de la Conferencia de las Partes en UNFCCC y pretende ser aplicada una vez que concluya el período del Protocolo de Kyoto, pero aún existen aspectos conceptuales, metodológicos y económicos que deben ser bien definidos para diciembre del año 2009 en Copenhague, durante la sesión 15 de la CoP-UNFCCC (Skutsch & Trines, 2008). La política REDD plantea incentivar a los países en vías de desarrollo para estabilizar y posteriormente, reducir sus tasas de deforestación y perturbación con la finalidad de mantener los reservorios en buen estado y reducir las emisiones de CO₂. A diferencia del Protocolo de Kyoto, REDD si toma en cuenta el potencial de las actividades de aprovechamiento forestal,

principalmente el comunitario, para la captura de C en países en vías de desarrollo. REDD reconoce que el manejo sustentable favorece la regeneración de los bosques perturbados, detiene la tala ilegal y contribuye a equilibrar las concentraciones de CO₂ en la atmósfera; además asegura la disponibilidad de bienes y servicios para la población en el futuro (Murdiyarsa & Skutsch, 2006; Holopainen & Wit, 2008).

2.2. La emisión de carbono y las políticas de mitigación en México

2.2.1. La emisión y captura de carbono

México firmó el Protocolo de Kyoto en 1997 y lo ratificó en septiembre de 2000. La contribución histórica del país en la liberación de CO₂ durante el periodo 1950-2000, lo ubicó en la posición número 15 por emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles, y en la posición 16 por deforestación a nivel mundial. En el mismo periodo un tercio de las emisiones provinieron de la destrucción de bosques y selvas.

En el año 2000, México ocupaba el 13° lugar a nivel mundial dentro de los 25 países con mayor emisión de GEI y se estimó que las emisiones de nuestro país contribuyeron con el 1.51% del total global. En ese año se emitieron 622.6 Mt CO₂, lo que correspondió a 6.40 toneladas per cápita, cifra muy cercana al promedio mundial de 6.55 toneladas emitidas por habitante. En el Inventario Nacional de Emisiones se calcularon 643.2 millones de t CO₂ para el año 2002, lo que representó una emisión per cápita de 6.44 t CO₂ (CICC, 2007). De seguir las tendencias actuales, las emisiones del país podrían aumentar 50% para el año 2010 (Masera, 2006).

Del total de carbono liberado en el año 2000, 68% de las emisiones fueron producto del uso de combustibles fósiles y 32% del cambio de uso del suelo. El cambio de uso del suelo en México es la segunda fuente de gases de efecto invernadero. Se calcula que las emisiones de CO₂ por deforestación varían entre 51.4 y 71.0 Mt C año⁻¹ (Masera, 1995; De Jong et al., 2000). En el año 2000, el sector forestal emitió tres veces más carbono (161,422 t C año⁻¹) que el sector agropecuario (55,674 t C año⁻¹); sin embargo, se proyectó que el sector forestal

reduciría en 33% la emisión anual de C durante el periodo 1990-2010, pues pasaría de liberar 229 millones de t C a 153 millones de t C (Figura 3) (INE-SEMARNAT, 2001).

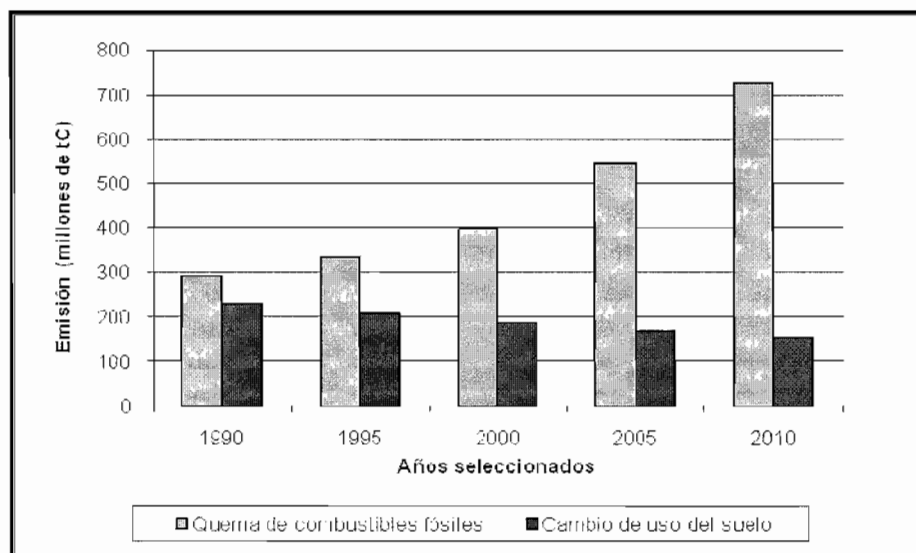


Figura 3. Emisiones de C al año 2010 en México (INE-SEMARNAT, 2001)

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 48.5% del potencial total (Cuadro 2) (INE-SEMARNAT, 2001).

Cuadro 2. 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.

Las opciones de mitigación de CO₂ en el sector forestal consisten en alargar los periodos de rotación de las plantaciones, restaurar los ecosistemas y promover el manejo sustentable, la agrosilvicultura y la bioenergía. Con base en estas

opciones se han creado escenarios de almacenamiento de C y se reporta que para el año 2012 el potencial de mitigación será de 593 millones de t C mientras que para el año 2030 será de 1790 millones de t C (Cuadro 3) (Sathaye et al., 2001).

Cuadro 3. Potencial de mitigación del sector forestal (millones de t C)

	México	2000	2012	2030
Línea base		23397	22927	22586
Escenario		23397	23520	24376
Incremento		0	593	1790

En México el manejo de las áreas naturales protegidas y los bosques naturales son algunas 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 una captura de 30 a 170 tC ha⁻¹ mientras que la reforestación secuestra entre 35 y 79 t C ha⁻¹. El manejo forestal tiene un potencial de captura neta unitaria de 98 a 134 t C ha⁻¹. Las plantaciones comerciales para la obtención de pulpa capturan entre 70 y 100 t C ha⁻¹ y los sistemas agroforestales secuestran entre 40 y 75 t C ha⁻¹ (Masera, 1995; Ordóñez, 1999).

2.2.2. La política nacional de mitigación de CO₂

Existen tres opciones básicas en el sector forestal: (1) conservación del C fijado en la vegetación, (2) incremento en la captura de C a través de reforestación y forestación, y (3) sustitución de emisiones derivadas del uso de combustibles fósiles. La conservación consiste en evitar las emisiones de C preservando las áreas naturales protegidas, fomentando el manejo sostenible y reduciendo la ocurrencia de incendios. La reforestación y forestación consiste en recuperar áreas degradadas mediante la protección de cuencas, la reforestación urbana, la restauración para fines de subsistencia, el desarrollo de plantaciones comerciales para madera, pulpa para papel, hule y plantaciones energéticas (producción de leña y generación de electricidad) y sistemas agroforestales. La sustitución consiste en cambiar los productos industriales por productos de madera y en la

sustitución de combustibles fósiles por combustibles renovables como leña, carbón vegetal y biogás (de Jong et al., 2004).

Según Masera (1995), la captura de C en la vegetación varía de acuerdo a las opciones de mitigación aplicadas. Una opción de mitigación es cualquier acción que dé como resultado una reducción del incremento neto en las emisiones de CO₂ de un área determinada (Cuadro 4).

Cuadro 4. Captura de carbono por opción de mitigación forestal

Opción	Tipo de vegetación	Captura neta (t c ha ⁻¹)
Conservación	B. pino	50-86
	B. pino-encino	33-69
Manejo forestal	Bosques templados	98-134
Plantación comercial	Pino	97-101
Reforestación	B. pino	75-79
	B. pino-encino	35-66
Sistemas Agroforestales		43-68

En el año 2005, se creó la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), como órgano federal responsable de formular políticas públicas y estrategias de mitigación y adaptación (CICC, 2007). En México, el 28 de diciembre de 2007 fue publicado en el Diario Oficial de la Federación, un acuerdo por el que se expiden las reglas de operación del programa Pro-Árbol de la Comisión Nacional Forestal. El documento define las normas y procedimientos para la operación, asignación y ejecución de apoyos federales. Dentro de la categoría de apoyo dirigida a la Conservación y Restauración Forestal existe la subcategoría de Servicios Ambientales que contempla en particular, el desarrollo de la idea de proyecto de captura de carbono. El pago no se dirige al servicio ambiental como tal, sino a la asistencia técnica para apoyar el desarrollo del proyecto. La superficie mínima requerida es de 500 ha y el monto de apoyo varía de acuerdo al número de hectáreas de 2 950 a 4 150 smvdf. Las áreas propuestas deben cumplir con los criterios de elegibilidad de terrenos establecidos por el Mecanismo de Desarrollo Limpio, es decir, presentar una condición de no-bosque al 31 de diciembre de 1989. Sólo se aceptan las actividades de forestación y reforestación con el propósito de establecer bosques, conforme a los parámetros nacionales definidos

para tal efecto por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (SEMARNAT, 2007).

2.3. Los reservorios forestales de carbono

2.3.1. Los bosques templados: sumideros de carbono

Los bosques son importantes en los aspectos socioeconómico, ambiental y biológico porque proporcionan diversos bienes y servicios, por ejemplo, la regulación del clima, la preservación biológica, la estabilización y el desarrollo de los suelos, la conservación del ciclo hidrológico, la regulación de las concentraciones de gases de efecto invernadero y el almacenamiento de importantes cantidades de carbono (INE-SEMARNAT, 2001; Bonan, 2002). A nivel global, los ecosistemas terrestres (1950 Gt C) almacenan dos veces más carbono que la atmósfera (750 Gt C). Algunos estudios realizados en bosques templados reportan que éstos absorben entre 1.5 y 3.5 Gt C año⁻¹ (Bonan, 2002; Stavins & Richards, 2005).

Los bosques tienen un rol importante en la captura de CO₂ atmosférico y en la regulación del clima (Koch & Mooney, 1996; IPCC, 2000). Los bosques participan en el ciclo global del carbono a través de los procesos de fotosíntesis, respiración y descomposición de la materia orgánica (Roy, 2001; Broadmeadow y Matthews, 2003). La deforestación y el cambio de uso de suelo a nivel mundial contribuyen significativamente con la liberación de CO₂ (Kirschbaum, 2001; Raison et al., 2001; Munn, 2002). Los bosques contienen entre 20 y 100 veces más carbono por unidad de área que las tierras agrícolas que los substituyen (Dale, 1994). Los bosques maduros contienen mayor cantidad de biomasa y almacenan más C que los bosques jóvenes. Sin embargo, los bosques jóvenes tienen una tasa más alta de acumulación neta de este elemento. Del carbono total almacenado en los bosques templados aproximadamente dos tercios se encuentran en la materia orgánica del suelo y un tercio en la vegetación (Sedjo, 2001; Broadmeadow y Matthews, 2003).

El potencial de los ecosistemas en la captura de C se define por el tipo y la condición del hábitat, es decir, por la composición de especies, la edad, los procesos de producción, por factores ambientales (clima, litología, suelo,

geoforma, exposición, pendiente) y por el grado de perturbación (Terradas 2001; Zhang y Justice, 2001). Una forma de ampliar el efecto de captura de C es a través de la optimización del manejo forestal (Jandl, 2001):

1. Aumentar la superficie de bosques
2. Aumentar la densidad de carbono por medio de la densidad de árboles y selección de especies eficientes y
3. Aumentar la permanencia del C prolongando el tiempo de rotación.

El manejo forestal tiene la capacidad de reducir las emisiones de CO₂ convirtiéndose en una de las opciones de mitigación más importantes a mediano y largo plazos (Kirschbaum, 2001). Las prácticas que aumentan la producción de biomasa y evitan la erosión del suelo son efectivas para incrementar los sumideros de C (Vergara et al., 2004).

2.3.2. Los flujos de carbono en el bosque templado

En un bosque, el flujo neto de carbono es determinado por la diferencia entre el gas capturado durante el crecimiento de la vegetación y el liberado por la descomposición, la respiración, la deforestación y los incendios (Kirschbaum, 2001). El CO₂ atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. A través de éste proceso la vegetación absorbe 110 Gt C año⁻¹ a nivel global, mientras que libera 55 Gt C año⁻¹ mediante la respiración y 54 Gt C año⁻¹ por descomposición de la materia orgánica (Figura 4) (Broadmeadow y Matthews, 2003).

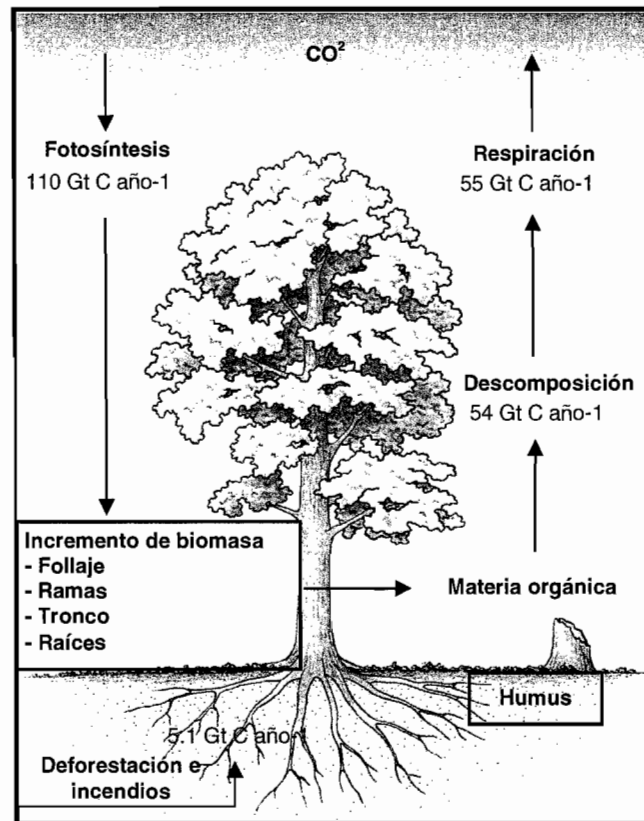


Figura 4. Reservas y flujos de carbono en un ecosistema forestal

Diagrama modificado de Broadmeadow y Matthews (2003)

El C almacenado permite la creación de biomasa y el desarrollo de raíces, ramas, hojas y tronco (Roy et al., 2001; Bonan, 2002). Los componentes de la copa de los árboles aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse dan origen al humus, ésta transformación regresa nuevamente CO_2 a la atmósfera. La madera muerta y el mantillo aportan C al suelo. La respiración y la descomposición son los dos emisores naturales de los bosques, éstos suman un total de $109 \text{ Gt C año}^{-1}$ por lo que se puede decir que, existe un balance entre el C absorbido y emitido.

No obstante, el equilibrio de CO_2 entre la atmósfera y la vegetación se rompe cuando hay intensas perturbaciones. Se estima que los incendios forestales en todo el planeta emiten 4 Gt C año^{-1} , la quema de biomasa como biocombustible emite 1 Gt C año^{-1} , la deforestación y el cambio de uso de suelo emiten $2.7 \text{ Gt C año}^{-1}$ (Kirschbaum, 2001; Goudie, 2002).

2.3.3. Los reservorios de carbono en el bosque templado

De acuerdo a diversos estudios sobre el contenido de carbono en los bosques templados del mundo, se obtuvieron los valores promedio para cada componente. El contenido de C en la biomasa aérea resultó de 165 t C ha⁻¹, en la biomasa subterránea fue de 59 t C ha⁻¹, en el mantillo 3 t C ha⁻¹ y en el suelo correspondió a 145 t C ha⁻¹. El contenido total de C en los ecosistemas templados resultó de 260 t C ha⁻¹ y el promedio obtenido para el contenido de C en bosques secundarios fue dos veces menor (118 t C ha⁻¹). Para los bosques de pino se obtuvo un promedio de 236 t C ha⁻¹ y para bosques de encino 182 t C ha⁻¹ (Anexos 1 y 2).

Se han realizado diversos estudios de caso en México sobre el contenido de carbono en los ecosistemas templados. En ellos se reportó un total que varía entre 97 y 215 t C ha⁻¹. Las estimaciones de carbono reportadas para los suelos forestales oscilan entre 31 y 120 t C ha⁻¹, con un promedio de 70 t C ha⁻¹. El promedio calculado para el contenido de C en bosques de oyamel corresponde a 105 t C ha⁻¹, en bosques mixtos corresponde a 111 t C ha⁻¹ y en bosques de pino y encino resultó de 58 y 37 t C ha⁻¹ respectivamente (Anexo 3).

2.3.3.1. Biomasa

La biomasa es el material orgánico sobre y bajo el suelo. Un kilogramo de materia vegetal seco equivale aproximadamente a 500 g de carbono y contiene unos 17,000 kJ de energía. La biomasa aérea incluye tallos, hojas, ramas, semillas y follaje, mientras que la biomasa subterránea está conformada por las raíces (Terradas, 2001; IPCC, 2003b). La densidad de biomasa se puede expresar en cantidad de materia seca por unidad de superficie. Debido a que los bosques contienen el 50% de carbono en la biomasa, su destrucción representa una fuente potencial de CO₂ (Brown, 1997).

La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere un muestreo destructivo directo o estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias respectivas (Brown, 1997; Etchevers et al., 2005). El segundo caso es más práctico cuando se desea estimar la biomasa aérea de los árboles. Para ello, se debe contar con funciones que estimen la

biomasa con base en el tamaño y dimensiones de los árboles; es decir, funciones matemáticas basadas en las relaciones que ocurren entre los órganos de un individuo. Las relaciones entre las dimensiones del fuste y la cantidad de biomasa se han empleado también para estimar el carbono presente en diferentes tipos de vegetación (Acosta et al., 2002b).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático reportó en su publicación "Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura", que los bosques mixtos (coníferas-latifoliadas) contienen en la biomasa aérea un promedio de 70 t C ha^{-1} dentro de un intervalo de $34\text{-}109 \text{ t C ha}^{-1}$; los bosques de coníferas tienen un promedio de 63 t C ha^{-1} ($20.5\text{-}137.5 \text{ t C ha}^{-1}$) y los bosques de latifoliadas presentan en promedio 66 t C ha^{-1} ($26.5\text{-}102.5 \text{ t C ha}^{-1}$) (IPCC, 2003b). El contenido de C en la biomasa aérea obtenido a partir de diversos estudios realizados en bosques de pino y de encino correspondió a 149 y 83 t C ha^{-1} respectivamente.

La medición de biomasa subterránea consume mucho tiempo y es muy costosa, aún cuando se consideran niveles moderados de precisión, debido a la amplia variación en la forma en la que se distribuyen las raíces en el suelo. Cuando no se tienen mediciones directas de biomasa subterránea, se utilizan estimaciones que corresponden a cierto porcentaje con respecto a la biomasa aérea. Algunos cálculos reportados mencionan una proporción de 5:1 entre biomasa aérea y subterránea. Otras estimaciones sugieren porcentajes que varían entre 10 y 50% (MacDicken, 1997; IPCC, 2003b). El promedio de carbono almacenado en la biomasa subterránea de bosques de pino es de 45 t C ha^{-1} y en bosques de encino corresponde a 85 t C ha^{-1} .

2.3.3.2. Mantillo

El mantillo (hojarasca) es la capa de residuos vegetales en la parte superior del suelo, rica en materiales que tienen diversos grados de descomposición, pero donde las estructuras celulares aún son visibles. Es preciso diferenciar el mantillo de la capa de material humificado, donde los residuos han sido sujetos a un proceso de descomposición en el que no es posible diferenciar restos estructurales de órganos y el residuo carbonáceo ha establecido una asociación estrecha con el suelo mineral y no es posible separarlos (Etchevers et al., 2005).

En los bosques templados el C en enlaces débiles, presente en la hojarasca, es respirado en un periodo de ocho años (García y Masera, 2004). El promedio de carbono almacenado en el mantillo de bosques de coníferas es de 26 t C ha⁻¹ dentro de un intervalo de 10 a 48 t C ha⁻¹ y el C en el mantillo de bosques latifoliados corresponde a 16 t C ha⁻¹ (5-31 t C ha⁻¹) (IPCC, 2003b).

2.3.3.3. Suelo

El carbono orgánico en el suelo (COS) se forma a partir de la intemperización de la materia orgánica sobre suelos minerales y orgánicos, a una profundidad específica aplicada coherentemente mediante las series cronológicas. La materia orgánica del suelo es un complejo de partículas y de moléculas orgánicas amorfas de gran tamaño resultantes de la humidificación del detritus sobre y bajo el suelo, e incorporadas como partículas libres o ligadas a partículas de suelos minerales. Contiene ácidos orgánicos, microorganismos muertos y vivos, y sustancias sintetizadas a partir de sus productos de descomposición (IPCC, 2003b).

La actividad de los macro y microorganismos en la hojarasca permite la incorporación del C al suelo, con mayor tasa de acumulación en la parte superior del perfil. La materia orgánica (MO) se estabiliza en el suelo a través de los siguientes mecanismos: resistencia bioquímica y estabilidad química o protección física. La resistencia química se debe a la bioquímica del substrato (lignina y melanina) y no permite a la flora y fauna del suelo descomponer la MO. La estabilidad química se debe a fuertes enlaces químicos entre la MO del suelo y los minerales en el suelo. En este caso, cuando las partículas de MO se incorporan a los agregados, las bacterias no tienen acceso a ella y es físicamente protegida contra la descomposición. La materia orgánica del suelo (MOS) se clasifica en 2 grupos: húmico y no húmico. Las sustancias húmicas representan del 60 al 80% del total de la MOS y son más resistentes a la acción de los microorganismos que las sustancias no húmicas que representan del 20 al 40% de la MOS (FAO, 2000). El carbono del suelo tiene distintos tiempos medios de residencia dependiendo de la composición bioquímica (Figura 5). Por ejemplo, la fracción lábil tiene un tiempo de residencia de 0.87 años, la lignina tiene 2.5 años, el humus es un poco más resistente a la descomposición y su tiempo de residencia es de 25 años y la fracción estable es químicamente resistente y está físicamente protegida por lo que su tiempo de residencia se prolonga a miles de años (FAO, 2002).

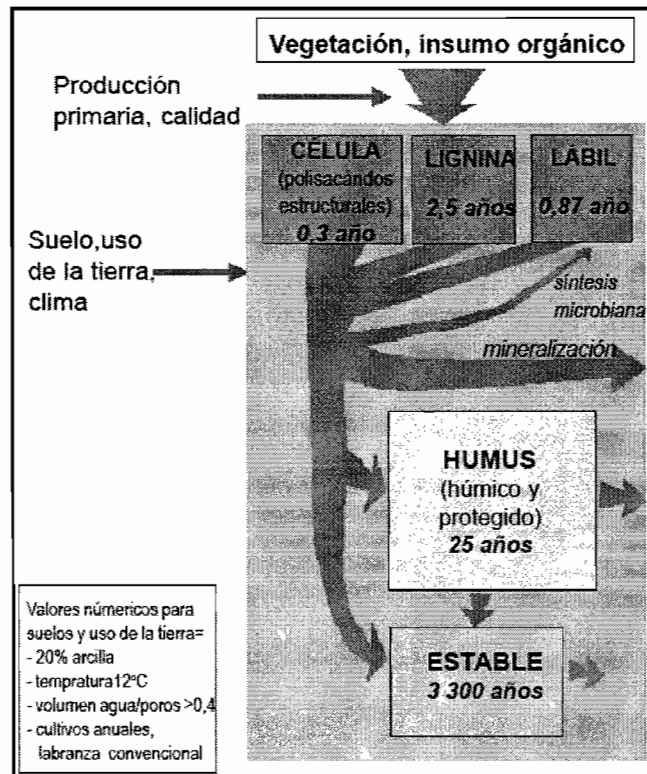


Figura 5. Modelo de la dinámica de C en el suelo (Balesdent et al., 2000 en FAO, 2002)

El suelo tiene la capacidad de almacenar C por largos periodos de tiempo, por ello, la captura en bosques se puede optimizar aumentando su contenido en los suelos. La captura potencial depende de factores definidos como: litología, composición mineral del suelo, textura, profundidad, densidad aparente, pedregosidad y aireación (FAO, 2000). La textura fina del suelo permite acumular más C y los periodos de residencia más largos están asociados con arcillas y limos porque están mejor agregados y protegen al suelo de la descomposición microbiana. En capas arenosas y con arcilla caolinítica faltan sitios de absorción y es imposible la estabilización del C, además influyen factores como la oferta de CO₂, la disponibilidad de agua y de nutrientes (Jandl, 2001). La magnitud potencial de C en el suelo es controlada por factores limitantes como: productividad neta primaria de las plantas, distribución de la biomasa aérea y subterránea y efectos directos del clima en los procesos del suelo (principalmente temperatura y precipitación). La cantidad actual de C en el suelo está determinada por factores de reducción por ejemplo, las pérdidas directas por erosión y las causadas por el manejo (FAO, 2000; Vergara et al., 2004).

El tipo de biomasa aérea determina la cantidad de C que se adiciona al suelo y la distribución de la biomasa subterránea afecta la distribución vertical del carbono en el perfil. La calidad del C agregado al suelo, caracterizado por el contenido de lignina, es otro importante control de la tasa de descomposición y contribuye a observar diferencias entre el COS de distintos ecosistemas. La biomasa forestal y la baja tasa de descomposición incrementan el COS acumulado en el suelo (FAO, 2000; Jandl, 2001).

Se ha reportado que aproximadamente el 50% del COS se localiza en los primeros 20 cm del suelo en los ecosistemas forestales. El porcentaje de COS almacenado en los primeros 20 cm del suelo bajo un bosque de coníferas corresponde a 47% mientras que bajo un bosque de latifoliadas se almacena 52% del COS (Jobbágy & Jackson, 2000). Los factores que reducen las reservas de C en el suelo son la deforestación y los incendios ya que al eliminar la vegetación también se elimina la aportación de materia orgánica al suelo, por otra parte, la superficie queda expuesta, se erosiona y el proceso de oxidación de los residuos orgánicos libera CO_2 convirtiendo al suelo en una fuente de C (Acosta et al., 2001; Bravo, 2007). Proyectos de forestación y reforestación contribuyen en la captura de grandes cantidades de carbono en suelos de uso agrícola. Se ha estimado que estas actividades pueden secuestrar en 30 años un promedio de 50 t C ha^{-1} . Por otro lado, cuando se presenta la deforestación los cambios en el contenido de carbono en el suelo se observan después de 7 a 11 años (García y Masera, 2004).

El IPCC (2003b) reporta que los suelos volcánicos de regiones templadas contienen entre 70 y 130 t C ha^{-1} dentro de los primeros 30 cm de profundidad, mientras que, la FAO-UNESCO (1974) reporta que los Andosoles contienen 11.4 t C ha^{-1} a la misma profundidad y, que entre los 0 y 200 cm almacenan 31 t C ha^{-1} . Los contenidos de carbono también son importantes en los Umbrisoles (hasta 200 t C ha^{-1}) (Bravo, 2007).

El contenido de COS promedio en los bosques de coníferas y latifoliadas en México corresponde a 65.5 t C ha^{-1} , que equivalen a 2.86 Gt C y constituyen 27% del total de C en el país (10.5 Gt C). Los suelos de uso forestal contienen en promedio 2 veces más carbono que los suelos agrícolas (Segura et al., 2005). De

acuerdo al estudio de Cruz et al. (2007), los ecosistemas localizados entre Michoacán y el Estado de México, contienen entre 150 y 1 600 t C ha⁻¹ (Figura 6) mientras que el estudio de Segura et al. (2005) reporta que en esta región hay entre 50 y 100 t C ha⁻¹ y que los suelos del Estado de México tienen un promedio de 53 t C ha⁻¹ (Figura 7).

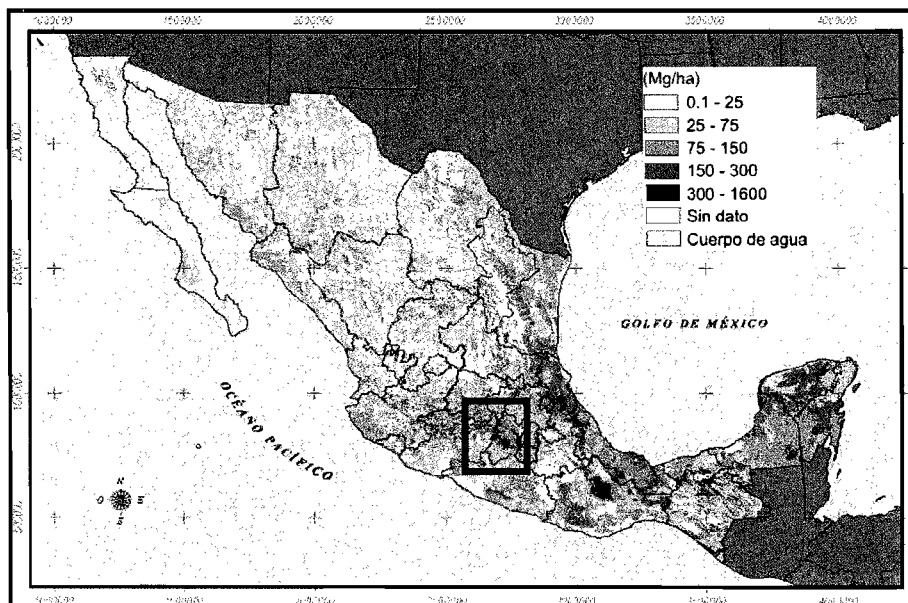


Figura 6. Carbono orgánico en los suelos de México (Cruz et al., 2007)

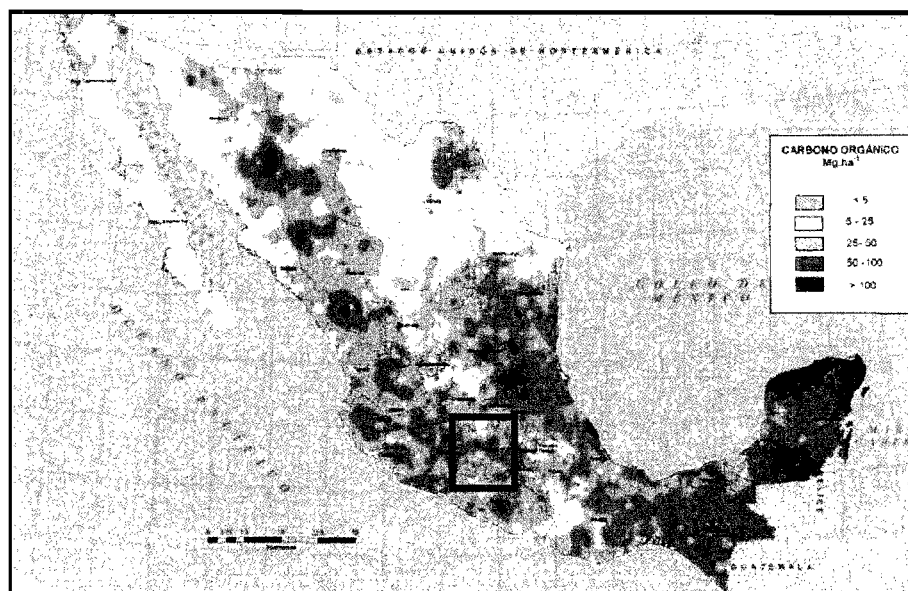


Figura 7. Contenido de carbono orgánico: 0-20cm de profundidad (Segura et al., 2005)

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Localización

La comunidad Indígena San Juan Xoconusco (SJX) pertenece al municipio Donato Guerra del Estado de México. Tiene una superficie de 1 974 hectáreas, con base en la cartografía de predios utilizada para definir el área del decreto de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), la cual fue proporcionada por WWF (WWF, 2009). Se ubica entre las coordenadas 19° 18' 36" - 19° 23' 29" de latitud norte y 100° 13' 22"- 100° 16' 16" de longitud oeste. Colinda al norte con la comunidad indígena Nicolás Romero del estado de Michoacán, al oriente con las propiedades privadas de Los Zaucos y Fracción Corral Viejo y al poniente con el ejido El Capulín del Estado de México. Una parte de la superficie forestal de SJX fue decretada como RBMM en noviembre del año 2000 (Diario Oficial de la Federación, 2000). Los bienes comunales abarcan 168 ha dentro de la zona núcleo de la RBMM y 1 806 ha en la zona de amortiguamiento (Figura 8).

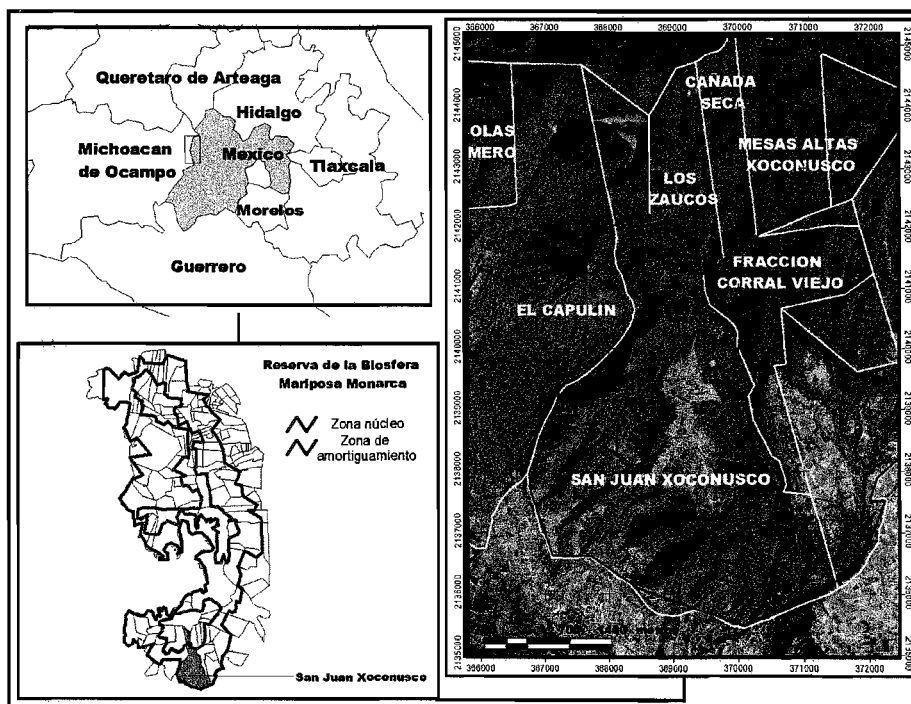


Figura 8. Localización de la comunidad San Juan Xoconusco

3.1.2. Características físico-geográficas

3.1.2.1. Relieve e hidrografía

San Juan Xoconusco se encuentra en el ambiente morfogenético denominado Sistema Volcánico Transversal y dentro de la Sierra Mil Cumbres (Bocco et al., 1999). El intervalo altitudinal comprende desde los 2 100 hasta los 3 400 m (Figura 9). Las pendientes varían entre 0° y 45° pero el intervalo más frecuente va de 5 a 23°. El paisaje geomorfológico está formado por un conjunto de domos, lomeríos, altiplanicies y valles. La principal forma del relieve es el Cerro Pelón con 3 400 m La comunidad se encuentra dentro de la región hidrológica número 18, la cual corresponde al Río Balsas. Dentro del territorio se identifican 7.5 km de cauces intermitentes y el arroyo Juan Morán. El arroyo Peña Blanca se localiza al W de SJX colindado con El Capulín y al E se encuentra la Barranca Honda colindando con Fracción Corral Viejo. (INEGI, 1981; Secretaria de Desarrollo Agropecuario, 1996).



Figura 9. Mapa Altimétrico

3.1.2.2. Litología

La litología de San Juan Xoconusco pertenece al complejo volcánico de Zitácuaro y está constituida por cinco unidades derivadas de tres eventos eruptivos. El primer episodio eruptivo ocurrió hace 12 Ma y formó la unidad Barranca el Agur que se caracteriza por la intrusión de domos dacíticos y se localiza al W y S de SJX. El segundo evento aconteció hace 5 Ma, creó la unidad San Jerónimo caracterizada por la intrusión de domos dacíticos y flujos de lava andesítica que se localizan al N de SJX. Hace 5 Ma, también se formaron El Candelero (domos dacíticos) y La Soledad (depósito de flujos piroclásticos producidos por San Jerónimo). El Candelero se ubica en el centro de SJX y La Soledad se ubica al SE. El tercer evento sucedió hace 0.6 Ma y se formó la unidad Guacamaya que consiste en domos dacíticos monogenéticos, éstos se localizan al NW de la comunidad (Figura 10). La Barranca el Agur tiene altas concentraciones de Al_2O_3 , Na_2O , K_2O y Rb. San Jerónimo y Guacamaya presentan mayor concentración de Na, K y Rb y La Soledad tiene más Al y Na (Capra et al., 1997).

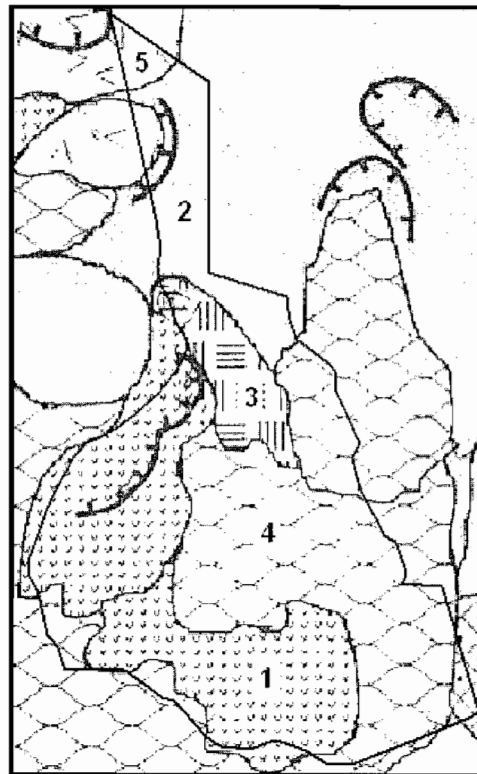


Figura 10. Unidades litológicas

Los números se refieren a las unidades geológicas. 1: Barranca el Agur, 2: San Jerónimo, 3: El Candelero, 4: La Soledad y 5: Guacamaya (Capra et al., 1997).

3.1.2.3. Suelos

La constitución litológica de la zona, el tipo de clima y los procesos de descomposición de la materia orgánica determinan la presencia de suelos tipo Andosol, además de Umbrisol y Luvisol aunque en menor proporción. El Andosol se localiza en la mayor parte del territorio de San Juan Xoconusco, son suelos derivados de la meteorización rápida de vidrios o eyecciones volcánicas que resulta en la acumulación de complejos órgano-minerales estables o minerales de bajo grado de ordenamiento como el alófano (WRB, 2007). Estos suelos tienen un perfil profundo, bien drenado, el color varía de negro a café oscuro, con pedregosidad entre 3% y 40%. Presentan textura franca y estructura predominantemente subangular en bloques con agregados que rompen en tamaño grueso a fino. La estabilidad de agregados varía entre baja y mediana. La porosidad varía de mediana a alta. La densidad de raíces es alta hasta los primeros 50 cm y su penetrabilidad es buena. La capacidad de retención agua y la capacidad de campo son altas. La conductividad hidráulica es alta. Tienen pH de moderado a ligeramente ácido originado por la presencia de iones activos de aluminio y presentan un bajo grado de saturación de bases. La disponibilidad de nitrógeno y fósforo son bajas. Estos suelos se erosionan fácilmente. El Umbrisol se localiza al norte de SJX en laderas a más de 2 900 m de altitud, tiene un horizonte superficial oscuro con baja saturación de bases y es susceptible a la erosión. El Luvisol se localiza al sur de SJX en laderas a menos de 2 400 msnm; presenta acumulación de arcilla en el subsuelo, es un suelo fértil y es moderadamente susceptible a la erosión (INEGI, 1981).

3.1.2.4. Clima

La temperatura media en Cerro Pelón varía de los 0°C a 14°C. Entre los 2 220 y 2 640 m de altitud la temperatura oscila entre los 10 y 13°C pero en altitudes mayores a 3 400 m la temperatura media varía entre 0 y 2°C (Ruíz, 2009). En el área de estudio se encuentran dos tipos de clima: C(w2)(w)b'(i') semifrío subhúmedo, con lluvias de verano, presente en altitudes mayores a 2 700 msnm, se localiza al norte de SJX. La oscilación térmica no supera los 5°C y la temperatura es de tipo Ganges. La precipitación oscila entre 1 300 y 1 600 mm. Y C(w2)(w)b'(i'), templado subhúmedo, con lluvias de verano. En altitudes entre 2 100 y 2 700 msnm, se localiza al sur de la comunidad. Tiene menos de 7° de

oscilación térmica anual. La precipitación media anual oscila entre 800 y 960 mm. El régimen pluviométrico es muy irregular, concentrando hasta el 90% de las precipitaciones en la mitad más húmeda del año (mayo-octubre) (INEGI, 1981; Giménez et al., 2003).

3.1.2.5. Vegetación y cubiertas del suelo

La vegetación está compuesta por bosques de coníferas, bosques mixtos y bosques de latifoliadas. El bosque de oyamel está constituido por una formación arbórea de *Abies religiosa* que se presenta entre altitudes de 2 700 y 3 500 msnm. Se encuentra acompañado por elementos de *Salix paradoxa* y *Cupressus lindleyi*, que pueden llegar a medir 8 y 25 m de altura, respectivamente. Este estrato tiene una cobertura promedio entre 50 y 75%, alcanzando densidades en torno a los 500 árboles por hectárea. En el bosque de oyamel el estrato arbustivo (1.5 a 3 m) tiene una cobertura promedio menor de 25%, donde las especies más frecuentes son *Senecio angulifolius*, *Cestrum thyrsoideum*, *Salvia fulgens*, *Fuchsia microphylla*, *Juniperus monticola* y *Symphoricarpus microphyllus*. El estrato herbáceo (menos de 75 cm) está dominado por *Acaena elongata*, *Lachemilla procumbens*, *Stellaria cuspidata*, *Senecio callosus*, *S. tolucanus*, *S. sanguisorbae*, entre muchas especies más, cubriendo aproximadamente entre el 50 y 75% de la superficie del suelo (Rzedowsky, 1994; Giménez de Azcárate et al., 2003).

El bosque de pino está constituido principalmente por *Pinus pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. oocarpa*, *P. leiophylla*, *P. hartwegii*, *P. montezumae*, *P. michoacana*, *P. rudis*, *P. ayacahuite* y *Cupressus lindleyi*, entre otras especies. Se encuentra en altitudes entre 2 400 y 3 300 msnm en suelos profundos o someros y en superficies rocosas. El bosque mixto está constituido por especies de *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae*, *Quercus laurina*, *Q. acutifolia*, *Q. castanea*, *Q. martinezii*, *Q. obtusata*, *Q. rugosa*, *Q. salicifolia*, *Q. crassifolia*, *Alnus jerullensis*, *Alnus arguta*, *Alnus firmifolia*, *Ternstroemi lineata*, *Salix paradoxa* y *Clethra mexicana*. El estrato arbustivo está constituido por *Cestrum thyrsoideum*, *Senecio angulifolius*, *Salvia spp*, *Eupatorium mairetianum*, *Fuchsia thymifolia*, *Baccharis conferta*, *Solanum brachystachys*, *Buddleia lanceolata*, *Muhlenbergia sp*, *Senecio calcarius*, *Stipa virescens* y *Stevia serrata*. El estrato herbáceo presenta especies dominantes como: *Stellaria cuspidata*, *Acaena elongata*, *Cirsium erhembergii*, *Arracacia rigida*, *Adiantum andicola*, *Galium aschembornii*, *Chimophylla umbelata*,

Smilax morannensis, *Rubus pringlei* y *Asplenium monantes* (Rzedowsky, 1994; Giménez de Azcárate et al., 2003).

La superficie forestal en la comunidad de San Juan Xoconusco abarca 1 481 ha, de las que 135 ha corresponden a bosque de oyamel y 1 346 ha pertenecen a bosque de pino-encino. Otras cubiertas del suelo ocupan 493 ha y corresponden a pastizal, arbustos secundarios, cultivos y asentamientos humanos (Figura 11). De acuerdo al cambio en las cubiertas del suelo en el periodo 1986-2006 (Ramírez et. al., 2007; Zubieta, 2007), se calculó una tasa de deforestación de 0.020% mientras que la tasa de recuperación fue de 0.012%.

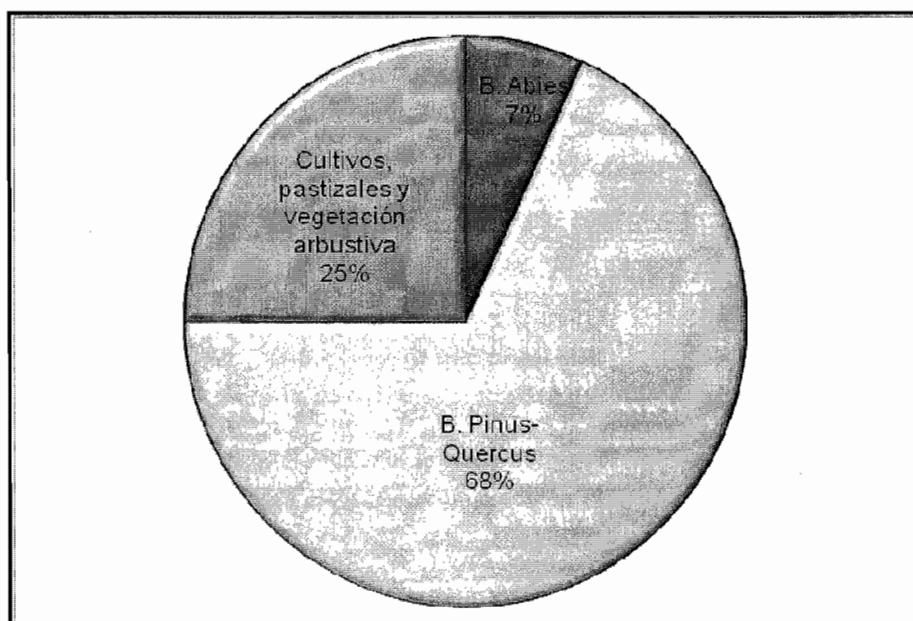


Figura 11. Porcentaje de la superficie ocupada por tipo de cubierta del suelo

3.1.3. Estructura socioeconómica

3.1.3.1. Población

Entre 1995 y el 2005 la población total de San Juan Xoconusco incrementó 21%. Actualmente la población de SJX representa el 9% del total en el municipio Donato Guerra. Hay 2662 habitantes, de los cuales, 51% (1353 hab.) pertenecen al género masculino y 49% (1309 hab.) al género femenino. La comunidad está conformada por población indígena mazahua. El 14% de la población es analfabeta. En la comunidad existen 566 viviendas habitadas con un promedio de cinco habitantes por vivienda. El 44% de la población no tiene acceso a seguridad social. El 25% de las viviendas no cuenta con agua potable mientras que el 33% no cuenta con drenaje (INEGI, 2005).

3.1.3.2. Actividades económicas

La mayor parte de la población se dedica a actividades económicas primarias. La agricultura se orienta al cultivo de avena forrajera, aguacate, durazno, trigo, cebada, hortalizas y plantas de ornato. La población se dedica a la ganadería como un complemento de ocupación y de ingreso familiar; los principales son el ganado bovino, porcino, ovino, equino, gallinas y también se practica la apicultura (Antonio, 1999). Existe un vivero que tiene una capacidad de producción anual de 800 mil plantas. El vivero genera 15 empleos permanentes y 30 empleos temporales, además genera utilidades para más de 250 comuneros (WWF, 2007). La infraestructura en vías de comunicación corresponde a 35.73 km de los cuales 8 km están pavimentados y 29.73 son brechas. En la superficie de SJX se tiene una densidad de caminos de 22 m ha⁻¹ (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 1996).

3.1.3.3. Manejo forestal

El aprovechamiento forestal se ha realizado desde 1986. La última autorización del programa de manejo forestal para el aprovechamiento persistente de recursos forestales maderables en el predio comunal fue del periodo 1996 a 2006. Esta actividad ocupó 639.93 hectáreas del territorio de las cuales, la superficie promedio anual aprovechada fue de 71.10 ha. El sistema de planeación utilizado fue el Sistema Integral de Manejo de Bosques y Aplicaciones Terrestres

(SIMBAT). De acuerdo al SIMBAT se definió el tratamiento silvícola denominado método de regeneración por selección individual. En éste método se efectúa la remoción del arbolado maduro con el objetivo de permitir la regeneración continua y mantener el estado inicial de las masas. En un manejo intensivo se extrae el arbolado de todas las edades y diámetros de sujetos mal conformados, enfermos y dañados con el fin de refinar la masa y mantener una cierta proporción entre todas las categorías diamétricas de acuerdo a las características de las especies y a la calidad de la estación (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 1996). El aprovechamiento se orienta a plantaciones comerciales y a la extracción de resina. Por otro lado, durante el 2007 se reforestó una superficie de 84 ha al sur de SJX de acuerdo con las especificaciones del programa de manejo (WWF, 2007).

3.1.3.4. Problemática de manejo del suelo

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca fue decretada en el año 2000. En esta región existen serios problemas sociales y económicos que tienen que ver con la marginación histórica de la población y con conflictos por la delimitación del territorio y el uso de los recursos naturales. La población no está de acuerdo con la forma en la que se administra la Reserva y ha manifestado que no se considera su opinión para la creación de los planes de desarrollo sustentable.

A los dueños de los bosques no se les permite hacer uso de los recursos forestales dentro de la zona núcleo. Los habitantes han demostrado su inconformidad con la imposición del decreto a través de la provocación de incendios, de la tala ilegal y del cambio de uso de suelo forestal a agropecuario. Las consecuencias de lo anterior son: la pérdida de biodiversidad, la erosión de suelos, la reducción de mantos acuíferos y la fragmentación tanto forestal como social; lo que genera un círculo vicioso de mal manejo de recursos naturales y mala calidad de vida de la población. La escasez de empleos y los altos niveles de pobreza en la región han propiciado que los pobladores ejerzan una fuerte presión sobre los recursos forestales, provocando la disminución de la superficie arbolada. Otros problemas son el sobrepastoreo y el turismo desorganizado.

3.2. MÉTODO

3.2.1. Definición de los sitios de muestreo

En esta investigación se realizó un muestreo aleatorio estratificado y para ello, se integró una base de datos climáticos, geológicos, geomorfológicos, edafológicos y de vegetación que se utilizaron para la delimitación de unidades de muestreo relativamente homogéneas (Cuadro 5) (Schlegel et al., 2001; Bautista et al. 2004).

Se definieron seis estratos considerando principalmente dos tipos de vegetación (bosque de oyamel y bosque de pino-encino) y tres condiciones de manejo (bosque conservado, bosque aprovechado y bosque perturbado). Las características físico-geográficas de cada estrato se describirán en el apartado de distribución espacial. Los tratamientos evaluados fueron los siguientes:

1. **Bosque de oyamel conservado.** Superficie forestal localizada dentro de la zona núcleo de la RBMM y que se encuentra bajo restricción de aprovechamiento desde 1986. Este bosque no ha sido perturbado desde hace 23 años.
2. **Bosque de oyamel aprovechado** (hace 20 años). De acuerdo con el programa de manejo, los antecedentes de aprovechamiento en la comunidad corresponden al año 1989. Se extrajeron 4 620 m³ v.t.a. de oyamel, 6 789 m³ v.t.a. de cedro y 1 024 m³ v.t.a. de pino (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 1996).
3. **Bosque de oyamel perturbado.** Superficie forestal localizada dentro de la zona núcleo de la RBMM. Presenta tala clandestina que se ha incrementado desde el 2004.
4. **Bosque de pino-encino conservado.** Superficie forestal ubicada dentro de las zonas núcleo y amortiguamiento de la RBMM. Una parte se encuentra bajo restricción de aprovechamiento desde 1986.

5. **Bosque de pino-encino aprovechado** (hace 10 años). De acuerdo con el programa de manejo, el periodo de aprovechamiento fue entre 1996 y 2006. Se obtuvieron 25 729 m³ v.t.a. de pino, 1 790 m³ v.t.a. de oyamel, 2 845 m³ v.t.a. de encino y 1 424 m³ v.t.a. de otras hojosas. El tratamiento silvícola utilizado fue el método de regeneración por selección individual (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 1996).

6. **Bosque de pino-encino perturbado**. Superficie forestal localizada dentro de la zona de amortiguamiento de la RBMM. Presenta tala clandestina que se ha incrementado desde el 2000. Una superficie de 300 ha al sureste de la comunidad presentó un incendio hace cuatro años.

Dentro de cada estrato se seleccionaron cinco parcelas de forma independiente a manera de réplicas para realizar el muestreo de vegetación, mantillo y suelo. El número total de sitios muestreados fueron treinta (Figura 12).

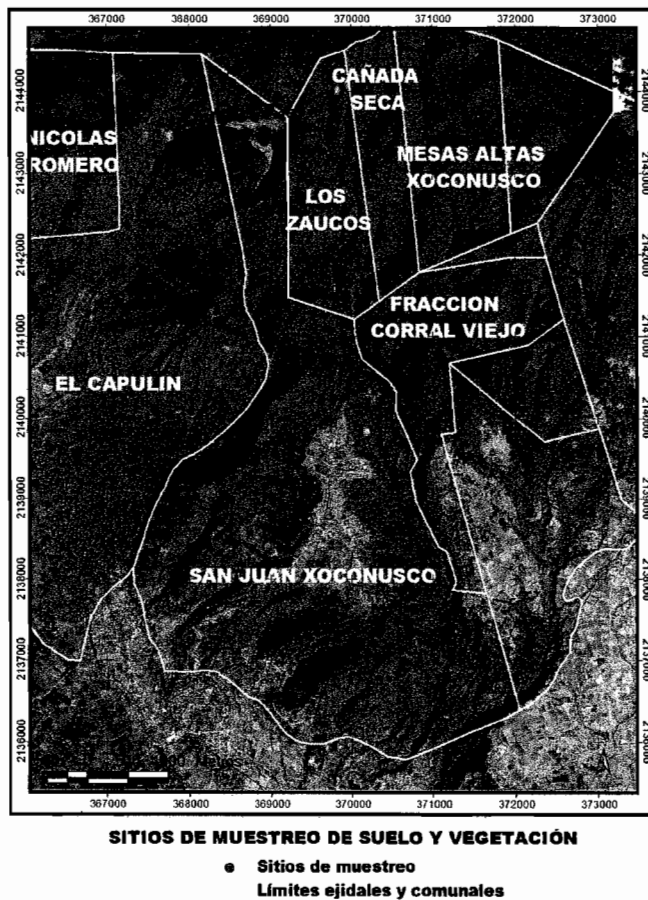


Figura 12. Localización de los sitios de muestreo

Cuadro 5. Sitios de Muestreo

No	Coordenadas UTM		Intervalo de altitud (msnm)	Vegetación y tipo de manejo	Clima	Unidades litológicas	Unidad geomorfológica	Subunidad geomorfológica	Suelo	Pendiente (grados)	
	X	Y									
1	368332	2142029	2 800 a 3 400	Bosque oyamel conservado	C(w2)(w)b '(i) Semifrío subhúmedo	Domas dacíticos monogenéticos	Relieve volcánico montañoso. Perteneciente al Complejo Pelón-Cacique (Altamirano, 2009)	Lomeríos altos	Umbrisol y Andosol	15 a 45	
2	368125	2143054									
3	367950	2142845									
4	368249	2142678		Bosque oyamel aprovechado (20 años)		Flujos de lava andesítica		Piedemonte y altiplanicie intermontaña		0 a 10	
5	368182	2142309									
6	367692	2143827									
7	367938	2143803		Bosque oyamel perturbado		Domas dacíticos monogenéticos y flujos de lava andesítica		Lomeríos altos y piedemonte		10 a 21	
8	368119	2143806									
9	368180	2143635									
10	368241	2143515									
11	368069	2144340									
12	368002	2144293									
13	367872	2144107									
14	368068	2144054									
15	368245	2143931									
16	369060	2141978	2 100 a 2 800	Bosque pino-encino conservado	C(w2)(w)b '(i) Templado subhúmedo	Flujos de lava andesítica, domos dacíticos y depósitos de flujos piroclásticos	Lomeríos altos y bajos	Andosol	10 a 35		
17	369436	2141789									
18	369002	2141570									
19	369283	2140968		Bosque pino-encino aprovechado (10 años)		Domas dacíticos			5 a 25		
20	369026	2140734									
21	368537	2139165									
22	368480	2139299		Bosque pino-encino perturbado		Depósito de flujos piroclásticos			Lomeríos altos y bajos y piedemonte	Andosol y Luvisol	5 a 20
23	368115	2139396									
24	367909	2139064									
25	367785	2138874									
26	369436	2140473									
27	368466	2138788									
28	368335	2138649									
29	369672	2137012									
30	370154	2137140									

Como se observa en la Figura 12 hay tres sitios de muestreo que salen del límite de la comunidad San Juan Xoconusco y esto se debe a que el mapa utilizado de WWF (2009), sólo muestra una aproximación de los límites de las propiedades. Se usó este mapa porque es el mismo que se consideró para la delimitación del decreto de la RBMM en el año 2000, y es el que también se emplea para el monitoreo y el pago del Fondo Monarca. Cabe señalar que en la fecha del decreto eran muy pocos los predios en los que se habían llevado a cabo los levantamientos oficiales del programa de certificación de predios rurales (PROCEDE) del Registro Agrario Nacional (RAN). Incluso en la actualidad el PROCEDE no ha completado el levantamiento oficial de todos los predios que conforman la RBMM.

En estadística se sabe que un mayor número de observaciones asegura una mejor estimación de la media y de la varianza de cualquier parámetro a medir (Moore, 2000). Sin embargo, el número de repeticiones que finalmente se selecciona está definido por la variabilidad de cada sitio y por los costos tanto del trabajo de campo como de laboratorio. Etchevers et al. (2005) recomiendan trabajar con cinco réplicas en los sistemas forestales. El muestreo a escala de ecosistema tiene límites estadísticos. El almacenamiento de carbono no constituye un experimento clásico donde existen repeticiones, factores separados y diferentes niveles de tratamientos (Jandl, 2001). En los inventarios de carbono se consideran diferentes depósitos, los cuales pueden tener una varianza diferente, mientras el error estándar de la media para la biomasa aérea puede ser 20%, el error estándar para el suelo puede ser 40% y el de la biomasa subterránea puede alcanzar 80% o más (MacDicken, 1997).

3.2.2 Muestreo

Para los inventarios de carbono se utilizan parcelas de muestreo circulares (MacDicken, 1997; Schlegel, 2001). La parcela tiene un radio de 17.84 m y corresponde a una superficie de 1000 m² (Figura 13); el radio se corrigió cuando el muestreo se realizó en pendientes mayores a 10%. En cada parcela se registraron las coordenadas con un GPS Garmin eTrex, se midió la pendiente con un Clinómetro Suunto PM-5 360 PC y se registraron datos geomorfológicos, biológicos y evidencias de influencia humana (Cuadro 6).

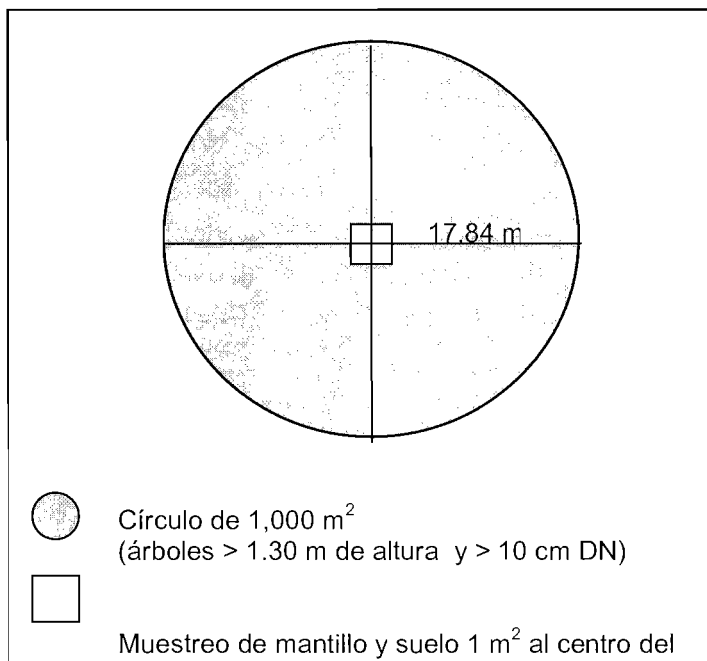


Figura 13. Forma de las parcelas de muestreo

Cuadro 6. Ejemplo de datos registrados en cada sitio de muestreo

Localidad:	San Juan Xoconusco
Fecha:	10/12/2007
Número de sitio:	X1
Coordenadas UTM:	367 872 x – 2 144 107 y
Altitud:	3 100
Zona:	Núcleo
Estado del tiempo:	soleado, despejado
Material parental:	domo dacítico monogenético
Geoforma:	pie de la ladera coluvial
Forma de la ladera:	cóncava
Exposición:	S
Pendiente:	10°
Erosión:	laminar y en surcos
Asociación forestal:	Abies-Cupressus
Presencia de latifoliadas:	No
Cobertura del dosel:	80%
Plagas y/o enfermedades:	No
Pastoreo:	Si
Incendios:	No
Tocones:	Si
Otras observaciones:	aprovechamiento hace 20 años

3.2.3. El contenido de carbono en la biomasa

En este trabajo se realizó un muestreo no destructivo para calcular la cantidad de biomasa en cada sistema. En cada sitio se registró el número de árboles, el género, el diámetro normalizado (DN) y la altura de los individuos. Se midieron los árboles con DN mayor a 10 cm y una altura mayor a 1.30. El DN se midió utilizando una cinta diamétrica y la altura utilizando una cinta métrica y un clinómetro. Para estimar el carbono a partir de la biomasa se utilizan parámetros como el volumen, la densidad de la madera, el factor de expansión de biomasa aérea y la proporción de biomasa subterránea. La ecuación para calcular el carbono en la biomasa es (IPCC, 2003b):

$$(1) C = [V \bullet D \bullet FEB] \bullet (1 + R) \bullet FC$$

Donde:

C = Carbono contenido en la biomasa

V = volumen (m³)

D = densidad de la madera (t m³)

FEB = factor de expansión de biomasa

R = factor de expansión de raíces

FC = fracción de carbono (0.5)

Se calculó el volumen del estrato arbóreo aplicando el modelo de Schumacher. A través de este modelo, se han obtenido distintos parámetros de acuerdo al tipo de vegetación (Cuadro 7). La ecuación aplicada fue la siguiente (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 1996):

$$(2) V = e^{b_0} * DN^{b_1} * H^{b_2}$$

Donde:

V = volumen (m³)

e = base de los logaritmos naturales

DN = diámetro normalizado (cm)

H = altura total (m)

b₀, b₁, b₂ = parámetros de regresión

Cuadro 7. Parámetros del modelo de Schumacher

Parámetros	Tipo de vegetación				
	<i>Abies</i>	<i>Pinus A</i>	<i>Pinus B</i>	<i>Quercus</i>	Otras latifoliadas
ln	2.71828	2.71828	2.7182818	2.71828	2.71828
b0	-9.71800	-10.02400	-9.7753	-9.33433	-9.3156
b1	1.78606	2.06319	2.04668	2.49335	2.38434
b2	1.08051	0.86404	0.81083	0.15563	0.16699

Pinus A: especies de rápido crecimiento (*pseudostrobus*, *montezumae*, *patula*, *ayacahuite*, *michoacana*, *greggii*, *oaxacana*)

Pinus B: especies de lento crecimiento (*teocote*, *leiophylla*, *ocarpa*, *hartweggi*, *rudis*)

En el bosque de oyamel se consideraron valores de densidad de 0.37 para la especie *Abies religiosa* (De Jong et al., 2006) y 0.43 para *Cupressus lindleyi* (IPCC, 2003b). En el bosque mixto se utilizaron valores de densidad de 0.58 para *Quercus spp.* (IPCC, 2003b), 0.43 para *P. montezumae* (Zamora, 2007), 0.55 para *P. occarpa*, 0.45 para *P. leiophylla*, 0.50 para *P. pseudostrobus*, 0.46 para *P. teocote*, 0.51 para *P. michoacana* y un promedio de 0.47 para *Pinus spp.* (De Jong et al., 2006). El factor de expansión de biomasa aérea empleado para coníferas fue 1.3 y para latifoliadas 1.4. Se aplicó una proporción de biomasa subterránea de 0.12 para coníferas y 0.20 para latifoliadas (IPCC, 2003b). Las plantas contienen en promedio 50% de carbono en una base de masa seca, de acuerdo a esto, los valores de producción de biomasa pueden ser convertidos a una base de carbono al multiplicar por 0.5 (Roy, 2001; Terradas, 2001; IPCC; 2003b). Una vez obtenida la cantidad de carbono en cada parcela, los valores se convirtieron a toneladas por hectárea ($t\ C\ ha^{-1}$).

3.2.4. El contenido de carbono en el mantillo

Tomando como referencia el centro de la parcela circular, se delimitó un cuadrado de 25 por 25 cm ($0.06\ m^2$) en el que se realizó el muestreo del mantillo. Se midió el espesor del mantillo, se colectó todo el material dentro del cuadrado y se colocó en una bolsa de plástico para trasladarse al Laboratorio de Suelos y Agua del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA). En el laboratorio se determinó el peso seco del material colectado después de introducirse en la estufa a una temperatura de $80^{\circ}C$ durante 24 horas (Etchevers et al., 2005). El valor obtenido de materia seca se convirtió a unidades de carbono al multiplicarse por el factor de conversión 0.370 (Smith & Heath, 2002 en IPCC, 2003b) y finalmente se hizo el cálculo del contenido de carbono en el mantillo por unidad de superficie.

3.2.5. El contenido de carbono en los suelos

En el centro de cada parcela de muestreo se hizo una calicata de 1 m² y se realizó una descripción completa del perfil (Siebe et al., 2006). Se colectó un kilogramo de suelo por cada horizonte y también con un cilindro metálico de 100 ml de volumen se recolectaron muestras inalteradas de cada horizonte para estimar la densidad aparente (DA). La densidad aparente es la masa por unidad de volumen de un suelo que se ha secado a un peso constante a 105°C. Comúnmente se expresa en gramos por centímetro cúbico (SEMARNAT, 2007).

Las muestras se colocaron en bolsas de plástico debidamente identificadas (lugar, fecha, sitio, parcela, profundidad) para trasladarse al Laboratorio de Suelos y Agua del CIGA-UNAM. En el laboratorio las muestras se registraron, se homogeneizaron en el interior de la bolsa destruyendo los terrones, se secaron a la sombra a temperatura ambiente, se almacenaron en envases plásticos con tapa, se etiquetaron y se guardaron hasta el momento de la preparación para el análisis de C. La preparación consistió en tamizar la muestra seca a través de una malla de 10 para separar la grava, restos vegetales, animales y fragmentos de carbón. Una vez tamizada se volvió a homogeneizar la muestra y se tomó una submuestra de 5 g de suelo para molerse en el mortero de ágata y posteriormente tamizarla en una malla de 100. Los 5 g de suelo se colocaron en viales etiquetados y finalmente se llevaron al Laboratorio de Edafología Ambiental (LEA) del Instituto de Geología de la UNAM para determinar la concentración de carbono orgánico a través del analizador elemental CHNS Perkin Elmer 2400.

Para el cálculo del contenido de C orgánico del suelo se utilizó la fórmula siguiente (IPCC, 2003b; Siebe et al., 2006):

$$(3) \text{ COS} = \sum_{\text{horizonte}=1}^{\text{horizonte}=n} \text{COS}_{\text{horizonte}} \text{ [[COS] * DA * E * (1 - V) * 10]}$$

Donde:

COS = contenido de carbono orgánico en un tipo de suelo ($t\ C\ ha^{-1}$)

$COS_{horizonte}$ = contenido de carbono orgánico del suelo para un horizonte ($t\ C\ ha^{-1}$)

[COS] = concentración de C en una masa de suelo fino obtenida en laboratorio (%)

DA = Densidad aparente ($g\ cm^{-3}$)

E = espesor del horizonte (dm)

V = porcentaje ocupado por fragmentos de roca en el horizonte/100

3.2.6. La distribución espacial de los reservorios de carbono

Se estimó el contenido total de carbono en cada reservorio a través de la fórmula siguiente:

$$(4) \quad CT = CB + CM + CS$$

Donde:

CT = contenido total de carbono en el ecosistema ($t\ C\ ha^{-1}$)

CB = contenido de carbono en la biomasa ($t\ C\ ha^{-1}$)

CM = contenido de carbono en el mantillo ($t\ C\ ha^{-1}$)

CS = contenido de carbono orgánico en el suelo ($t\ C\ ha^{-1}$)

Para convertir toneladas de C a $t\ CO_2$, se multiplicó por 44/12 (3.667) (IPCC, 2003b). En la elaboración cartográfica, primero se definió una leyenda de seis códigos que fue compatible con los estratos seleccionados para el muestreo: bosque de oyamel conservado, bosque de oyamel aprovechado, bosque de oyamel perturbado, bosque de pino-encino conservado, bosque de pino-encino aprovechado, bosque de pino-encino perturbado, y otras cubiertas no forestales (cultivos, pastizales, vegetación arbustiva y asentamientos humanos). Posteriormente se interpretó visualmente en pantalla la imagen Ikonos del 22 de marzo de 2004 y se generó la cartografía de los reservorios de C (biomasa, mantillo y suelo) en la comunidad SJX a través del software ArcView GIS 3.2 e Ilwis 3.31 Academic ITC.

3.2.7. Análisis estadístico

La finalidad de esta investigación fue comparar la magnitud de C entre bosques de oyamel y bosques de pino-encino con distintas condiciones de manejo (conservado, perturbado y aprovechado). Se pretendía comprobar si existían diferencias significativas entre el C promedio almacenado en la biomasa, el mantillo y el suelo dentro de cada tipo de bosque, y saber cuál factor influyó más en tales diferencias; considerando que los factores evaluados fueron el tipo de vegetación y la condición de manejo. Para la comparación de los promedios de C se aplicó un análisis de varianza de una vía y para definir la influencia de los factores se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Duncan. El análisis estadístico se realizó en el software SPSS 15.0.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1. La magnitud de los reservorios de carbono en San Juan Xoconusco

4.1.1. Biomasa

Como se explicó en el método, el contenido de C en la biomasa se obtuvo a partir de factores de expansión de biomasa aérea y subterránea, densidad de la madera y del volumen de los árboles medidos en cada parcela de muestreo. En el bosque de oyamel conservado el volumen promedio de los árboles correspondió a 3.25 m³, el bosque aprovechado presentó un volumen de 1.84 m³ (43% menor que el bosque conservado) y el bosque perturbado 1.42 m³ (56% menor que el bosque conservado). El bosque de pino-encino conservado tuvo un volumen promedio de 2.97 m³, el bosque aprovechado 1.30 m³ (56% menor que el conservado) y el bosque perturbado 0.65 m³ (78% menor que el conservado) (Cuadro 8).

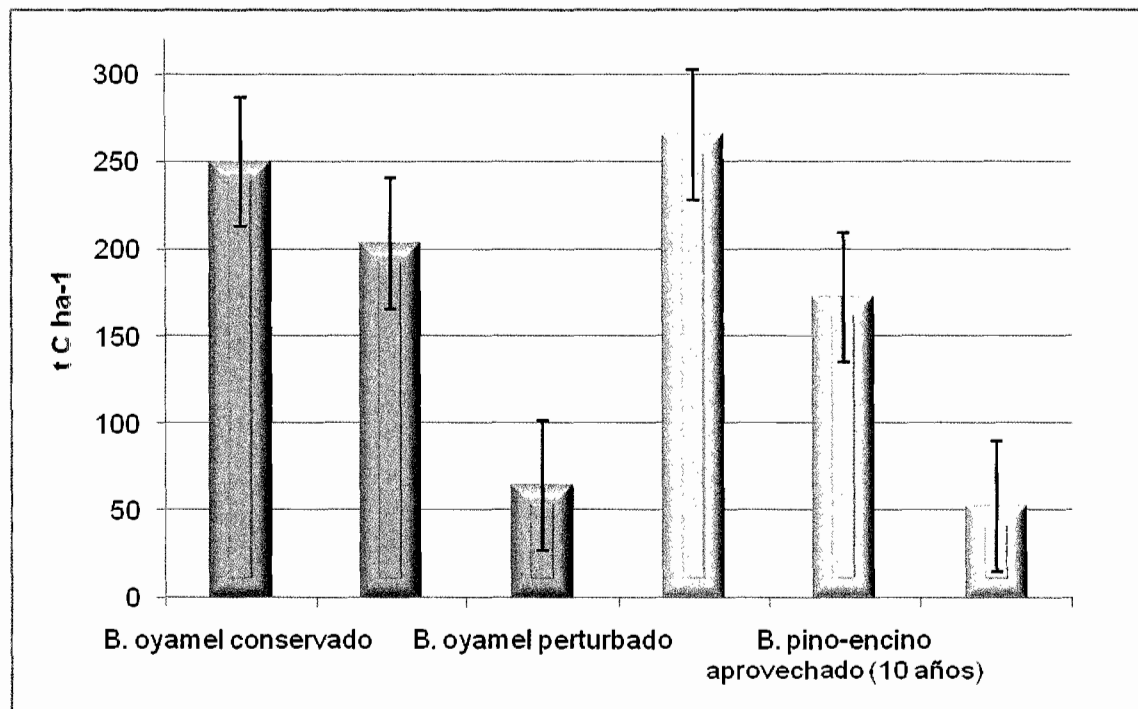
Cuadro 8. Volumen de biomasa por tipo de bosque

Tipo de bosque	Media (m ³)	Valor mínimo (m ³)	Valor máximo (m ³)	Desviación estándar
B. oyamel conservado	3.25	2.28	5.83	1.50
B. oyamel aprovechado (20 años)	1.84	0.87	2.56	0.73
B. oyamel perturbado	1.42	0.26	3.78	1.39
B. pino-encino conservado	2.97	2.03	4.72	1.06
B. pino-encino aprovechado (10 años)	1.30	1.05	1.78	0.28
B. pino-encino perturbado	0.65	0.17	1.60	0.59

Los resultados obtenidos muestran que en la comunidad de San Juan Xoconusco, el contenido de C en la biomasa del bosque de oyamel conservado corresponde a 250 t C ha⁻¹, la biomasa del bosque de oyamel aprovechado almacena 203 t C ha⁻¹ y la biomasa del bosque perturbado acumula únicamente 64 t C ha⁻¹. El bosque de pino-encino conservado retiene en la biomasa 265 t C ha⁻¹, el aprovechado 172 t C ha⁻¹, mientras que el perturbado conserva sólo 52 t C ha⁻¹ (Cuadro 9 y Figura 14).

Cuadro 9. Contenido de carbono en la biomasa de bosques con distinto manejo

Tipo de bosque	Media (t C ha ⁻¹)	Valor mínimo (t C ha ⁻¹)	Valor máximo (t C ha ⁻¹)	Desviación estándar	Error estándar
B. oyamel conservado	250.0	168.7	308.1	56.3	25.2
B. oyamel aprovechado (20 años)	203.3	172.7	220.2	20.5	9.2
B. oyamel perturbado	64.4	9.0	138.7	55.1	24.6
B. pino-encino conservado	265.3	240.9	280.8	16.9	7.5
B. pino-encino aprovechado (10 años)	172.4	106.7	215.5	44.4	19.9
B. pino-encino perturbado	52.5	3.1	116.6	53.3	23.8

**Figura 14. Promedio de carbono almacenado en la biomasa por tipo de bosque**

En el caso del bosque de oyamel, la magnitud de las reservas en la biomasa del bosque conservado es 1.2 veces mayor que en el bosque aprovechado y cuatro veces mayor que en el bosque perturbado. Por otro lado, el contenido de C en la biomasa del bosque de pino-encino conservado es 1.5 veces mayor que el aprovechado y cinco veces mayor que el perturbado.

Los reservorios que presentan un error estándar menor al 20% en su contenido de C, son el bosque de pino-encino conservado y los bosques aprovechados, lo anterior se debe a que estos ecosistemas constituyen masas forestales más homogéneas. El bosque de oyamel conservado y los bosques perturbados manifiestan mayor variación en el tamaño de sus reservas (Desv. estándar > 53.3).

Al analizar el contenido de C en la biomasa mediante ANOVA, se observó que si existen diferencias entre las medias de los seis estratos; puesto que el valor F ($F_{(5,24)} = 29.51$) excedió a $p = 2.71$, considerando un nivel 0.05 de significancia (Cuadro 10).

Cuadro 10. Anova de 1 vía: C en la biomasa

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Varianza
Entre grupos	5	207633.2	41526.6
Dentro de grupos	24	46882.3	1953.43
Total	29	254515.5	
Prueba F (0.05)(5,24)			21.26
Tabla F (1 cola)			2.71

La prueba de comparaciones múltiples de Duncan indica que el factor manejo tiene un efecto más significativo que el factor vegetación, puesto que resultaron tres grupos: bosques conservados (C), bosques aprovechados (B) y bosques perturbados (A) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Prueba de comparaciones múltiples de Duncan: C en biomasa

Estrato	Grupo	Contenido de C (t C ha ⁻¹)			
B. pino-encino perturbado	A	52			
B. oyamel perturbado	A	64			
B. pino-encino aprovechado (10 años)	B		172		
B. oyamel aprovechado (20 años)	BC		203	203	
B. oyamel conservado	CB			250	250
B. pino-encino conservado	C				265
Sig. ($\alpha=0.05$)		0.672	0.280	0.107	0.590

4.1.2. Mantillo

En promedio, el mantillo de los bosques de pino-encino conservados y aprovechados almacena más de 20 t C ha⁻¹, mientras que el mantillo de los bosques mixtos perturbados acumula cinco veces menos carbono (4 t C ha⁻¹). En el mantillo de los bosques de oyamel conservados y aprovechados, se almacenan 13 t C ha⁻¹, mientras que en el mantillo de los bosques perturbados se retienen cuatro veces menos C (3 t C ha⁻¹) (Cuadro 12 y Figura 15).

Cuadro 12. Contenido de carbono en el mantillo de bosques con distinto manejo

Tipo de bosque	Media (t C ha ⁻¹)	Valor mínimo (t C ha ⁻¹)	Valor máximo (t C ha ⁻¹)	Desviación estándar	Error estándar
B. oyamel conservado	13.3	8.3	21.4	5.0	2.2
B. oyamel aprovechado (20 años)	12.8	3.9	18.6	5.8	2.6
B. oyamel perturbado	3.4	0.0	9.1	4.7	2.1
B. pino-encino conservado	20.1	12.8	24.6	4.9	2.2
B. pino-encino aprovechado (10 años)	21.1	17.8	24.2	2.4	1.1
B. pino-encino perturbado	4.1	0.0	12.1	5.1	2.3

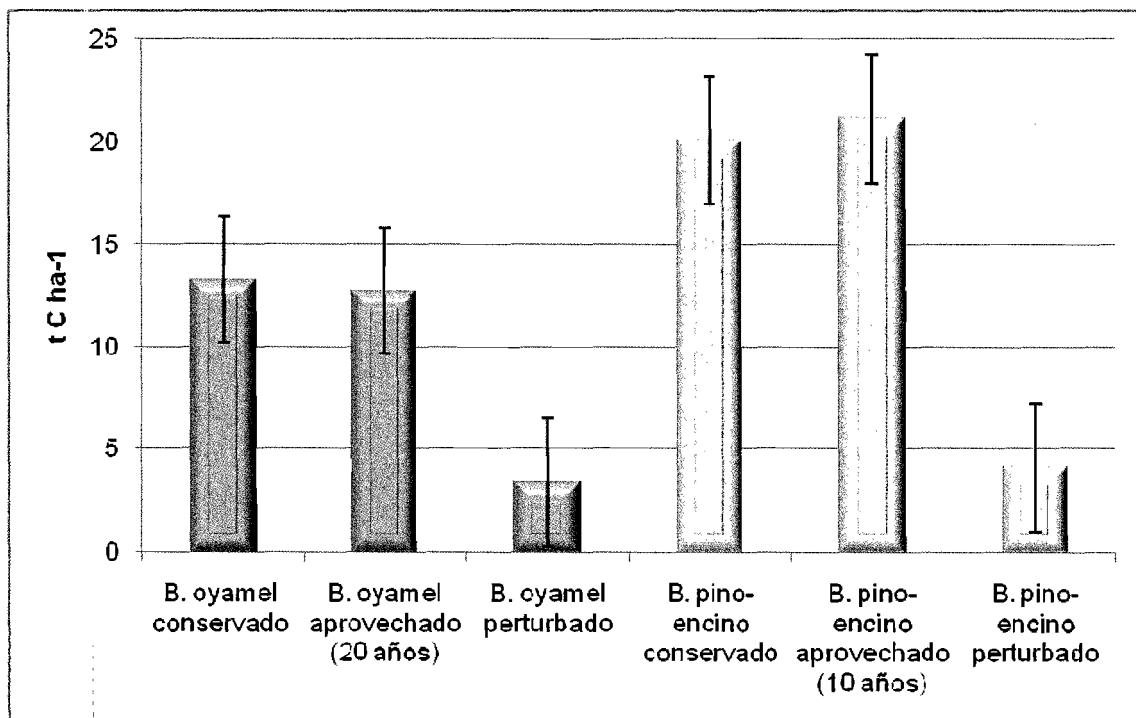


Figura 15. Promedio de carbono almacenado en el mantillo por tipo de bosque

El estrato que presenta menor variación en el tamaño de sus reservas es el bosque mixto aprovechado, con valores entre 18 y 24 t C ha⁻¹, este ecosistema tiene errores internos bajos porque es muy homogéneo (Desv. estándar =2.4). El estrato que tiene mayor variación en el tamaño de sus reservas es el bosque de oyamel aprovechado, con valores entre 4 y 19 t C ha⁻¹ (Desv. estándar =5.8), le siguen el bosque mixto perturbado con valores entre 0 y 12 t C ha⁻¹ (Desv. estándar =5.1) y el bosque de oyamel conservado con valores entre 8 y 21 t C ha⁻¹ (Desv. estándar =5).

Los resultados del análisis de varianza demuestran diferencias significativas entre las medias obtenidas para el contenido de C en el mantillo de los seis estratos ($F_{(5,24)} = 11\ 482$, $p = 2.71$). La comparación entre bosques perennifolios y caducifolios define la acumulación de mantillo sobre el suelo y por lo tanto, determina las diferencias en su contenido de C (Cuadro 13).

Cuadro 13. Anova de 1 vía: C en el mantillo

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Varianza
Entre grupos	5	1430.75	286.15
Dentro de grupos	24	539.71	22.49
Total	29	1970.46	
Prueba F (0.05)(5,24)			12.73
Tabla F (1 cola)			2.71

La prueba de Duncan revela que el factor vegetación tiene un efecto fundamental en la agrupación de los seis estratos: bosques de pino-encino conservados y aprovechados (grupo C), bosques de oyamel conservados y aprovechados (grupo B). No obstante los bosques perturbados (grupo A) se clasificaron de acuerdo al estado de conservación (Cuadro 14).

Cuadro 14. Prueba de comparaciones múltiples de Duncan: C en mantillo

Estrato	Grupo	Contenido de C (t C ha ⁻¹)		
B. oyamel perturbado	A	3		
B. pino-encino perturbado	A	4		
B. oyamel aprovechado (20 años)	B		13	
B. oyamel conservado	B		13	
B. pino-encino conservado	C			20
B. pino-encino aprovechado (10 años)	C			21
Sig. ($\alpha=0.05$)		0.808	0.859	0.745

4.1.3. Suelo

Las variables que fueron utilizadas para calcular el contenido de C en el suelo se presentan en el Anexo 4. Los resultados obtenidos muestran que en promedio, el bosque de oyamel conservado almacena 972 t C ha⁻¹ en el suelo, el bosque perturbado acumula 898 t C ha⁻¹ y el bosque aprovechado retiene menos de la mitad de carbono (445 t C ha⁻¹) que el bosque conservado. El suelo del bosque de pino-encino conservado almacena 384 t C ha⁻¹, el bosque aprovechado 310 t C ha⁻¹, mientras que el bosque perturbado sólo retiene 102 t C ha⁻¹ en el suelo (Cuadro 15 y Figura 16).

Cuadro 15. Contenido de carbono en el suelo de bosques con distinto manejo

Tipo de bosque	Media (t C ha ⁻¹)	Valor mínimo (t C ha ⁻¹)	Valor máximo (t C ha ⁻¹)	Desviación estándar	Error estándar
B. oyamel conservado	971.5	486.4	1702.4	483.4	216.2
B. oyamel aprovechado (20 años)	445.1	156.7	654.8	183.9	82.2
B. oyamel perturbado	898.0	372.0	1146.7	312.2	139.6
B. pino-encino conservado	383.9	225.3	648.9	173.0	77.4
B. pino-encino aprovechado (10 años)	309.6	203.2	527.2	129.0	57.7
B. pino-encino perturbado	102.3	16.9	183.7	70.4	31.5

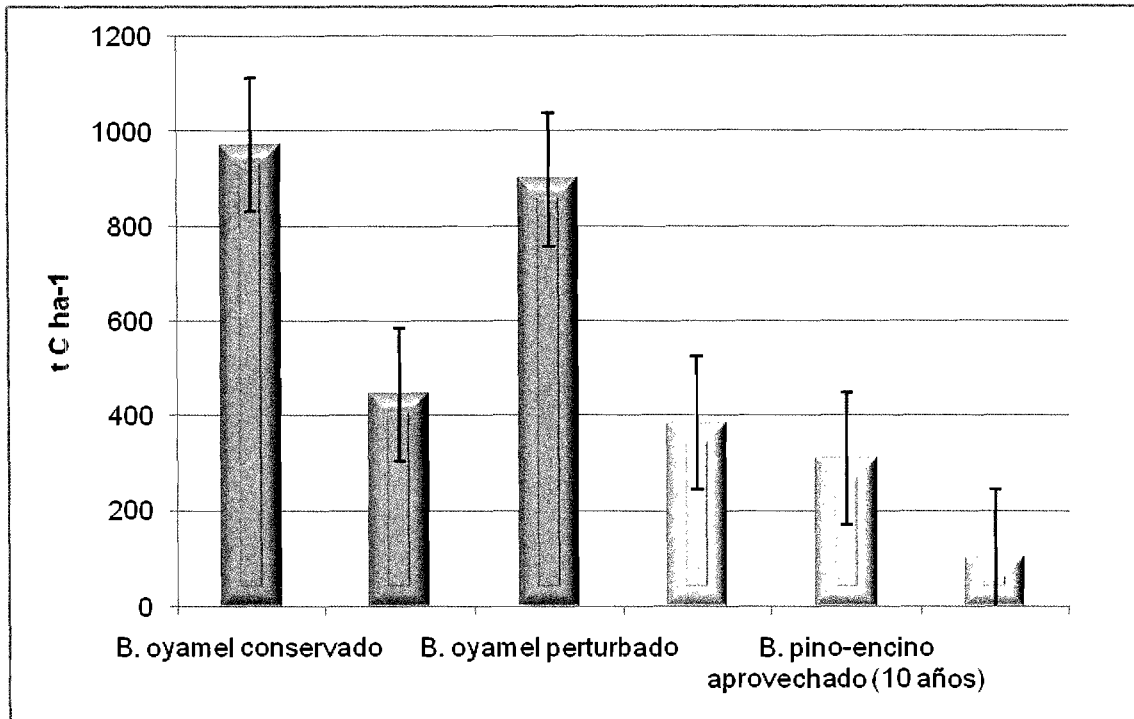


Figura 16. Promedio de carbono almacenado en el suelo por tipo de bosque

El suelo del bosque de oyamel conservado contiene 588 t C ha^{-1} más que el suelo del bosque mixto conservado. El suelo del bosque de oyamel aprovechado contiene 135 t C ha^{-1} más que el suelo del bosque mixto aprovechado. Los estratos que presentan menor variación en el tamaño de sus reservas son los bosques mixtos: el bosque perturbado tiene valores entre 17 y 184 t C ha^{-1} (Desv. estándar =70), el bosque aprovechado tiene valores entre 203 y 527 t C ha^{-1} (Desv. estándar =129) y el bosque conservado tiene valores entre 225 y 649 t C ha^{-1} (Desv. estándar =173). El bosque de oyamel conservado exhibe mayor variación en el tamaño de sus reservas con valores entre 486 y 1702 t C ha^{-1} (Desv. estándar =483).

De acuerdo con los resultados del ANOVA, sí existen diferencias en el contenido de C en el suelo entre los seis tipos de bosque ($F_{(5,24)} = 8.49$, $p = 2.71$), considerando un nivel 0.05 de significancia (Cuadro 16).

Cuadro 16. Anova de 1 vía: C en el suelo

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Varianza
Entre grupos	5	2947875	589575
Dentro de grupos	24	1665945	69414
Total	29	4613820	
Prueba F (0.05)(5,24)			8.49
Tabla F (1 cola)			2.71

La prueba de comparaciones múltiples de Duncan sólo construyó dos grupos de medias separando a los bosques mixtos (grupo A) de los bosques de oyamel (grupo B), excepto en el caso del bosque de oyamel aprovechado que por sus valores bajos se clasificó dentro del grupo A; no obstante, se muestra que el factor vegetación tiene un efecto importante en la agrupación de los estratos (Cuadro 17).

Cuadro 17. Prueba de comparaciones múltiples de Duncan: C en suelo

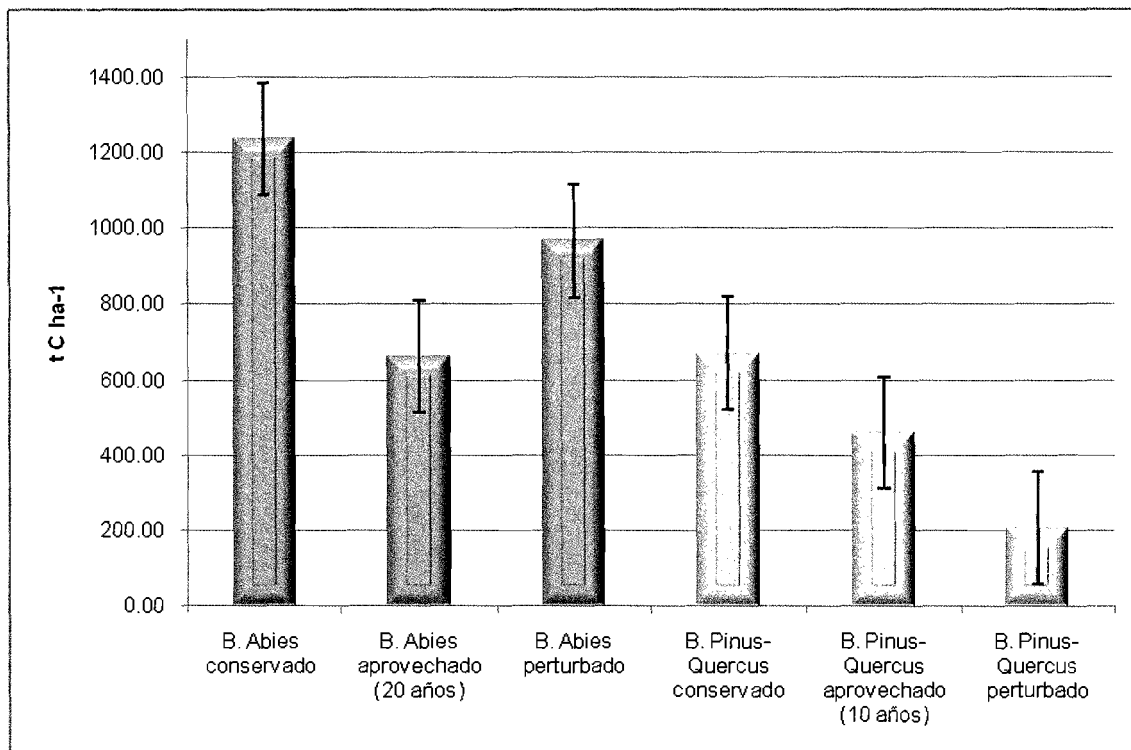
Estrato	Grupo	Contenido de C (t C ha ⁻¹)	
B. pino-encino perturbado	A	102	
B. pino-encino aprovechado (10 años)	A	310	
B. pino-encino conservado	A	384	
B. oyamel aprovechado (20 años)	A	445	
B. oyamel perturbado	B		898
B. oyamel conservado	B		972
Sig. ($\alpha=0.05$)		0.070	0.663

4.1.4. Magnitud total de los reservorios

Considerando el contenido de C en los tres reservorios anteriores, en la comunidad de San Juan Xoconusco el bosque de oyamel conservado almacena en total 1 235 t C ha⁻¹, el bosque aprovechado acumula 661 t C ha⁻¹ y el bosque perturbado retiene 966 t C ha⁻¹. El bosque de pino-encino conservado almacena en total 669 t C ha⁻¹, el aprovechado 457 t C ha⁻¹, mientras que el perturbado acumula sólo 205 t C ha⁻¹ (Cuadro 18 y Figura 17).

Cuadro 18. Contenido de carbono en bosques de SJX con distinto manejo

Tipo de bosque	Media (t C ha ⁻¹)	Valor mínimo (t C ha ⁻¹)	Valor máximo (t C ha ⁻¹)	Desviación estándar	Error estándar
B. oyamel conservado	1234.9	763.8	1884.7	461.3	206.3
B. oyamel aprovechado (20 años)	661.2	385.9	888.5	184.7	82.6
B. oyamel perturbado	965.8	463.3	1285.4	322.9	144.4
B. pino-encino conservado	669.3	490.4	934.8	177.4	79.3
B. pino-encino aprovechado (10 años)	457.4	322.8	700.3	154.5	69.1
B. pino-encino perturbado	204.6	29.2	428.1	165.3	73.9

**Figura 17. Promedio de carbono total almacenado por tipo de bosque**

La magnitud de las reservas de carbono en el bosque de oyamel conservado es dos veces mayor que el bosque aprovechado y 1.3 veces mayor que el bosque perturbado. Por otro lado, el contenido de carbono en el bosque de pino-encino conservado es 1.5 veces mayor que el aprovechado y tres veces mayor que el perturbado. En promedio, el bosque de oyamel conservado almacena 566 t C ha⁻¹

más que el bosque de mixto conservado; el bosque de oyamel aprovechado contiene 204 t C ha^{-1} más que el bosque mixto y el bosque de oyamel perturbado retiene 761 t C ha^{-1} más que el bosque mixto perturbado.

La magnitud total de carbono en los reservorios de San Juan Xoconusco presenta errores estándar que varían entre 69 y 206 %. Los ecosistemas que presentan menor variación en el tamaño de sus reservas son los bosques mixtos: el bosque aprovechado tiene valores entre 323 y 700 t C ha^{-1} (Desv. estándar =155); el bosque perturbado tiene valores entre 29 y 428 t C ha^{-1} (Desv. estándar =165) y el bosque conservado tiene valores entre 490 y 935 t C ha^{-1} (Desv. estándar =177). Por otro lado, el ecosistema que tiene mayor variación en el tamaño de sus reservas es el bosque de oyamel conservado con valores de 764 a $1\ 885 \text{ t C ha}^{-1}$ (Desv. estándar =206).

La magnitud de carbono en los reservorios de San Juan Xoconusco se concentra en el suelo, representando entre 57 y 93 % de la reserva total en cada ecosistema, la magnitud de las reservas en la biomasa representa entre 7 y 40% del C total y la proporción de carbono en el mantillo con respecto al total varía entre 0.4 y 4 %. En el caso del bosque de oyamel perturbado existe 0.4% de C en el mantillo, 6.6% de C en la biomasa y 97% de C en el suelo, el hecho de que exista mayor porcentaje de C en el suelo que en la biomasa, se debe a que éste era un bosque conservado hasta hace cuatro años, cuando fue deforestado. El impacto de la tala sobre la vegetación es inmediato pero los efectos de la degradación en el suelo no se observan a corto plazo. Sin considerar al bosque de oyamel perturbado, el bosque de oyamel conservado contiene el porcentaje más alto de C en el suelo con 78% seguido del bosque de oyamel aprovechado con 67% y de los bosques mixtos con menos de 64%. Por otro lado, los ecosistemas que tienen mayor proporción de C en la biomasa son los bosques mixtos: el conservado tiene 40%, el aprovechado 34% y el perturbado 33%. Los bosques de oyamel almacenan menos del 30% del C en la biomasa. Los ecosistemas con mayor porcentaje de C en el mantillo son los bosques mixtos (2.6 a 4.2%) mientras que los bosques de oyamel contienen menos de 2% (Figura 18 y Cuadro 19).

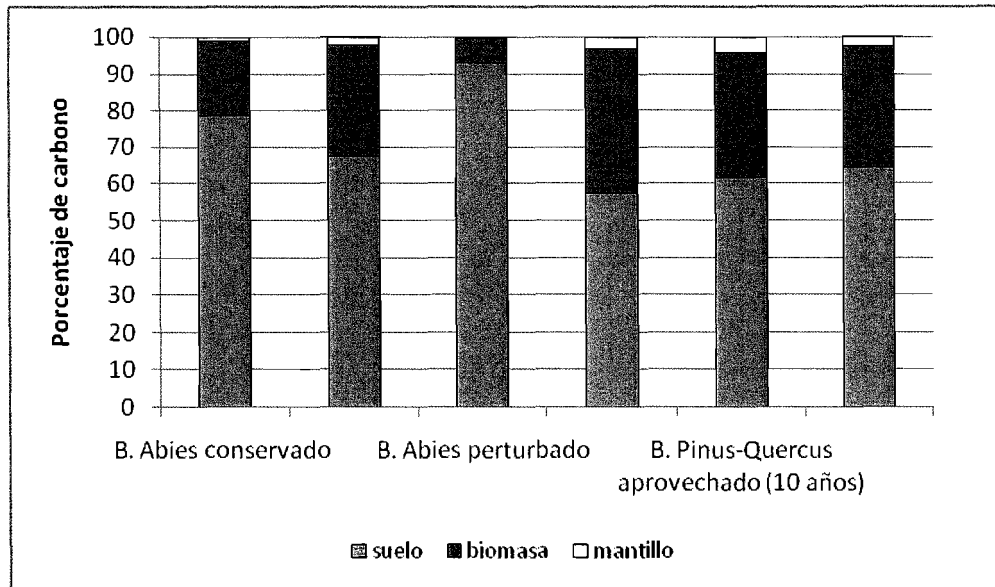


Figura 18. Distribución de las reservas de carbono en cada sistema

Cuadro 19. Distribución del carbono en cada reservorio por tipo de bosque

Tipo de reservorio	B. oyamel conservado	B. oyamel aprovechado (20 años)	B. oyamel perturbado	B. pino-encino conservado	B. pino-encino aprovechado (10 años)	B. pino-encino perturbado
Mantillo	13	13	3	20	21	4
Biomasa	250	203	64	265	172	52
Suelo	972	445	898	384	310	102
Total	1235	661	966	669	457	205

El análisis de varianza indica que si existen diferencias en la magnitud total de carbono almacenado en los distintos ecosistemas de San Juan Xoconusco. El valor F ($F_{(5,24)} = 9.18$) excedió a $p=2.71$ con un nivel de 0.05 de significancia (Cuadro 20).

Cuadro 20. Anova de 1 vía: carbono total

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Varianza
Entre grupos	5	3317403	663480
Dentro de grupos	24	1735355	72306
Total	29	5052758	
Prueba F (0.05)(5,24)			9.18
Tabla F (1 cola)			2.71

La prueba de comparaciones múltiples de Duncan indica que el tipo de vegetación tiene un efecto más importante que el tipo de manejo en la agrupación de los seis estratos analizados. Resultaron tres grupos conformados por el conjunto de bosques de oyamel conservados y perturbados (grupo C), el conjunto de bosques mixtos aprovechados y perturbados (grupo A) y el conjunto de bosque de oyamel aprovechado y bosque mixto conservado (grupo B) (Cuadro 21).

Cuadro 21. Prueba de comparaciones múltiples de Duncan: C total

Estrato	Grupo	Contenido total de carbono (t C ha ⁻¹)			
B. pino-encino perturbado	A	205			
B. pino-encino aprovechado (10 años)	AB	457	457		
B. oyamel aprovechado (20 años)	BC		661	661	
B. pino-encino conservado	BC		669	669	
B. oyamel perturbado	CB			966	966
B. oyamel conservado	C				1235
Sig. ($\alpha=0.05$)		0.15	0.251	0.102	0.127

4.2. La distribución espacial de los reservorios de carbono

4.2.1. Distribución de los bosques por estado de conservación

De acuerdo con la cartografía de predios proporcionada por WWF (2009), San Juan Xoconusco tiene un área total de 1 974 ha. El 7% de su superficie está cubierta por bosques de oyamel, el 68% por bosques mixtos y el 25% por cultivos, pastizales, vegetación arbustiva y asentamientos humanos. La superficie total de los bosques de oyamel corresponde a 135 ha, de las cuales, 84% (114 ha) pertenecen a bosques conservados, 10% (13 ha) a bosques aprovechados y 6% (8 ha) a bosques perturbados (Figura 19).

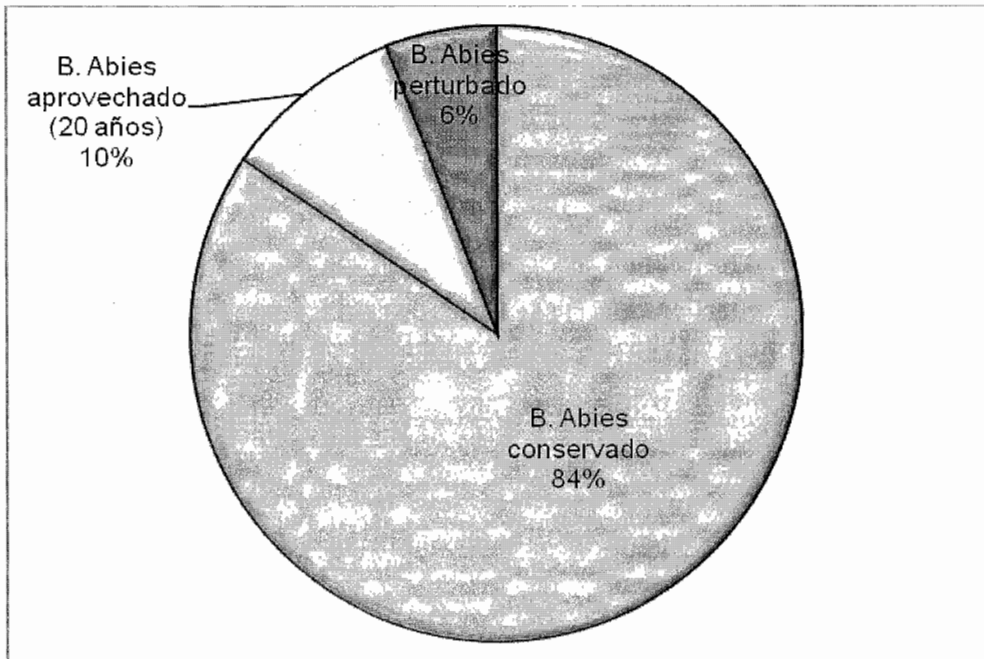


Figura 19. Proporción de los bosques de oyamel por estado de conservación

Los bosques de oyamel se localizan al norte de SJX, cubriendo las partes más elevadas del Cerro Pelón, entre 2 800 y 3 400 msnm, bajo un clima semifrío subhúmedo. La litología está constituida por domos dacíticos monogenéticos y flujos de lava andesítica sobre los que se formaron suelos tipo Umbrisol y Andosol. Este ecosistema se ubica dentro de la zona núcleo de la RBMM, en donde la comunidad tiene prohibido hacer cualquier tipo de aprovechamiento del bosque (Figura 20).

Sin embargo, dentro de la zona núcleo existe tala clandestina, que se ha incrementado en los últimos 4 años, en los límites entre San Juan Xoconusco (Estado de México) y la comunidad Nicolás Romero (Michoacán). Esta práctica ha provocado la perturbación del bosque de oyamel al norte de la comunidad a pesar de encontrarse en altitudes mayores a 3 100 msnm y sobre laderas rectas y convexas con pendientes de 15° a 25°. Los bosques conservados se localizan en sitios menos accesibles sobre laderas rectas y convexas con pendientes de 15° a 45°, mientras que los bosques de oyamel que fueron aprovechados hace 20 años, se ubican en una zona muy accesible sobre el pie de ladera y cerca del pastizal denominado por la comunidad “Llano del Sol” con pendientes de 0° a 10°.

Los bosques de pino-encino tienen una superficie total de 1 346 ha, de las cuales, 49% (659 ha) pertenecen a bosques conservados, 21% (282 ha) corresponden a bosques aprovechados y 30% (405 ha) a bosques perturbados (Figura 21).

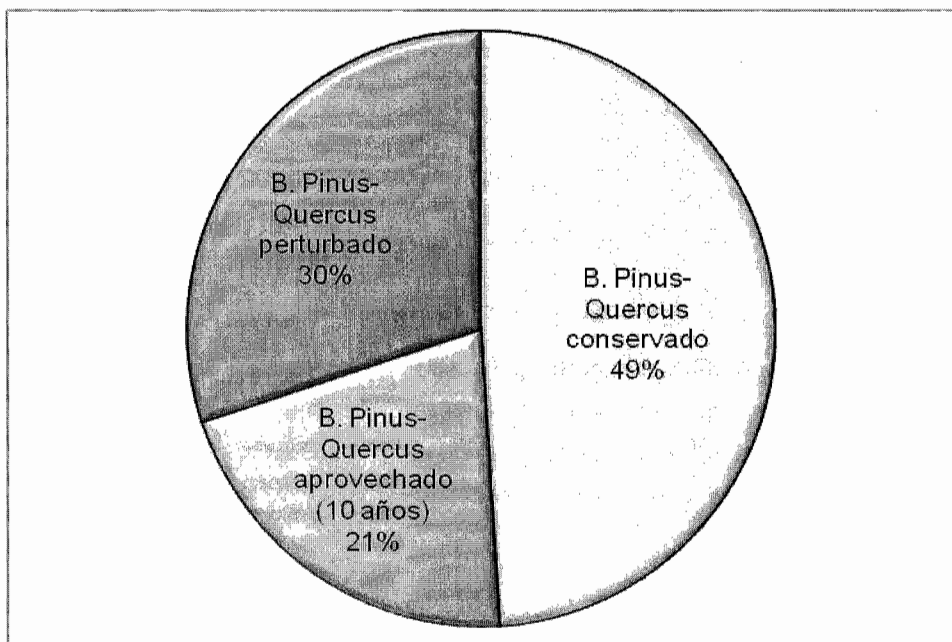


Figura 21. Proporción de los bosques de pino-encino por estado de conservación

Estos ecosistemas se localizan al centro y sur de San Juan Xoconusco, cubriendo lomeríos y cañadas en altitudes que van de 2 100 a 2 800 msnm. El clima es templado subhúmedo y la litología está constituida por domos dacíticos y depósitos de flujos piroclásticos. Los suelos son tipo Andosol en los lomeríos altos y bajos y tipo Luvisol en el piedemonte. Los bosques mixtos se ubican dentro de la zona de amortiguamiento de la RBMM, en donde si se permite el aprovechamiento de los recursos forestales (Figura 20). Los bosques conservados se localizan en el centro de SJX entre 2 500 y 2 800 msnm y en pendientes de 10° a 35°. El área de aprovechamiento forestal se localiza al suroeste de la comunidad, entre 2 200 y 2 500 m de altitud y en pendientes de 5° a 25°. Además de la extracción de madera con fines comerciales también se obtiene leña para uso doméstico y se extrae resina. Los bosques perturbados se ubican al sur y al oriente de SJX a una altitud que varía entre 2 100 y 2 400 msnm y en pendientes menores a 20°. La cercanía de estos bosques con la localidad los hace más vulnerables a las actividades agropecuarias y a la expansión de la población, lo cual se refleja en la erosión del suelo que va desde laminar hasta la formación de cárcavas.



Figura 20. Distribución espacial de los bosques templados en San Juan Xoconusco

4.2.2. Biomasa

Los bosques de San Juan Xoconusco almacenan en la biomasa aproximadamente 1 Mt CO₂ en 1 481 ha. El CO₂ acumulado en los bosques de oyamel corresponde a 0.1 Mt CO₂, de las cuales, 90% (104 420 t CO₂) se acumulan en bosques conservados, 8% (9 614 t CO₂) en bosques aprovechados y 2% (1 867 t CO₂) en bosques perturbados. El CO₂ acumulado en los bosques de pino-encino corresponde a 0.9 Mt CO₂, de las que 71% (641 676 t CO₂) pertenecen a bosques conservados, 20% (178 094 t CO₂) a bosques aprovechados y 9% (77 887 t CO₂) a bosques perturbados (Cuadro 22).

Cuadro 22. CO₂ almacenado en la biomasa de los bosques de San Juan Xoconusco

Tipo de bosque	Área (ha)	C almacenado (t C ha ⁻¹)	CO ₂ almacenado (t CO ₂ ha ⁻¹)	Reserva total (t CO ₂)	% CO ₂ por tipo de bosque
B. oyamel conservado	114	250	917	104420	90
B. oyamel aprovechado (20 años)	13	203	745	9614	8
B. oyamel perturbado	8	64	236	1867	2
Subtotal B. oyamel	135			115901	100
B. pino-encino conservado	660	265	973	641676	71
B. pino-encino aprovechado (10 años)	282	172	632	178094	20
B. pino-encino perturbado	405	52	192	77887	9
Subtotal B. pino encino	1346			897657	100
Subtotal bosques templados	1481			1013558	
Cultivos, pastizales y vegetación arbustiva	493				
Total	1974			1013558	

La biomasa del bosque de oyamel conservado contiene 917 t CO₂ ha⁻¹, el bosque aprovechado tiene 745 t CO₂ ha⁻¹ (19% menos que el conservado) y el bosque perturbado 236 t CO₂ ha⁻¹ (74% menos que el bosque conservado). La biomasa del bosque de pino-encino conservado almacena 973 t CO₂ ha⁻¹, valor que se reduce hasta 192 t CO₂ ha⁻¹ en el bosque perturbado (80% menos que el conservado), mientras que el bosque mixto aprovechado contiene 632 t CO₂ ha⁻¹ (35% menos que el conservado).

La magnitud de las reservas de C en la biomasa está determinada por el estado de conservación de los bosques. Los ecosistemas perturbados contienen la menor cantidad de carbono. El bosque de oyamel perturbado se ubica en el límite norte de San Juan Xoconusco, colindante con el área perturbada de la comunidad Nicolás Romero, dentro de la zona núcleo de la RBMM (Figura 22). La tala clandestina ha eliminado árboles de gran tamaño (oyamel y cedro) provocando la pérdida de C en la biomasa, no obstante, en las áreas perturbadas la vegetación ha comenzado a regenerarse, y en 20 años la biomasa podría acumular hasta 200 t C ha^{-1} ($733 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$), cantidad que corresponde a la almacenada en el bosque de oyamel que fue aprovechado hace 2 décadas.

El bosque de pino-encino perturbado se localiza al sur de la localidad de SJX. Hace cuatro años una superficie de 300 ha de bosque mixto, que contenían aproximadamente $51\,600 \text{ t C}$, registró un incendio en el que se liberaron a la atmósfera alrededor de $189\,200 \text{ t CO}_2$. El bosque mixto que experimentó tala clandestina tiene poca regeneración vegetal, mientras que el área incendiada muestra una considerable regeneración y representa un importante potencial de captura de CO_2 .

Por otro lado, la biomasa del bosque de oyamel aprovechado contiene más carbono que el bosque de pino-encino aprovechado porque tiene más de 20 años de recuperación. El bosque de oyamel aprovechado está próximo a la brecha principal que une a la localidad con el Llano del Sol, lo cual facilitó la extracción de madera dentro de la actual zona núcleo. El bosque mixto aprovechado se localiza al suroeste de SJX, colindando con el ejido El Capulín. En este ecosistema se explotan especies de rápido crecimiento como *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae*, *P. ayacahuite*, entre otras. Finalmente los bosques conservados de oyamel y pino-encino localizados al norte y centro de la comunidad respectivamente, almacenan más carbono por unidad de superficie (Figura 22).

CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA



Figura 22. Distribución espacial del carbono en la biomasa: San Juan Xoconusco

4.2.3. Mantillo

La magnitud de las reservas de C en el mantillo está determinada por el tipo de vegetación y el tipo de clima. En el caso del mantillo, los bosques mixtos caducifolios almacenan más carbono que los bosques de oyamel porque los primeros aportan mayor cantidad de materia orgánica que los últimos. El bosque mixto aprovechado localizado al suroeste de San Juan Xoconusco, acumula mayor cantidad de CO₂ en el mantillo por unidad de superficie (77 t CO₂ ha⁻¹) seguido del bosque mixto conservado que se ubica al centro de la comunidad (74 t CO₂ ha⁻¹) (Figura 23). Los incendios y la perturbación de los ecosistemas de pino-encino al sur de SJX, han provocado la pérdida de C en el mantillo ya que almacena sólo 15 t CO₂ ha⁻¹ (79% menos que el bosque conservado). El incendio registrado que afectó al mantillo liberó aproximadamente 22 000 t CO₂. Los bosques de oyamel conservados y aprovechados ubicados dentro de la zona núcleo tienen una magnitud similar de CO₂ en el mantillo (49 y 47 t CO₂ ha⁻¹, respectivamente) pero los bosques perturbados almacenan 75% menos CO₂ (12 t CO₂ ha⁻¹). En total los bosques de la comunidad acumulan en el mantillo 82 892 t CO₂ de las que 6 271 t CO₂ se encuentran en el bosque de oyamel y 76 621 en el bosque mixto (Cuadro 23).

Cuadro 23. CO₂ almacenado en el mantillo de los bosques de San Juan Xoconusco

Tipo de bosque	Área (ha)	C almacenado (t C ha ⁻¹)	CO ₂ almacenado (t CO ₂ ha ⁻¹)	Reserva total (t CO ₂)
B. oyamel conservado	114	13	49	5568
B. oyamel aprovechado (20 años)	13	13	47	605
B. oyamel perturbado	8	3	12	98
Subtotal B. oyamel	135			6271
B. pino-encino conservado	660	20	74	48678
B. pino-encino aprovechado (10 años)	282	21	77	21814
B. pino-encino perturbado	405	4	15	6129
Subtotal B. pino encino	1346			76621
Total	1481			82892

CARBONO ALMACENADO EN EL MANTILLO

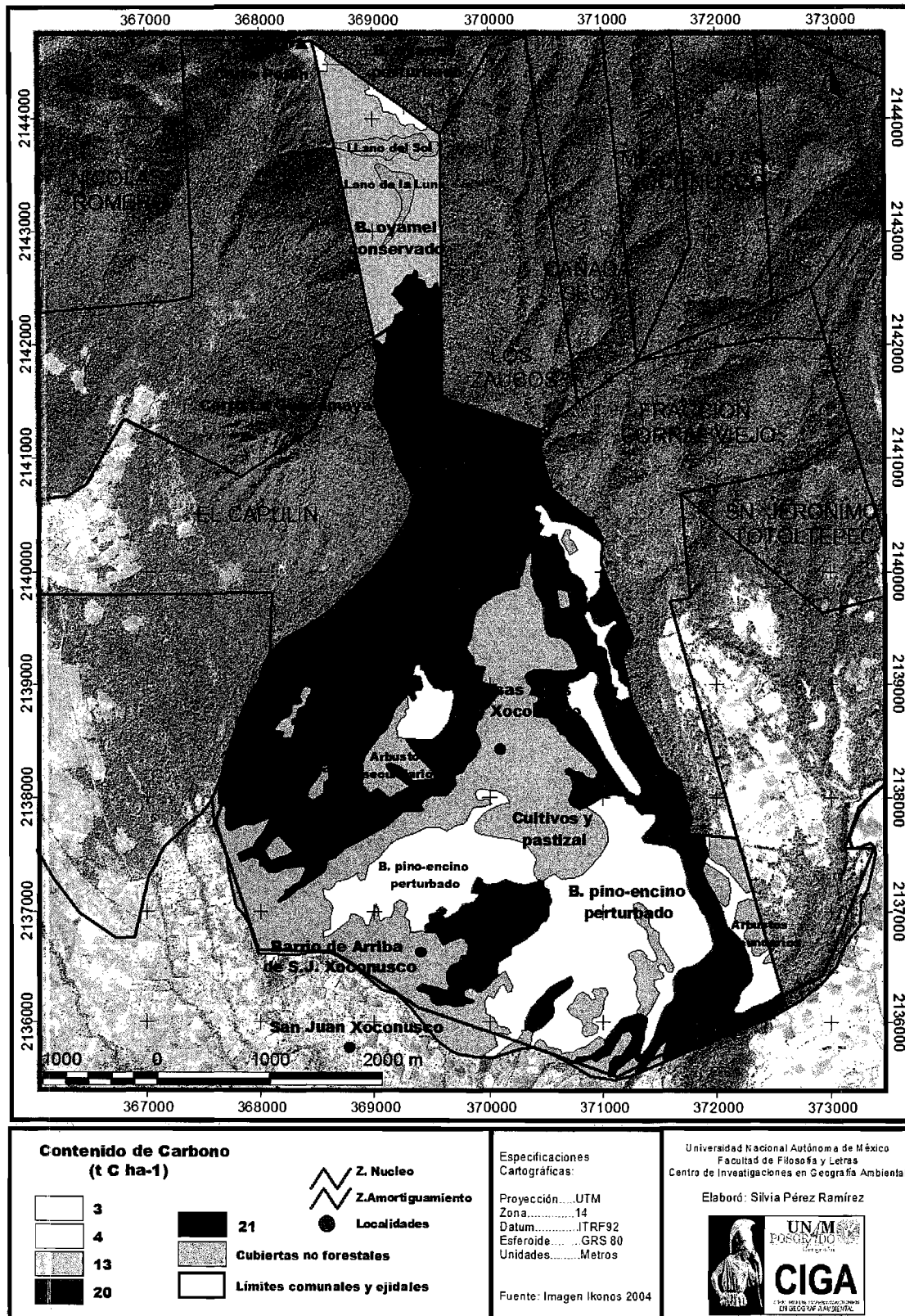


Figura 23. Distribución espacial del carbono en el mantillo: San Juan Xoconusco

4.2.4. Suelo

Los bosques de San Juan Xoconusco almacenan en el suelo 1.9 Mt CO₂ en 1 481 ha. El CO₂ acumulado en los bosques de oyamel corresponde a 0.5 Mt CO₂, de las cuales, 90% (405 748 t CO₂) se acumulan en bosques conservados, 5% (21 054 t CO₂) en bosques aprovechados y 6% (26 011 t CO₂) en bosques perturbados. El CO₂ acumulado en los bosques de pino-encino corresponde a 1.4 Mt CO₂, de las que 66% (928 564 t CO₂) pertenecen a bosques conservados, 23% (319 940 t CO₂) a bosques aprovechados y 11% (151 926 t CO₂) a bosques perturbados (Cuadro 24).

Cuadro 24. CO₂ almacenado en el suelo de los bosques de San Juan Xoconusco

Tipo de bosque	Área (ha)	C almacenado (t C ha ⁻¹)	CO ₂ almacenado (t CO ₂ ha ⁻¹)	Reserva total (t CO ₂)	% CO ₂ por tipo de bosque
B. oyamel conservado	114	972	3562	405748	90
B. oyamel aprovechado (20 años)	13	445	1632	21054	5
B. oyamel perturbado	8	898	3293	26011	6
Subtotal B. oyamel	135			452813	100
B. pino-encino conservado	660	384	1408	928564	66
B. pino-encino aprovechado (10 años)	282	310	1135	319940	23
B. pino-encino perturbado	405	102	375	151926	11
Subtotal B. pino encino	1346			1400430	100
Subtotal bosques templados	1481			1853243	
Cultivos, pastizales y vegetación arbustiva	493				
Total	1974			1853243	

El suelo del bosque de oyamel conservado contiene en promedio 3 562 t CO₂ ha⁻¹, el bosque aprovechado tiene 1 632 t CO₂ ha⁻¹ (54% menos que el conservado) y el bosque perturbado 3 293 t CO₂ ha⁻¹ (8% menos que el bosque conservado). La biomasa del bosque de pino-encino conservado almacena 1 408 t CO₂ ha⁻¹, valor que se reduce hasta 375 t CO₂ ha⁻¹ en el bosque perturbado (73% menos que el conservado), mientras que el bosque mixto aprovechado contiene 1 135 t CO₂ ha⁻¹ (19% menos que el conservado).

Las reservas de C en el suelo son más grandes en los bosques de oyamel conservados localizados al norte de San Juan Xoconusco (Figura 24). El suelo predominante es Umbrisol y retiene más carbono porque se encuentra bajo un clima semifrío subhúmedo, con bajas temperaturas y alta precipitación que retardan la descomposición de la materia orgánica. El bosque de oyamel que fue aprovechado hace 20 años, se localiza alrededor del Llano del Sol y contiene apenas 46% del C total en el bosque conservado porque sus suelos presentan erosión laminar y en surcos provocando la pérdida de C. El contenido de C en el suelo es menor en los bosques de pino-encino, localizados al sur de SJX bajo un clima templado subhúmedo y con suelos tipo Andosol y Luvisol. En los bosques mixtos perturbados tienen sólo 27% del C total almacenado en los bosques conservados. En estos ecosistemas existe mayor exposición de la superficie a la radiación solar lo que implica mayor descomposición de los escasos residuos orgánicos que llegan al suelo además, los suelos presentan diversos rasgos de erosión (laminar, surcos y cárcavas) que aceleran la mineralización de la materia orgánica e inducen a la emisión de aproximadamente $375 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$.

CARBONO ALMACENADO EN EL SUELO

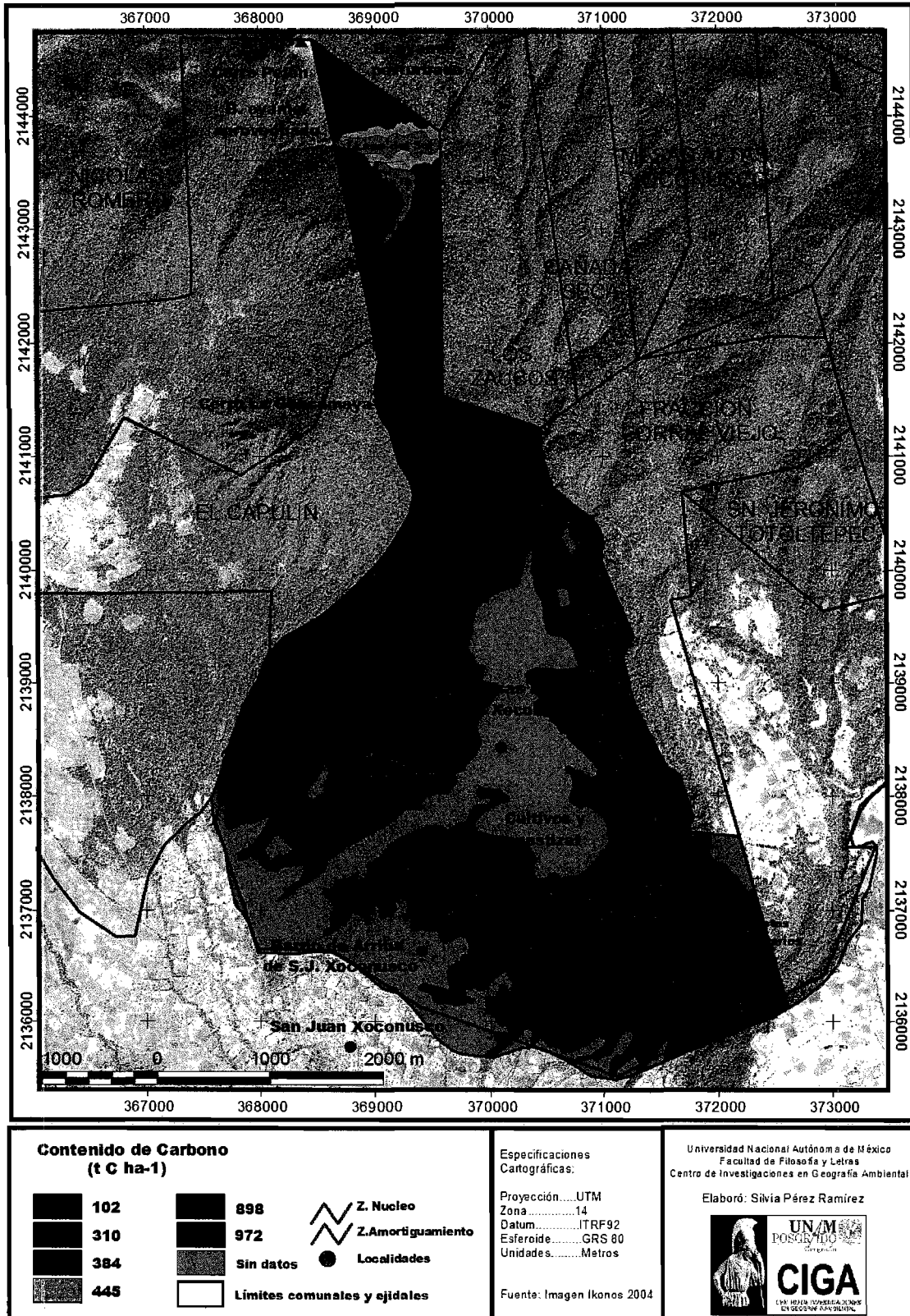


Figura 24. Distribución espacial del carbono en el suelo: San Juan Xoconusco

4.2.5. Distribución general

Los bosques de la comunidad indígena San Juan Xoconusco, ubicados dentro de la RBMM, constituyen importantes reservorios de carbono que almacenan aproximadamente 3 Mt CO₂ en una superficie de 1 481 ha. La magnitud total de C en los bosques de oyamel corresponde a 0.57 Mt CO₂, de las cuales, 90% (515 736 t CO₂) se acumulan en bosques conservados, 5% (31 273 t CO₂) en bosques aprovechados y otro 5% (27 976 t CO₂) en bosques perturbados. La magnitud total de C en los bosques de pino-encino corresponde a 2.4 Mt CO₂, de las que 67% (1.6 Mt CO₂) pertenecen a bosques conservados, 20% (427 660 t CO₂) a bosques aprovechados y 13% (303 740 t CO₂) a bosques perturbados (Cuadro 25).

Cuadro 25. Superficie y CO₂ total almacenado en los reservorios de San Juan Xoconusco

Tipo de bosque	Área (ha)	C almacenado (tC ha ⁻¹)	CO ₂ almacenado (t CO ₂ ha ⁻¹)	Reserva total (t CO ₂)	% CO ₂ por tipo de bosque
B. oyamel conservado	113.9	1235	4528	515736	90
B. oyamel aprovechado (20 años)	12.9	661	2424	31273	5
B. oyamel perturbado	7.9	966	3541	27976	5
Subtotal B. oyamel	134.7			574985	100
B. pino-encino conservado	659.7	669	2454	1618921	67
B. pino-encino aprovechado (10 años)	281.8	457	1677	472660	20
B. pino-encino perturbado	404.9	205	750	303740	13
Subtotal B. pino encino	1346.4			2395321	100
Subtotal bosques templados	1481.1			2970305	
Cultivos, pastizales y vegetación arbustiva	492.9	5	18	9037	
Total	1974			2979342	

La superficie del bosque de oyamel conservado corresponde a 114 ha donde se almacenan 4 528 t CO₂ ha⁻¹, el bosque aprovechado tiene 13 ha en las que acumula 2 424 t CO₂ ha⁻¹ (46% menos que el conservado) y el bosque perturbado con 8 ha retiene 3 541 t CO₂ ha⁻¹ (22% menos que el bosque conservado). La superficie del bosque de pino-encino conservado corresponde a 659 ha donde se almacenan 2 454 t CO₂ ha⁻¹, valor que se reduce drásticamente hasta 750 t CO₂ ha⁻¹ en el bosque perturbado con 405 ha, es decir, que contiene 69% menos

carbono que el conservado, mientras que el bosque mixto aprovechado con 282 ha acumula 1 677 t CO₂ ha⁻¹ (32% menos que el bosque conservado).

De la magnitud total de carbono (3 Mt CO₂) almacenado en las cubiertas del suelo, 54% corresponde al bosque mixto conservado, 17% al bosque de oyamel conservado, 16% al bosque mixto aprovechado, 10% al bosque mixto perturbado, 1% a los bosques de oyamel aprovechados y perturbados y únicamente 0.3% corresponde a cultivos y pastizales los cuales según el IPCC (2003b) acumulan 5 t C ha⁻¹, por lo que contienen 9 037 t CO₂ en una superficie de 493 ha (Figura 25).

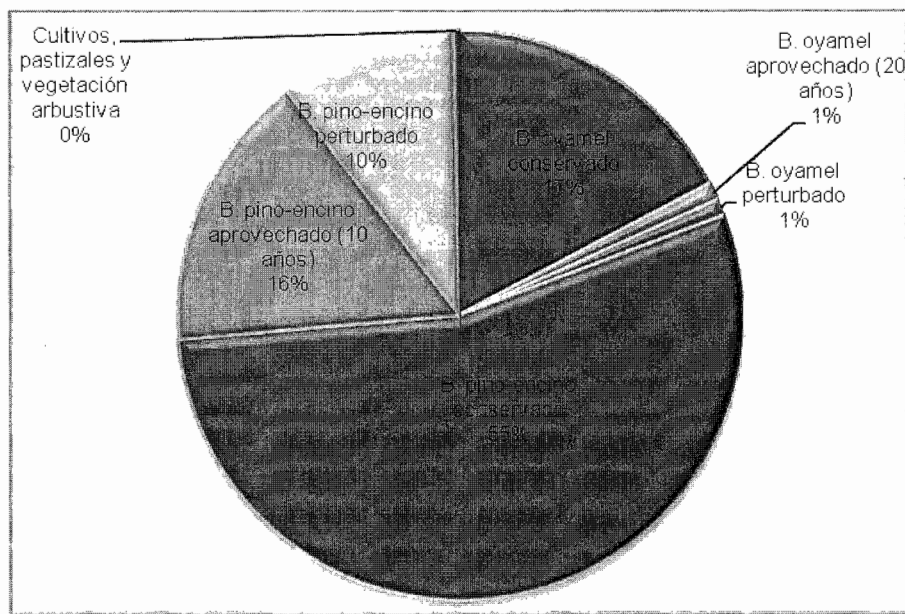


Figura 25. Proporción de CO₂ por tipo de cubierta del suelo en SJX

Los bosques mixtos representan un porcentaje mayor del total de las reservas de carbono en San Juan Xoconusco debido a que tienen mayor superficie. Sin embargo, al comparar el contenido de C por hectárea en los ecosistemas, es evidente que los bosques de oyamel localizados al norte de la comunidad contienen hasta el doble de carbono que los bosques de pino-encino localizados al sur (Figura 26).

RESERVORIOS DE CARBONO EN SAN JUAN XOCONUSCO

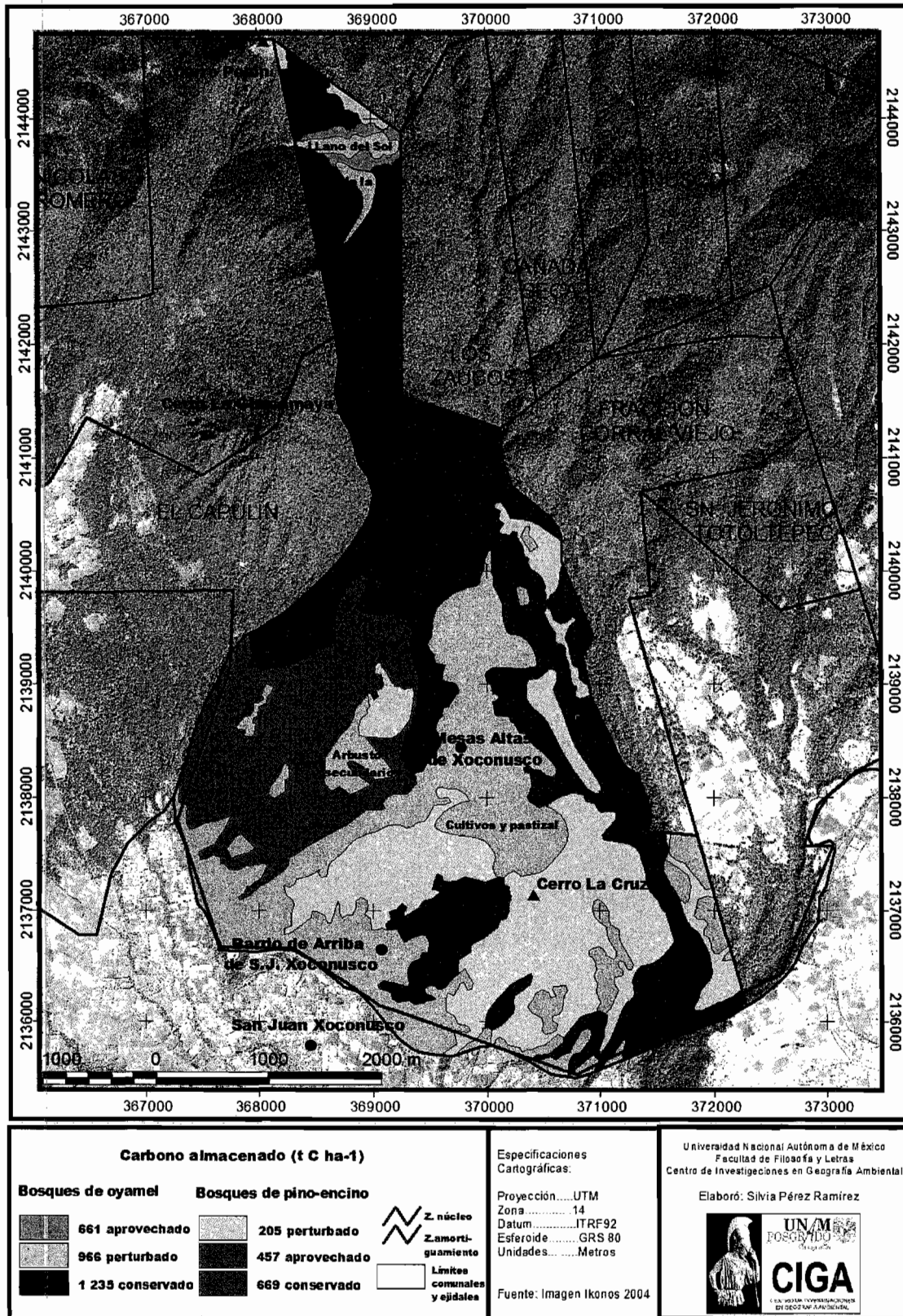


Figura 26. Distribución espacial de los reservorios de C: San Juan Xoconusco

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN

5.1. Carbono en biomasa

El error estándar del tamaño de las reservas de C en la biomasa total (aérea y subterránea) de los bosques de San Juan Xoconusco, varió entre 8 y 25%. Éste error se encuentra dentro del nivel aceptado, considerando que en los inventarios de carbono se admite 20% de error estándar para la biomasa aérea y 80% de error para la biomasa subterránea (MacDicken, 1997).

Algunos trabajos publicados a nivel internacional sobre C en la biomasa, muestran datos que varían entre 45 y 286 t C ha⁻¹ (Houghton et. al., 1991; Roy, 2001; Terradas, 2001; Bonan, 2002; Brown, 2002; Merino et. al., 2003; De Jong et. al., 2004; Law et al., 2004; Montero et. al., 2004; Bolstad & Vose, 2005; Madrigal et al., 2006; Peichl & Arain, 2006; Woodbury et. al., 2007). En esta investigación se calcularon entre 64 y 265 t C ha⁻¹ en la biomasa. Por lo tanto, los resultados obtenidos se encuentran dentro del intervalo reportado a nivel internacional pero son ligeramente mayores en comparación con datos publicados para bosques templados en México (menos de 215 t C ha⁻¹) (Ordóñez, 1999; INE-SEMARNAT, 2001; Etchevers et. al. 2002; Maser et. al. 2003). Es importante señalar que las investigaciones en bosques del país se han realizado principalmente en bosques con aprovechamiento y generalmente no han considerado la biomasa subterránea. De tal forma, el C en la biomasa de bosques aprovechados calculado en este trabajo (172 y 203), se ajusta mejor al intervalo reportado para bosques de México. Asimismo, el promedio de las reservas de C en los bosques perturbados de San Juan Xoconusco (71 y 158 t C ha⁻¹) se encuentra dentro del intervalo reportado en bosques secundarios del mundo (50 a 197 t C ha⁻¹) (Houghton et. al., 1991; Brown, 1992, Hopkins, 1999; Etchevers et. al., 2002; Sharma & Rai, 2007).

Con respecto a la variación de los datos, los bosques perturbados fueron más heterogéneos porque experimentaron distintos tipos de perturbación en diferentes tiempos. Dentro de los bosques de oyamel se muestrearon tres sitios con tala ilegal efectuada hace cuatro años y dos sitios con tala ilegal hace un año; y dentro de los bosques mixtos se muestrearon sitios con tala ilegal practicada a partir del año 2000.

A pesar de que los géneros *Pinus* y *Quercus* tienen mayor densidad de madera que el *Abies*, y que las latifoliadas presentan factores de expansión de biomasa aérea y subterránea más altos que las coníferas (IPCC, 2003b; De Jong et al. 2006), los bosques de oyamel contienen más carbono en la biomasa porque se encuentran en una etapa sucesional clímax, lo cual se refleja en el tamaño de los árboles, y porque en promedio son ligeramente más densos que los bosques mixtos (650 y 634 árboles por hectárea, respectivamente).

Los seis tipos de bosque analizados se clasificaron de acuerdo al factor manejo en: bosques conservados, bosques aprovechados y bosques perturbados. Sin embargo, hubo poca diferencia entre el bosque de oyamel conservado y el bosque de oyamel aprovechado. Esto revela que el C en la biomasa se puede recuperar al 80% en un período de 20 años pero cuando hay perturbación se pierde hasta 74% del C total. La tala clandestina y los incendios tienen un impacto inmediato en la reducción de biomasa, y por lo tanto, en las reservas de carbono (Kirschbaum, 2001; Munn, 2002).

5.2. Carbono en mantillo

El contenido de C en el mantillo de los bosques conservados y aprovechados de San Juan Xoconusco correspondió a un intervalo de 13 a 21 t C ha⁻¹, estos datos se ajustan a lo reportado por el IPCC (2003b) que indica que el promedio de C almacenado en el mantillo de bosques de coníferas es de 26 t C ha⁻¹ (10 a 48 t C ha⁻¹) y en bosques latifoliados corresponde a 16 t C ha⁻¹ (5 a 31 t C ha⁻¹). No obstante, el contenido de C en el mantillo de bosques perturbados (3 y 4 t C ha⁻¹) es relativamente menor al intervalo reportado. En los bosques de la comunidad, la cantidad de C en el mantillo está determinada por el tipo de vegetación. El mantillo de los bosques de pino-encino almacena casi el doble de C que el mantillo de los bosques de oyamel. Los bosques mixtos están constituidos por árboles caducifolios que aportan mayor cantidad de materia orgánica. Estos resultados concuerdan con lo documentado por el IPCC (2003b) con respecto a que el tipo de bosque tiene un impacto importante en la acumulación de mantillo además del efecto del régimen de manejo.

Según García y Masera (2004), en los bosques templados el C presente en la hojarasca es respirado en un periodo de ocho años, lo que explica la pérdida del 80% del C en el mantillo de bosques que fueron talados desde el año 2000. En los bosques perturbados la eliminación de la vegetación y los incendios tienen como consecuencia la desaparición del mantillo y esto también repercute en la reducción del carbono orgánico del suelo (Acosta et al., 2001; Bravo, 2007).

5.3. Carbono en suelo

El error estándar del tamaño de las reservas de C en los suelos de los bosques de San Juan Xoconusco, varió entre 58 y 216%. Éste error es mayor que el nivel aceptado, considerando que en los inventarios de C en el suelo el máximo error estándar aceptado corresponde a 40% (MacDicken, 1997). Únicamente el suelo del bosque mixto perturbado se encuentra dentro del error aceptado con 31.5%.

El IPCC (2003b) reporta valores para suelos volcánicos entre 70 y 130 t C ha⁻¹ dentro de los primeros 30 cm de profundidad. El contenido de COS promedio en los bosques de coníferas y latifoliadas en México corresponde a 65.5 t C ha⁻¹. De acuerdo al estudio de Segura et al. (2005) los ecosistemas localizados entre Michoacán y el Estado de México contienen entre 50 y 100 t C ha⁻¹ dentro de los primeros 20 cm de profundidad pero de acuerdo a Cruz et al. (2007), esta misma región contiene entre 150 y 1 600 t C ha⁻¹. Casi todos los datos publicados son menores a los que se presentan en este trabajo (102 a 972 t C ha⁻¹), con excepción de lo reportado por Cruz et al. (2007).

Existe una diferencia de 80 a 90% entre los valores publicados y los calculados en esta investigación. La causa es que la mayoría de los inventarios de carbono en el suelo consideran únicamente los primeros 30 cm de profundidad. En este caso para obtener el contenido de C en los suelos de San Juan Xoconusco se realizó la descripción completa de los perfiles (que tenían hasta 1.60 m de profundidad) (Ver Anexo 4) y se tomaron muestras de todos los horizontes con la finalidad de no subestimar los reservorios. Si bien en esta investigación se confirma que dentro de los primeros 20 cm se concentra entre 30 y 50% del COS (Anexo 4), de acuerdo a lo publicado por Jobbágy y Jackson (2000), es importante destacar que haciendo un análisis a poca profundidad se minimiza la importancia del suelo como

reservorio, se pierde mucha información y por lo tanto, se llega a conclusiones poco precisas.

Según Peña et al. (2009) los factores que determinan el contenido de C en el suelo son el clima y la perturbación, ellos reportan que el clima templado en la Sierra del Chichinautzin caracterizado por temperaturas medias entre 10 y 14°C y una marcada estacionalidad de precipitaciones (hasta 1200 mm), favorecen la acumulación de C en los suelos volcánicos. Por otro lado, Acosta et al. (2001) y Bravo (2007) dicen que la perturbación (deforestación e incendios) reduce las reservas de C en el suelo ya que al eliminar la vegetación también se elimina la aportación de materia orgánica al suelo. La superficie queda expuesta, se erosiona y el proceso de oxidación de los residuos orgánicos libera CO₂ convirtiendo al suelo en una fuente de C. En esta investigación se observaron los mismos efectos de la perturbación (por tala clandestina e incendios) en el C almacenado en el suelo.

En San Juan Xoconusco las diferencias en el carbono orgánico del suelo (COS) están influenciadas principalmente por el tipo de vegetación y secundariamente por la condición de manejo. Los bosques de oyamel contienen casi tres veces más C en el suelo que los bosques mixtos. Y los bosques conservados almacenan entre 20 y 70% más C que los bosques aprovechados y perturbados.

Al norte de SJX, a más de 2 800 m de altitud, existe un clima semifrío subhúmedo con un relieve montañoso de origen volcánico sobre el que se encuentran los bosques de *Abies*. Estas características definen la presencia de suelos tipo Umbrisol. La biomasa forestal y la baja tasa de descomposición (influenciada por bajas temperaturas) incrementan el COS acumulado en el suelo (FAO, 2000; Jandl, 2001). Por otro lado, al sur de la comunidad, en altitudes menores a 2 700 m hay un clima templado subhúmedo con un relieve volcánico de lomeríos altos y bajos en donde se encuentran los bosques de *Pinus-Quercus* sobre Andosoles. De acuerdo a lo publicado por Bravo (2007) y por el IPCC (2003b), los contenidos de carbono son mayores en los Umbrisoles que en los Andosoles. Los primeros contienen hasta 200 t C ha⁻¹ a 30 cm de profundidad, mientras que los segundos contienen 130 t C ha⁻¹.

En San Juan Xoconusco los Umbrisoles tienen entre 10 y más de 30% de carbono orgánico mientras que los Andosoles presentan entre 7 y 20% de COS. En ambos tipos de suelo existe una relación directamente proporcional entre el espesor de los horizontes y el contenido total de C pero hay una relación inversamente proporcional entre la densidad aparente y el porcentaje de carbono, es decir, a menor densidad en los horizontes superficiales mayor contenido de C. El volumen ocupado por rocas también reduce la cantidad de COS.

Dentro de los bosques de pino-encino el COS en bosques conservados es 73% mayor que en bosques perturbados y 19% mayor que en bosques aprovechados. Es importante señalar que el suelo predominante en los bosques conservados y aprovechados de pino-encino, es el Andosol en contraste, en los bosques perturbados predomina el Luvisol. Según el IPCC (2003b) los Luvisoles contienen entre 38 y 88 t C ha⁻¹ (1.4 veces menos carbono que los Andosoles). Dentro de los bosques de oyamel existen diferencias poco significativas entre el COS en bosques conservados y perturbados. Esto se explica porque la perturbación (en este caso por tala clandestina) tiene menos de cuatro años y en este periodo, los procesos de oxidación no han provocado gran pérdida de C además, el suelo no ha experimentado una fuerte erosión que sea capaz de eliminar las reservas. Según García y Masera (2004) cuando se presenta la deforestación los cambios en el contenido de carbono en el suelo se observan después de siete u once años.

Cuando el bosque conservado se deforesta, en cuatro años el suelo pierde el 8% del COS pero en 20 años la pérdida aumenta hasta 54%. Por ello, es preocupante el efecto del aprovechamiento en el suelo puesto que después de dos décadas este reservorio ha perdido más de la mitad del C original y para recuperarlo tendrán que pasar cientos o miles de años (FAO, 2000; Vergara et al., 2004).

5.4. Magnitud total de los reservorios

La magnitud de C en los bosques de San Juan Xoconusco varió entre 205 y 1 235 t C ha⁻¹. Estos valores rebasan hasta entre 70 y 80% a los datos publicados en otras investigaciones (302 a 360 t C ha⁻¹) (Houghton et al., 1991; Brown, 1992; Law et al., 2004; Montero et. al., 2004, Bolstad y Vose, 2005; Madrigal et. al., 2006). Únicamente el promedio de las reservas en el bosque mixto conservado

calculado en este trabajo es igual a lo reportado por Sharma y Rai (2007) para bosques templados (669 t C ha^{-1}).

En San Juan Xoconusco, el factor vegetación tiene un efecto principal en la magnitud total de C almacenado en los bosques, seguido del factor manejo. Considerando la suma de los reservorios (biomasa, mantillo y suelo) en los bosques de la comunidad, se concluye que el suelo tiene mayor influencia en el contenido total de C. Los resultados indicaron que el suelo constituye el reservorio más grande pues acumula dos tercios del C total mientras que la biomasa únicamente almacena un tercio.

Los bosques de oyamel contienen hasta el doble de carbono que los bosques de pino-encino. La cantidad de C en el bosque de oyamel aprovechado hace 20 años es similar a la cantidad almacenada en el bosque mixto conservado, la diferencia es sólo de 8 t C ha^{-1} . De la magnitud total de carbono almacenada en los reservorios de San Juan Xoconusco ($810\,083 \text{ t C}$ equivalentes a 2.9 Mt CO_2), 19% se encuentra en los bosques de oyamel y 81% en los bosques de pino-encino debido a que lo últimos ocupan mayor superficie en la comunidad (91% del área total).

El programa de manejo forestal de la comunidad de San Juan Xoconusco establece que se deben mitigar, restaurar y controlar los impactos ambientales negativos atribuibles a la realización y operación del aprovechamiento a través de varias medidas de prevención (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 1996). Sin embargo, se han presentado incendios, existe degradación y erosión del suelo, pastoreo poco controlado y falta vigilancia para evitar la tala clandestina. Por lo anterior, es muy evidente el efecto del aprovechamiento en la reducción del C tanto en la biomasa como en el mantillo y el suelo.

5.5. Distribución espacial de los reservorios de C

En San Juan Xoconusco la distribución espacial de los reservorios de carbono está determinada en primer lugar por el tipo de vegetación y en segundo lugar por la condición de manejo. Otras investigaciones reportan que además de la perturbación y de la composición de especies arbóreas, los factores que limitan el

potencial de captura y almacenamiento de C son el tipo de clima y el tipo de suelo (Jandl, 2001; Terradas 2001; Zhang y Justice, 2001; Vergara et. al., 2004; Bravo, 2007; Peña et al., 2009). Sin embargo, para saber cuáles son los factores ambientales que determinan el potencial de almacenamiento de C en los bosques de San Juan Xoconusco, se tendría que hacer un análisis multivariado.

El bosque de oyamel, tiene mayor potencial de captura que el bosque de pino-encino, y dentro de ambos, los bosques conservados y aprovechados tienen mayor capacidad de almacenamiento de C que los bosques perturbados. El patrón espacial de los reservorios de carbono en San Juan Xoconusco se define en función de lo siguiente:

La magnitud de carbono es mayor en los bosques de oyamel localizados al norte de la comunidad. Estos ecosistemas se encuentran en una etapa sucesional clímax y han absorbido y acumulado CO₂ durante más tiempo. La magnitud de los reservorios es mayor en un clima más frío porque retarda las tasas de descomposición de la materia orgánica. A mayor altitud, el clima es semifrío subhúmedo y permite el desarrollo de especies de *Abies* y *Cupressus* que asociadas al tipo de roca ígnea, permiten el desarrollo de suelos tipo Umbrisol caracterizados por almacenar gran cantidad de materia orgánica. Dentro de estos ecosistemas es evidente el efecto del manejo pues el tamaño de los reservorios es mayor en los bosques conservados que en los perturbados.

Hay menos carbono en los bosques de pino-encino localizados al sur de la comunidad. La magnitud de los reservorios en estos ecosistemas es menor porque se encuentran en un clima templado subhúmedo, con temperaturas más altas. La radiación solar penetra más en los bosques perturbados y aprovechados fomentando la descomposición de la materia orgánica y la liberación de CO₂. La relación entre litología (domos dacíticos y depósitos de flujos piroclásticos) y vegetación favorece el desarrollo de suelos tipo Andosol en lomeríos y suelos tipo Luvisol en el piedemonte. Es importante mencionar que al sureste de SJX en los bosques perturbados hay evidencias de erosión del suelo e incluso algunas áreas han perdido el horizonte orgánico, lo cual repercute en la reducción de las reservas de C.

Por otro lado, los cambios en las cubiertas del suelo también determinan el patrón espacial de los reservorios y afectan los flujos de CO₂ entre los ecosistemas y la atmósfera. Considerando que la tasa de recuperación en la comunidad corresponde a 0.012% (Ramírez et. al., 2007; Zubieta, 2007), se puede decir que aproximadamente se capturan 1.4 t C año⁻¹ equivalentes a 5.3 t CO₂ año⁻¹. Sin embargo, la tasa de deforestación es de 0.02% (Ramírez et. al., 2007; Zubieta, 2007), la cual representa una pérdida de 5.3 t C año⁻¹ y se traduce en una emisión de 19.4 t CO₂ año⁻¹ a la atmósfera. La pérdida de carbono por deforestación en San Juan Xoconusco (5.3 x 10⁻⁶ Mt C año⁻¹) es mínima comparada con la calculada a nivel nacional (entre 51.4 y 71.0 Mt C año⁻¹) (Maser, 1995; De Jong et al., 2000).

5.6. Políticas de mitigación de CO₂

Es un error que las políticas de mitigación del calentamiento global se enfoquen principalmente en la conservación e incremento de carbono en la biomasa puesto que el suelo representa el reservorio más grande en los ecosistemas templados. La justificación de las políticas es porque la tasa de intercambio del CO₂ entre la atmósfera y la vegetación es más rápida comparada con la tasa de intercambio entre la atmósfera y el suelo (Kirschbaum, 2001). Sin embargo, es fundamental la conservación y restauración de los suelos porque cuando se erosionan liberan enormes cantidades de CO₂ y tardan cientos de años en recuperar su contenido inicial de C. De acuerdo con Vergara et al. (2004), las estrategias de captura de C deberían ser más integrales ya que las prácticas que aumentan la producción de biomasa y evitan la erosión del suelo son más efectivas para incrementar los sumideros.

Ante la problemática socioeconómica de la comunidad, deben aplicarse varias estrategias que permitan mejorar la calidad de vida de la población y, al mismo tiempo, preservar los recursos naturales dentro de la RBMM. Una estrategia es fomentar el pago por los servicios ambientales ofrecidos por el bosque. El pago por captura de CO₂ a través del manejo forestal comunitario constituye una opción de ingreso para San Juan Xoconusco si se integra al esquema definido por la nueva política denominada "*Reduced Emissions from Deforestation and Degradation in Developing Countries*" (Murdiyarso y Skutsch, 2006; Banskota et al., 2007). Otra opción es solicitar a CONAFOR un apoyo para desarrollar un

proyecto de captura de carbono a través de forestación o reforestación en áreas que no tenían bosque antes de 1990. Este proyecto deberá basarse en los criterios del MDL bajo la actual política del Protocolo de Kyoto. En este contexto, las opciones de manejo que podría considerar la comunidad de San Juan Xoconusco son tres:

1. Reducir las tasas de deforestación y perturbación en los bosques conservados dentro de la zona núcleo de la RBMM. Para ello requiere establecer un sistema de vigilancia principalmente en los límites con la comunidad Nicolás Romero. A través de la política REDD.
2. Mejorar el programa de aprovechamiento forestal y orientarlo a la captura de carbono. Es necesario medir y monitorear los reservorios con la finalidad de demostrar la efectividad de las prácticas de manejo. A través de la política REDD.
3. Restaurar los ecosistemas perturbados a través de la forestación o reforestación y de la restauración de los suelos. A través del programa Pro-Árbol de la CONAFOR delimitado por el MDL.

No obstante, para elegir el proyecto más efectivo de captura de carbono y más rentable para la comunidad de San Juan Xoconusco deberá realizarse un análisis de costo-beneficio, considerando variables tanto socioeconómicas como ambientales.

Finalmente, considerando que el pago por tonelada de CO₂ capturada en los ecosistemas equivale a 10 dólares (IPCC, 2000; Stavins & Richards, 2005, Argüello, 2006), el valor de las reservas del bosque de oyamel conservado correspondería a \$13 200 dólares por hectárea, mientras que el valor de las reservas del bosque de mixto conservado correspondería a \$11 800 dólares por hectárea. Por otro lado, se puede decir que las reservas de C en los bosques perturbados tienen un valor aproximado de \$1 900 dólares por hectárea. Si el actual esquema de manejo se orienta a la captura de carbono, en 10 años este valor podría triplicarse (\$6 300 dólares por hectárea). El pago por el servicio ambiental de captura de carbono representaría un beneficio económico adicional para la población además de otorgar otros beneficios ambientales para la región como: preservación de biodiversidad, conservación de mantos acuíferos, protección del suelo y mitigación del cambio microclimático.

CONCLUSIONES

Los reservorios forestales de carbono son fundamentales en las políticas de mitigación del cambio climático global porque almacenan dos veces más carbono que la atmósfera y constituyen el tercer sumidero en el planeta después del océano y las rocas.

La magnitud y distribución de los reservorios de carbono en San Juan Xoconusco están determinadas en primer lugar por el tipo de vegetación y en segundo lugar por la condición de manejo.

En la comunidad indígena San Juan Xoconusco, el bosque de oyamel tiene mayor potencial de captura de carbono que el bosque de pino-encino. Los bosques conservados y aprovechados presentan mayor capacidad de almacenamiento que los bosques perturbados. El suelo constituye el reservorio más grande en los bosques templados pues acumula dos tercios del C total mientras que la biomasa sólo almacena un tercio.

El bosque de oyamel conservado almacenó dos veces más carbono ($1\ 235\ \text{t C ha}^{-1}$) que el bosque de oyamel aprovechado ($661\ \text{t C ha}^{-1}$) y 1.3 veces más que el bosque de oyamel perturbado ($966\ \text{t C ha}^{-1}$). El bosque de pino-encino conservado almacenó tres veces más C ($669\ \text{t C ha}^{-1}$) que el perturbado ($205\ \text{t C ha}^{-1}$) y casi dos veces más C que el bosque aprovechado ($457\ \text{t C ha}^{-1}$). Lo anterior demuestra que a mayor perturbación, la magnitud de carbono es menor. Los bosques de oyamel acumulan el doble de C que los bosques de pino-encino.

Los resultados de esta investigación sirven para aumentar la lista de servicios ambientales que ofrece el área natural protegida de la RBMM. La base de datos generada en este trabajo es importante porque a partir de ella será posible construir una línea base de almacenamiento de C en la comunidad. La cartografía elaborada constituye una herramienta estratégica para definir los sitios en los que se podrán aplicar distintas opciones de captura de C.

El pago por captura de CO₂ a través del manejo forestal comunitario, constituye una posibilidad de ingresos adicionales para la población de San Juan Xoconusco, y puede realizarse bajo el esquema de “Reduced Emissions from Deforestation and Degradation in Developing Countries”. No obstante debe realizarse un análisis de costo-beneficio para evaluar la rentabilidad del proyecto.

Se recomienda que en investigaciones futuras se haga un análisis de todas las variables ambientales (no sólo del tipo de vegetación y la condición de manejo), el cual permita conocer los factores que determinan el potencial de almacenamiento de C en los bosques de SJX. Se recomienda construir una línea base de captura de C, con la finalidad de predecir la variación que experimentarán los reservorios a corto plazo en función del tipo de manejo y del cambio de uso del suelo. Por otro lado, el establecimiento de una red comunitaria de monitoreo de los reservorios es muy importante para demostrar la captura de C por lo tanto, se recomienda instalar un sistema de medición de los sumideros que sea de bajo costo. Finalmente se recomienda examinar variables sociales, económicas y ambientales para evaluar la efectividad de un proyecto de captura de carbono en la comunidad.

ANEXOS

Anexo 1. Comparación sobre contenido de carbono en bosques templados

VEGETACIÓN	B. aérea t C ha ⁻¹	B. subterránea t C ha ⁻¹	Mantillo t C ha ⁻¹	Suelo t C ha ⁻¹	Total t C ha ⁻¹	FUENTE	
BOSQUE TEMPLADO	191		5	472	669	Sharma & Rai, 2007	
	182	9			191		
	91-135					Woodbury et al., 2007	
	152			182	334	Bolstad & Vose, 2005	
					72-162	de Jong et al., 2004	
	164			118	282	Law et al., 2004	
	197			142	339		
	129			112	241		
	182			128	310		
					220	Broadmeadow y Matthews, 2003	
					190-320	Masera et al., 2003	
	103			122	225		
	50-150					Brown, 2002	
	75-175					Brown, 2002	
	157	64			221	INE-SEMARNAT, 2001	
					165	Jandl, 2001	
			1.5	10.6			
					193	IPCC, 2000	
	135	151			286	de Jong et al., 1997 en Ordóñez, 1999	
	90	120			210	Nilsson, 1995 en Ordóñez, 1999	
	123			134	257	Nilsson & Schopfhauser, 1995 en Ordóñez, 1999.	
	99	74			173	Kojima, 1998	
	201	34				Andersson, 1971 en Cairns et al., 1997	
	117-313	37-78				Comeau & Kimmins, 1989 en Cairns et al., 1997	
	130	36				Cox et al., 1998 en Cairns et al., 1997	
	121	35				Duvigneaud & Galoux, 1981 en Cairns et al., 1997	
	386-430	93-99				Edmonds, 1980 en Cairns et al., 1997	
	109-138	33-34				Harris & Henderson, 1981 en Cairns et al., 1997	
	222	36				Jakucs, 1981 en Cairns et al., 1997	
	248-467	57-89				Keyes & Grier, 1981 en Cairns et al., 1997	
	93	22				Kinerson et al., 1977 en Cairns et al., 1997	
	53				100	153	Masera et al., 1997
	62-164	17-49				Ovington, 1962 en Cairns et al., 1997	
128	76				Satcehil, 1981 en Cairns et al., 1997		
231	51				Van Cleve, 1981 en Cairns et al., 1997		
153				107	260	Houghton et al., 1991	
100				111	211	Houghton et al., 1991	
Promedio	165	59	3	145	260		

Anexo 2. Comparación sobre contenido de carbono en bosques de pino, encino y bosques secundarios

VEGETACIÓN	B. aérea t C ha ⁻¹	B. subterránea t C ha ⁻¹	Mantillo t C ha ⁻¹	Suelo t C ha ⁻¹	Total t C ha ⁻¹	FUENTE
BOSQUE DE PINO	255	40			297	Madrigal et al., 2006
	281	43			327	
	286	44			336	
	99	19	12	37	167	Peichl & Arain, 2006
					169-180	de Jong et al., 2004
	278.7	81			360	Montero et al., 2004
	47-120			27-65	185	Merino et al., 2003
	21			213	234	Bonan, 2002
	138			36	171	Roy, 2001
				22.8		Jobbágy & Jackson, 2000
	120			156	276	de Jong et al., 1997 en Ordóñez, 1999
	99			120	180	Masera y Ordóñez, 1997 en Ordóñez, 1999
	225			121	346	Nabuurs, 1993 en Ordóñez, 1999
	136			81	217	
	145			91	236	Ordóñez, 1999
	74			94	217	
	79			100	179	Masera, 1997
	202			59	261	Breymeyer et al. 1996
	60			120	180	Masera, 1995
					285	Flint & Richards, 1994
				175	Salisbury & Ross, 1992	
				142	Svirezhev, 1992 en Brown, 1992	
	168			134	302	Houghton et al., 1991
Promedio	149	45	12	99	236	
BOSQUE DE ENCINO	78	26			104	Montero et al., 2004
	52	43			95	Etchevers et al. 2002
					135	Terradas, 2001
					284	
					208	
				20		Jobbágy & Jackson, 2000
	69	120			162	Masera y Ordóñez, 1997 en Ordóñez, 1999
	53	100			153	Masera, 1997
	42	120			162	Masera, 1995
					210	Salisbury & Ross, 1992
205	103			307	Ito y Oikawa, 1992 en Brown, 1992	
Promedio	83	85		20	182	
BOSQUE SECUNDARIO	81	5			86	Sharma & Rai, 2007
	30			169	199	Etchevers et al. 2002
					50	Hopkins, 1999
					197	Gutiérrez y Lopera, 1992 en Brown, 1992
	19			53	90	Peng et al. 1992 en Brown, 1992
					50	Salisbury & Ross, 1992
					150	Svirezhev, 1992 en Brown, 1992
55			69	124	Houghton et al., 1991	
Promedio	46	5		97	118	

Anexo 3. Contenido de carbono en los bosques templados de México

Estado	Comunidad Vegetal	Contenido de C (t C ha ⁻¹)			Fuente
		Vegetación	Suelo	Total	
Chiapas	B. pino-encino	135-194			de Jong et al., 1995
Durango	B. pino	51			Pimienta et al., 2007
Jalisco	B. pino-encino	88-157	32-95		INE-SEMARNAT, 2001
Michoacán	B. pino	74	94	168	Ordóñez, 1999
	B. oyamel	57 (12-105)			Fragoso, 2003
	B. pino	19 (11-43)			
	B. encino	22 (16-38)			
	B. mixto	69 (13-128)			
	B. mixto	85			Zamora, 2003
	B. mixto	79			Navia y Velarde, 2002 en Fragoso, 2003
	B. pino		14-31		Luis et al., 2007
B. pino			184-215	INE-SEMARNAT, 2001	
Nuevo León	B. pino	45			Domínguez et al., 2007 en Pimienta et al., 2007
Oaxaca	B. encino	52	45	97	Acosta et al., 2001 y Acosta et al., 2002
	B. perturbado	14	120	134	
Querétaro	B. encino-pino	49-133			Manzano y Hernández, 2008
Tlaxcala	B. pino	76			Peño del Valle, 2003
	B. pino-encino	107			
	B. oyamel	152			

Anexo 4. Variables utilizadas para calcular el contenido de C en los suelos muestreados

Sitio	Horizonte	C (%)	DA (gr cm ⁻³)	Espesor (cm)	Rocas (vol. %)	t C ha ⁻¹	% del C total
1	Oe	22.65	0.32	10.00	1.00	71.79	45.81
	Ah	15.06	0.49	12.50	50.00	46.46	29.65
	C	10.23	0.71	35.50	85.00	38.45	24.54
Total						156.70	100.00
2	Oe	42.10	0.23	7.00	0.00	66.64	10.18
	Ah	20.70	0.99	15.50	20.00	254.67	38.89
	C1	12.15	0.72	37.50	30.00	228.84	34.95
	C2	11.51	0.76	20.00	40.00	104.67	15.98
Total						654.82	100.00
3	Oe	24.26	0.29	5.00	0.00	34.64	7.29
	Ah	10.44	0.96	23.00	10.00	207.34	43.62
	Bh	6.98	0.57	37.00	30.00	102.35	21.53
	C	5.07	1.12	46.00	50.00	131.03	27.56
Total						475.36	100.00
4	Oe	20.86	0.42	5.00	10.00	39.26	7.49
	Ah	15.36	0.65	25.00	15.00	212.96	40.63
	AC	10.74	1.00	28.00	30.00	210.82	40.22
	C	6.40	0.50	38.00	50.00	61.11	11.66
Total						524.15	100.00
5	Ah1	18.22	0.16	10.00	0.00	29.14	7.83
	Ah2	11.59	0.72	10.00	5.00	79.54	21.38
	Bh	12.45	0.83	20.00	10.00	185.61	49.90
	BC	6.86	0.63	16.00	15.00	58.53	15.73
	C	2.78	1.23	7.00	20.00	19.18	5.16
Total						372.01	100.00
6	Oe	30.79	0.51	6.00	0.00	94.81	22.87
	Ah	17.76	0.84	20.00	20.00	237.56	57.31
	C	6.89	0.95	25.00	50.00	82.14	19.82
Total						414.51	100.00
7	Oe	33.87	0.14	9.00	0.00	43.38	18.49
	Ah1	8.82	0.39	4.00	0.00	13.65	5.82
	Ah2	8.30	0.68	23.00	30.00	90.98	38.79
	C1	5.78	0.50	24.00	20.00	55.98	23.86
	C2	3.55	0.72	20.00	40.00	30.59	13.04
Total						234.57	100.00
8	Oe	37.13	0.23	10.00	0.00	86.37	22.66
	Ah1	15.63	0.62	10.00	5.00	91.43	23.99
	Ah2	7.06	0.60	8.00	10.00	30.68	8.05
	B	5.80	0.58	16.00	10.00	48.11	12.62
	BC	6.13	0.69	23.50	20.00	79.52	20.86
	C	3.18	0.62	28.50	20.00	45.01	11.81
Total						381.12	100.00
9	Oe	46.41	0.28	5.50	0.00	70.65	16.45
	Ah1	12.83	0.70	18.50	0.00	165.78	38.60
	Ah2	6.62	0.58	23.00	20.00	70.90	16.51
	AC	4.00	0.81	33.00	10.00	95.66	22.27
	C1	1.42	1.11	10.00	40.00	9.49	2.21
	C2	0.91	1.24	30.00	50.00	17.00	3.96
Total						429.48	100.00
10	Oe	40.93	0.12	4.00	0.00	18.94	8.41
	Ah1	8.05	0.60	9.00	0.00	43.47	19.29
	Ah2	5.23	0.75	6.00	15.00	20.05	8.90
	AB	3.88	0.70	35.00	25.00	71.34	31.66
	Bw	1.16	1.04	56.00	35.00	44.07	19.56
	Cw	0.98	0.93	29.00	25.00	19.82	8.80
	C	0.66	0.83	35.00	60.00	7.60	3.37
Total						225.29	100.00
11	Oe	33.69	0.17	3.00	0.00	17.32	7.43
	Ah1	18.54	0.54	2.00	5.00	19.02	8.16

	Ah2	8.00	0.68	7.00	10.00	34.30	14.72
	Bw1	4.00	1.12	21.00	20.00	75.23	32.28
	Bw2	1.41	1.17	37.00	30.00	42.48	18.23
	BC	1.86	1.25	20.00	20.00	37.26	15.99
	C	0.28	1.30	40.00	50.00	7.40	3.18
Total						233.03	100.00
12	Oe	36.97	0.75	8.00	3.00	213.99	22.89
	Ah1	10.10	1.02	22.00	5.00	215.92	23.10
	Ah2	7.60	1.01	34.00	5.00	249.06	26.64
	Bw	4.78	0.94	27.00	10.00	109.36	11.70
	C	3.62	1.23	47.00	30.00	146.48	15.67
Total					934.81	100.00	
13	Ah1	18.45	0.87	23.00	15.00	312.44	34.14
	Ah2	10.04	1.29	27.00	10.00	313.51	34.26
	AC	6.80	1.13	50.00	25.00	286.91	31.35
	C	0.98	1.13	42.00	95.00	2.33	0.25
Total					915.18	100.00	
14	Ah1	17.33	1.16	30.00	5.00	573.20	49.99
	Ah2	9.21	1.04	19.00	10.00	163.26	14.24
	AB1	6.87	1.17	38.00	30.00	213.07	18.58
	AB2	7.07	1.07	28.00	30.00	148.12	12.92
	C	2.86	1.43	20.00	40.00	49.04	4.28
Total					1146.69	100.00	
15	Ah1	14.92	1.03	30.00	5.00	439.18	39.17
	Ah2	10.36	0.93	100.00	30.00	675.32	60.23
	C	2.38	0.93	30.00	90.00	6.65	0.59
Total					1121.15	100.00	
16	Ah1	16.30	1.17	27.00	5.00	487.18	50.04
	Ah2	10.56	1.20	21.00	10.00	239.10	24.56
	AC	6.43	0.78	25.00	20.00	100.09	10.28
	C	2.46	1.08	79.00	30.00	147.29	15.13
Total					973.65	100.00	
17	Ah1	8.80	0.74	10.00	3.00	63.42	13.04
	Ah2	7.72	0.73	22.50	3.00	123.25	25.34
	Bw	5.18	0.78	43.50	5.00	167.47	34.43
	C1	2.33	0.86	54.00	10.00	97.13	19.97
	C2	2.12	0.66	36.00	30.00	35.14	7.22
Total					486.40	100.00	
18	Ah1	8.33	0.96	44.00	0.00	351.75	31.78
	Ah2	6.53	0.99	35.00	10.00	203.98	18.43
	AC	12.48	1.07	39.00	5.00	493.21	44.56
	C	4.08	0.98	17.00	15.00	57.91	5.23
Total					1106.85	100.00	
19	Oe	23.47	0.32	7.00	0.00	52.85	8.98
	Ah	12.05	0.59	23.00	10.00	146.19	24.85
	AC	8.19	1.07	40.00	5.00	332.43	56.50
	C	1.33	0.92	58.00	20.00	56.94	9.68
Total					588.41	100.00	
20	Ah1	16.89	0.99	60.00	10.00	902.55	53.02
	Ah2	14.21	1.13	60.00	20.00	773.89	45.46
	AC	1.53	1.13	30.00	50.00	25.96	1.53
Total					1702.39	100.00	
21	Ah1	18.75	0.49	9.00	5.00	78.74	12.13
	Ah2	14.99	0.90	19.00	3.00	248.69	38.32
	Bh	8.26	0.80	16.00	0.00	105.36	16.24
	BC	4.58	0.77	10.00	3.00	34.18	5.27
	C1	2.34	1.19	32.00	10.00	80.41	12.39
	C2	1.93	1.00	66.00	20.00	101.55	15.65
Total					648.92	100.00	
22	Ah	7.44	0.98	22.50	5.00	156.19	58.78
	AB	2.34	0.76	17.50	5.00	29.78	11.21
	Bw	1.13	1.10	20.00	10.00	22.22	8.36

	BC	2.11	1.07	14.00	5.00	30.08	11.32
	Cw	1.47	0.96	16.00	15.00	19.15	7.21
	C1	0.34	0.83	18.50	20.00	4.19	1.58
	C2	0.28	0.74	28.50	30.00	4.12	1.55
Total						265.72	100.00
23	Ah	15.49	0.45	10.00	0.00	69.11	34.02
	AB	3.19	1.19	35.50	10.00	121.84	59.97
	C	0.12	1.58	78.50	15.00	12.22	6.01
Total					203.16	100.00	
24	Ah	36.78	0.50	10.00	0.00	183.41	34.79
	AB	6.69	1.18	20.00	3.00	152.52	28.93
	Bw1	3.98	1.04	27.00	3.00	108.31	20.54
	Bw2	2.71	1.05	16.00	3.00	44.09	8.36
	AC	1.04	1.37	39.00	30.00	38.91	7.38
Total					527.24	100.00	
25	Ah	19.00	0.88	12.00	5.00	190.67	59.76
	AC	2.07	1.08	40.00	10.00	80.74	25.31
	C	1.63	1.45	27.00	25.00	47.64	14.93
Total					319.05	100.00	
26	Bt1	0.60	0.76	29.00	5.00	12.63	74.92
	Bt2	0.08	0.86	41.00	5.00	2.66	15.77
	BC	0.05	0.79	55.00	30.00	1.57	9.31
Total					16.85	100.00	
27	AB	4.78	0.26	9.00	0.00	11.40	12.57
	Bw	4.77	0.53	24.00	5.00	57.83	63.74
	C1	0.59	0.61	51.50	10.00	16.66	18.36
	C2	0.16	0.68	53.50	15.00	4.83	5.33
Total					90.72	100.00	
28	AC	5.71	0.23	3.00	10.00	3.51	6.13
	Cw	1.24	0.98	33.00	15.00	34.14	59.70
	C1	0.27	1.43	24.00	15.00	7.92	13.85
	C2	0.16	1.44	54.00	5.00	11.62	20.32
Total					57.19	100.00	
29	Ah	12.48	0.20	1.00	0.00	2.50	1.36
	Bw1	6.28	1.14	5.50	5.00	37.28	20.29
	Bw2	2.58	1.21	23.50	5.00	69.87	38.04
	BC	1.23	1.10	30.00	10.00	36.58	19.91
	C1	0.36	1.44	39.00	20.00	16.06	8.74
	C2	1.77	1.57	11.00	30.00	21.42	11.66
Total					183.71	100.00	
30	Ah	23.58	0.48	9.00	5.00	97.14	59.52
	AC	1.22	1.42	32.00	10.00	49.71	30.46
	C	0.19	1.72	52.00	5.00	16.34	10.02
Total					163.19	100.00	

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M., J.D. Etchevers, C. Monreal, K. Quednow y C. Hidalgo. 2001. Un método para la medición del carbono en los compartimentos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas agroforestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de Octubre del 2001, Valdivia-Chile.
- Acosta, M., K. Quednow, J. Etchevers y C. Monreal. 2002a. 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
- Acosta, M., J. Vargas, A. Velázquez y J.D. Etchevers. 2002b. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Altamirano, L. 2009. Unidades ambientales del complejo Pelón-Cacique, Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca: Estado de conservación y tendencia. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. División de Ciencias y Humanidades. Facultad de Biología. 94 pp.
- Antonio, J. 1999. Donato Guerra Monografía Municipal. Gobierno del Estado de México. Instituto Mexiquense de Cultura. Toluca. En <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/mexico/mpios/15032a.htm>
- Argüello, M.R. 2006. Potencial del Mecanismo de Desarrollo Limpio en las plantaciones forestales de Panamá. Tesis de Posgrado en Socioeconomía Ambiental. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 106 pp.
- Bautista, F., H. Delfín, J.L. Palacio y M. C. Delgado. 2004. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. SEMARNAT, INE, UNAM, UAdY, CONACYT. México. 507pp.
- Bocco, G., M.E. Mendoza, A. Velázquez y A. Torres. 1999. La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. *Investigaciones Geográficas. Boletín* 40: 7-22.
- Bolstad, P.V. & J.M. Vose. 2005. Forest and Pasture Carbon Pools and Soil Respiration in the Southern Appalachian Mountains. *Forest Science* 51(4): 372- 383.
- Bonan, G. 2002. *Ecological climatology concepts and applications*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.
- Bravo, F. 2007. El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático. Fundación Gas Natural. Barcelona. 315 pp.

- Broadmeadow, M. & R. Matthews. 2003. Forest, Carbon and Climate Change: the UK Contribution. Forestry Commission En: www.forestry.gov.uk/forest_research/
- Brown, S. 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forest. FAO. Rome. 89 pp.
- Brown, S. 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environmental Pollution 116: 363-372.
- Cairns, M.A., S. Brown, E.H. Helmer y G.A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecología 111:1-11.
- Capra, L., J.L. Macías y V.H. Garduño. 1997. The Zitácuaro Volcanic Complex, Michoacán, Mexico: magmatic and eruptive history of a resurgent caldera. Geofísica Internacional 36(3): 161-179.
- CICC. 2007. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. SEMARNAT. México. 157 pp.
- Cruz, C., J. Etchevers, C. Balbontin y F. Paz. 2007. Distribución del carbono orgánico en los suelos de México. Ciego, INEGI, Ecosur. 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. 2000. Carbon flux and patterns of land-use/land-cover change in the Selva Lacandona, México. Ambio 29(8): 504-511.
- De Jong, B.H.J, O. Masera y T. Hernández. 2004. Opciones de captura de carbono en el sector forestal. En: Cambio climático: una visión desde México. J. Martínez y A. Fernández (compiladores). INE-SEMARNAT. México. 369-380.
- De Jong, B., O. Masera, J. Etchevers, R. D. Martínez (Coords.). 2006. F. Paz, M. Olguín, C. Anaya, C. Balbontín, M. Motolinia y G. Guerrero. Inventario Nacional de gases de efecto invernadero 1993 a 2002. Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Bosques. ECOSUR, CIECO-UNAM, COLPOS, INE, PNUD.
- Diario Oficial de la Federación. 2000. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Decreto. En: <http://www.conanp.gob.mx/sig/decretos/reservas/Monarca.pdf>
- Diario Oficial. 2007. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Acuerdo por el que se expiden las Reglas de Operación del Programa Pro-Árbol de la Comisión Nacional Forestal. En: <http://www.conanp.gob.mx/sig/decretos/>

- Etchevers, J., C. Monreal, C. Hidalgo, M. Acosta, J. Padilla y R. López. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. México.
- FAO. 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. FAO. Roma. 98 pp.
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. FAO. Roma. 61 pp.
- FAO. 2004. Assesing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration throughn land-use changes. FAO. Rome. 166 pp.
- Fragoso, P.I. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio "Cerro Grande" municipio de Tancítaro, Michoacán, México. Tesis de Ingeniería. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán. 66 pp.
- 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.
- Gallardo J.F. y A. Merino. 2007. El ciclo del carbono y la dinámica de los sistemas forestales. En: El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático. F. Bravo Coord. Fundación Gas Natural. Barcelona. 315 pp.
- García, J.A., A. Castillo, M. E. Ramírez, G. Rendón y M.U. Larqué. 2001. Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia* 35 (1):79-86.
- García, F. y O.R. Masera. 2004. Assessment and measuremet issues related to soil carbon sequestration in land-use, land-user change, and forestry (LULUCF) projects under the Kyoto Protocol. *Climatic Change* 65: 347-364.
- Giménez de Azcárate J., M.I. Ramírez y M. Pinto. 2003. Las comunidades vegetales de la Sierra de Anganguero (estados de Michoacán y México, México): clasificación, composición y distribución. *Lazaroa* 24: 87-111.
- Griffiths, H. & P.G. Jarvis. 2005. The Carbon Balance of Forest Biomes. Taylor & Francis Group.
- Goudie A. 2002. Enciclopedia of Global Change. Environmental Change and Human Society. Oxford University Press. United States of America.

- Holopainen, J. & M. Wit (eds). 2008. Financing Sustainable Forest Management. European Tropical Forest Research Network and Tropenbos International. Wageningen, The Netherlands. 49: 176.
- 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. 1981. Síntesis Geográfica del Estado de México. INEGI. México. 159 pp.
- INEGI. 2005. II Censo de Población y Vivienda 2005. México.
- INE-SEMARNAT. 2001. México 2^a. Comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. México.
- IPCC. 2000. Land use, Land-use Change and Forestry: A Special Report. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IPCC. 2003a. 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. 2003b. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environment Strategies, Kanagawa, Japón.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policy Makers. IPCC. En <http://ipcc-wg1.ucar.edu/index.html>
- Jandl, R. 2001. Medición de tendencias en el tiempo del almacenamiento de carbono del suelo. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales 18 al 20 de Octubre del 2001, Valdivia-Chile.
- Jobbágy E.G. & R.B. Jackson. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications* 10(2): 423-436.
- Karky, B.S. 2008. The economics of reducing emissions from community managed forests in Nepal Himalaya. Dissertation. University of Twente. Enschede, The Netherlands. 230 pp.
- 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.
- 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.
- Law, B.E., D. Turner, J. Campbell, O.J. Sun, S. Van Tuyl, W.D. Ritts & W.B. Cohen. 2004. Disturbance and climate effects on carbon stocks and fluxes across Western Oregon USA. *Global Change Biology* 10: 1429-1444.
- Luis, S., A. Gómez, J.D. Etchevers, G. Ángeles, M.A. López y W.R. Horwath. 2007. Acumulación de carbono orgánico en el suelo en reforestaciones de *Pinus michoacana*. *Agrociencia* 41: 711-721.
- MacDicken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agriculture Development. Arlington. 87 pp.
- Madrigal, J., C. Hernando, M. Guijarro, C. Díez y E. Jiménez. 2006. Distribución de biomasa y fijación de carbono tras claros mecanizados intensos en regenerado post- incendio de *Pinus pinaster* Ait. (Monte Fraguas, Guadalajara, España). *Invest. Agrar: Sist. Recur. For.* 15(2): 231-242.
- Martínez, R. 2008. Base de datos: Densidad de la madera de especies de coníferas y latifoliadas de bosques templados mexicanos. Técnico Académico Titular "A" del Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO), UNAM Campus Morelia.
- Masera, O.R. 1995. Carbon mitigation scenarios for Mexican forest: Methodological considerations and results. *Interciencia* 20(6): 388-395.
- Masera, O.R., 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.R., J.F. Garza, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G.J. Nabuurs, A. Pussinen, B.H.J. de Jong & G.M.J. Mohren. 2003. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling* 64: 177-199.
- Merino, A., C. Rey, J. Brañas y R. Rodríguez. 2003. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 12(2): 85-98.
- Montero, G., M. Muñoz, J. Donés y A. Rojo. 2004. Fijación de CO₂ por *Pinus Sylvestris* L. y *Quercus pireaica* Willd. en los montes Pinar de Valsaín y Matas de Valsaín. *Invest. Agrar: Sist. Recur. For.* 13(2): 399-415.
- Moore, D.S. 2000. Estadística aplicada básica. Barcelona, España. 836 p.
- Munn, T. 2002. *Enciclopedia of Global Environmental Change*. John Wiley & Sons. United Kingdom.

- Murdiyarso, D. & M. Skutsch. 2006. Community Forest Management as a Carbon Mitigation Option. Case Studies. Center for International Forestry Research (CIFOR). Bogor, Indonesia.
- ONU. 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Ordóñez, J.A.B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAP. México.
- Ordóñez, J.A.B. 2001. Manual de procedimientos para la estimación de biomasa en diferentes almacenes y clases de cobertura vegetal y uso del suelo. CIECO, UNAM. México.
- Peichl, M. & M.A. Arain. 2006. Above-and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. 140: 51-63.
- 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.
- Peña, V.M., L. Vázquez y C. Siebe. 2009. Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1 835- 30 500 years B.P.) in Mexico. *Geoderma* 149: 224-234.
- Pimienta, D.J., G. Domínguez, O. Aguirre, F.J. Hernández y J. Jiménez. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1): 35-46.
- 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.
- Ramírez, M.I., R. Miranda y R. Zubieta. 2007. Serie Cartográfica Monarca. Volumen I. Vegetación y Cubiertas del Suelo, 2006. Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. CIGA-MBSF-INE. México.

- Roy J., B. Saugier, H. Mooney. 2001. Terrestrial Global Productivity. Academic Press. San Diego California.
- Ruíz, R. 2009. Deforestación y clima: aproximación al análisis regional y modelado local en la Región de la Mariposa Monarca, México. Tesis de maestría. Facultad de Filosofía y Letras. Posgrado en Geografía. UNAM. 86 p.
- Rzedowsky, J. 1994. La vegetación de México. Limusa. México.
- Sathaye, J.A., W.R. Makundi, K. Andrasko, R. Boer, N.H. Ravindranath, P. Sudha, S. Rao, R. Lasco, F. Pulhin, O. Masera, A. Ceron, J. Ordoñez, X. Deying, X. Zhang & S. Zuomin. 2001. Carbon mitigation potential and costs of forestry options in Brazil, China, India, Indonesia, México, The Philippines and Tanzania. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 6: 185-211.
- Schlegel, B., J. Gayoso y J. Guerra. 2001. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Universidad Austral de Chile. INFOR. FONDEF. Valdivia, Chile. 14 pp.
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario Protectora de Bosques. 1996. Programa de manejo forestal para el aprovechamiento persistente de recursos maderables para la comunidad San Juan Xoconusco, Municipio Donato Guerra, Estado de México. Gobierno del Estado de México, Metepec.
- 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>
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, 31 diciembre 2002. 75 p.
- SEMARNAT. 2007. Reglas de Operación del Programa Pro-Árbol de la Comisión Nacional Forestal. Diario Oficial de la Federación, 28 diciembre 2007. 129 p.
- Sharma, P. & S.C. Rai. 2007. Carbon sequestration with land-use cover change in Himalayan watershed. *Geoderma*. 139: 371-378.
- Siebe, C., R. Jahn y K. Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación Especial No. 4. Chapingo, México. 57 pp.
- Skutsch, M., N. Bird, E. Trines, M. Dutschke, P. Frumhoff, B.H.J. de Jong, P. van Laake, O. Masera, D. Murdiyarso. 2007. Clearing the way for reducing emissions from tropical deforestation. *Environmental Science & Policy* 10: 322-334.
- Skutsch, M., & E. Trines. 2008. Policy Piece. Report from the UNFCCC Meeting in Bali.

- 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.
- UNFCCC. 2001. The Marrakech Accords and the Marrakech Declaration. Bonn.
- UNFCCC. 2007. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its second session, held at Nairobi from 6 to 17 November 2006. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Vergara, M.A., J.D. Etchevers y M. Vargas. 2004. Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México. *Terra Latinoamericana* 22(3): 359-367.
- Woodbury P.B., J.E. Smith & L.S. Heath. 2007. Carbon sequestration in the U.S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management* 241: 14-27.
- WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos. No. 103. IUSS-ISRIC-FAO. Roma.
- WWF. 2007. "Cuarto Foro Regional Mariposa Monarca." En <http://www.foromonarca.michoacán.gob.mx/monarca/>
- WWF. 2009. Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Mapa de uso del suelo y vegetación y Mapa de pérdida y deterioro del bosque 1993-2005. En: <http://www.wwf.org.mx/wwfmex/mapas>.
- Zamora, J.C. 2003. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido "La majada" municipio de Peribán de Ramos, Michoacán. Tesis de Ingeniería. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán. 47 pp.
- Zamora E., O. Vázquez, A. Pérez, R. Cano, A. Aparicio y E. Fernández. 2007. Variación natural de la densidad de la madera en *Pinus montezumae* Lamb. En tres altitudes del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México. *Foresta Veracruzana* 9(2): 33-37.
- Zhang, Q. y C.O. Justice. 2001. Carbon Emissions and Sequestration Potencial of Central African Ecosystems. *Ambio* 30(6): 351-355.
- Zubieta, R.R. 2007. Dinámica de la cubierta vegetal en el Área Natural Protegida de la Mariposa Monarca en el periodo 1986-2003. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 103 pp.