



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA



Estimación de Captura de Carbono en Bosques Comunales de *Pinus hartwegii* LINDL. en la zona de Amecameca, Estado de México.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

PRESENTA

NATALY VERENICE MORENO CANO

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. Efraín Ángeles Cervantes

México, D. F.

Noviembre, 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

Dedico este proyecto principalmente a mi queridísimo “Profe” Dr. Efraín Ángeles C. por su gran ayuda y comprensión.

A mis padres Felipe Moreno y Verónica Cano por ser mis mejores y únicos amigos.

A mis compañeros que me ayudaron para que este trabajo se lograra.

Muchos son los caminos que el hombre tiene para elegir en su búsqueda de su libertad pero solo uno es el que te lleva a triunfar: **¡Tu Eliges!**

Agradecimientos

Este proyecto y toda mi carrera universitaria se lo agradezco a Dios por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y seguir adelante rompiendo todas las barreras que se me presenten.

A la FES Zaragoza UNAM por que en esta institución tuve grandes experiencias, conocí maravillosos lugares de México y además por que aprendí a convivir con personas extraordinarias.

A Felipe Moreno, por que me enseñaste a no tener miedo y por tus consejos, gracias por ser mi amigo ¡Papi!, a Verónica Cano, por tu dedicación, cariño, comprensión y amor, gracias por ser mi confidente ¡Mami!. A pesar de todos los obstáculos que tuvimos en estos últimos años siempre han estado conmigo, **“Somos un Equipo”**.

A mi Abuelito Pedro Cano, a todos mis tíos, tías, primos, primas, sobrinos y a mi princesita Dana (Pocahontas), gracias familia por festejar mis éxitos, ustedes me impulsan a seguir a delante.

A mi “Profe” Dr. Efraín Ángles C. por su paciencia y los consejos que me dio tanto para mi superación académica como también en mi superación personal.

A todos mis compañeros en especial: Alejandra, Rebeca, Memo Vázquez y Nahum por la gran ayuda que me brindaron en campo y en laboratorio.

A mis mejores amig@s: Alejandro (el pascual), Arely, Alma, Pamela, Rocio, Orlando, José (el enano), Fidencio (el richy), Lalo (el sauza), Memo, Cesar (el ruso), Cesar (shack), Claudia y Vero (la Jefa), a todos ustedes gracias por alentarme cada día, y por su Amistad.

A mi grandiosa amiga Montse (Monkikis), gracias por estar conmigo siempre y por apoyarme en cada etapa de mi vida **“Manis te quiero”**.

Manuelito, es muy poco el tiempo que llevo de conocerte y estas cuando mas te necesito, muchas gracias por la fe que tienes en mi **¡¡¡Kotoba mo!!!**

Gracias a la Organización de Bienes Comunales de Amecameca, por el apoyo brindado para la realización de este estudio: en especial al C.P. Fernando Cisneros Velásquez.

Índice

Índice de cuadros _____	IV
Índice de figuras _____	V
Resumen _____	1
Introducción _____	2
Antecedentes _____	3
El carbono _____	3
Ciclo biogeoquímico del carbono _____	3
Efecto invernadero _____	4
Principales fuentes y depósitos de carbono _____	5
Los bosques como depósitos de carbono _____	6
Concepto de captura de carbono _____	7
Método para estimar la captura de carbono en ecosistemas forestales _____	7
Cuantificación de la biomasa _____	9
Modelos de simulación _____	11
Imágenes satelitales _____	12
Estudios realizados en México _____	13
Régimen de propiedad de los bosques de México _____	13
Pago por servicios ambientales _____	13
Importancia del estudio de Amecameca _____	14
Preguntas de investigación _____	14
Hipótesis _____	14
Objetivos _____	14
Descripción de la zona de estudio _____	15
Material y método _____	17
Selección del área de estudio _____	17
Método de muestreo _____	19
Registro de datos _____	19
Análisis de datos _____	22
Resultados _____	23
Discusión _____	30
Conclusiones _____	32
Literatura citada _____	33

Índice de cuadros

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del carbono _____	3
Cuadro 2. Ecuaciones para la estimación de biomasa aérea y contenido de carbono _____	10
Cuadro 3. Ventajas y desventajas de modelos de simulación _____	12
Cuadro 4. Coordenadas de bosques comunales de <i>Pinus hartwegii</i> en diferentes condiciones de conservación _____	18

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo del carbono en sistemas urbanos y naturales _____	4
Figura 2. Efecto invernadero _____	5
Figura 3. Bosques comunales de <i>Pinus hartwegii</i> en distintos niveles de conservación _____	18
Figura 4. Estructura diamétrica de los cinco sitios de muestreo _____	23
Figura 5. Edad – diámetro a la altura del pecho (DAP) _____	24
Figura 6. Edad – biomasa aérea y raíz _____	25
Figura 7. Edad – altura _____	26
Figura 8. Edad – carbono total _____	27
Figura 9. Diámetro a la altura del pecho (DAP) - carbono total _____	28
Figura 10. Captura de carbono _____	29

Resumen

De las opciones más importantes que México tiene para la mitigación de cambio climático esta la denominada “captura de carbono en el sector forestal”, ya que con el manejo sustentable de los bosques mediante estrategias de forestación y reforestación, se captura CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de la biomasa vegetal, implicando así una disminución en las concentraciones de CO₂.

Los ejidatarios de Amecameca, Estado de México desean conocer la cantidad de carbono que capturan sus bosques, y conocer si son adecuados para generar servicios ambientales por el concepto captura carbono y recibir un beneficio económico de ello. De modo que la importancia de este estudio es conocer el potencial de captura de carbono en bosques comunales y conocer la cantidad de carbono que capturan los bosques y plantaciones que realicen los comuneros de Amecameca, y así fortalecer la solicitud del pago por servicios ambientales.

La estimación de carbono capturado se realizó en los bosques de *Pinus hartwegii* localizando sitios en diferentes niveles de conservación, dos sitios de bosques conservados, dos sitios de bosques plagados y un sitio con repoblación. Se determinó la densidad de población, la distribución diamétrica y la relación DAP-contenido de carbono en los bosques de *Pinus hartwegii* comunales.

La captura de carbono en los bosques de *Pinus hartwegii* varía entre los 17.23 MgC ha⁻¹ hasta los 191.33 MgC ha⁻¹. El mayor contenido de carbono se encuentra en los bosques conservados, obteniendo la mayor concentración en el fuste, seguido del follaje y raíz, en tanto el menor contenido de carbono se encuentra en el sitio con repoblación.

Para los comuneros de Amecameca estos resultados son necesarios ya que al saber cuanto carbono capturan sus bosques ellos podrán conocer si sus bosques son rentables para entrar al programa de servicios ambientales.

Palabras clave: captura de carbono, *Pinus hartwegii*, Amecameca, servicios ambientales.

Introducción

El cambio climático global se define como el posible aumento en la temperatura superficial del planeta, que se producirá como consecuencia de un aumento importante y rápido de las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera (Masera *et al.*, 2000; Ordóñez *et al.*, 2001).

Dentro de los GEI destaca el dióxido de carbono (CO₂), ya que constituye el 71.5% (Ordóñez, 1999; Masera *et al.*, 2000; Ordóñez *et al.*, 2001; Chidiak *et al.*, 2003; Acosta y Etchevers, 2005; Pagiola *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2006).

Este gas aumenta por dos causas principales: 1) por el uso de combustibles fósiles; y 2) por el cambio de uso de suelo (Ordóñez *et al.*, 2001; Chidiak *et al.*, 2003; Acosta y Etchevers, 2005; Pagiola *et al.*, 2006; Raven y Karley, 2006).

La Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), creada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 1994, tiene como objetivo estabilizar las concentraciones atmosféricas de los GEI a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en un sistema climático (Masera *et al.*, 2000; Carpio y Ramírez, 2001; Ordóñez *et al.*, 2001; Kirby y Potvin, 2007; Seidl *et al.*, 2007).

En 1997, durante la tercera conferencia de la UNFCCC, se adoptó el protocolo de Kyoto, el cual compromete a los países industrializados a reducir el total de sus emisiones en no menos del 5% con relación a sus emisiones de 1990 (Masera *et al.*, 2000; Acosta y Etchevers, 2005).

Dicho Protocolo especifica algunos mecanismos, entre ellos el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y reconoce el servicio ambiental de mitigación de los efectos del cambio climático, derivado de la ejecución de proyectos para la reducción de emisiones o remoción de los GEI (Pagiola *et al.*, 2006).

El gobierno de México está concentrando esfuerzos para desarrollar proyectos forestales de captura de carbono, dirigiendo sus apoyos hacia la formulación e implementación inicial de proyectos que cumplan con los lineamientos, modalidades y procedimientos del MDL (Carpio y Ramírez, 2001; Pagiola *et al.*, 2006).

Una alternativa para reducir la cantidad de CO₂ atmosférico sería capturar una mayor cantidad de este gas en la vegetación (Acosta y Etchevers, 2005), conocidos como depósitos (Carpio y Ramírez, 2001).

En México la opción de mitigación más importante es la denominada “Captura de Carbono en el Sector Forestal” (Ordóñez, 1999; Acosta y Etchevers, 2005). Esto es por el manejo sustentable de los bosques en la captura de este gas a través de la fotosíntesis durante el crecimiento de la biomasa vegetal (Rodríguez *et al.*, 2006).

En el Valle de México el gran desarrollo industrial emite grandes cantidades de CO₂ por lo que es importante conocer la importancia de los bosques como almacenes de carbono. En nuestro país un 70% de los bosques es propiedad ejidal o comunal. En el Parque Nacional Izta-popo, los comuneros del poblado de Amecameca, requieren conocer cuanto carbono capturan sus bosques, por esta razón en este trabajo el objetivo es: Determinar la cantidad de Carbono que almacena los bosques de *Pinus hartwegii*, en el área de influencia del P.N. Izta-Popo, Amecameca, Estado de México.

Antecedentes

El carbono.

Es el elemento básico en la formación de las moléculas de carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, pues todas las moléculas orgánicas están formadas por cadenas de carbono enlazados entre si (Zamora, 2003).

Las tres formas más comunes de carbono elemental existentes en la naturaleza (diamante, grafito y carbono amorfo) son sólidos con puntos de fusión extremadamente altos, e insolubles en todos los disolventes a temperaturas ordinarias. Las propiedades físicas de las tres formas difieren considerablemente a causa de las diferencias en su estructura cristalina (Zamora, 2003).

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del carbono (Zamora, 2003 y Fragoso, 2003).

Propiedades del Carbono	
Número Atómico	6
Valencia	2, +4, -4
Estado de Oxidación	+4
Electronegatividad	2,5
Radio Covalente (Å)	0,77
Radio iónico (Å)	0,15
Radio atómico (Å)	0,914
Configuración Electrónica	1s ² 2s ² 2p ²
Primer potencial de ionización (eV)	11,34
Masa atómica (g/mol)	12,01115
Densidad (g/ml)	2,26
Punto de ebullición (°C)	4830
Punto de Fusión (°C)	3727

El carbono tiene la capacidad única de enlazarse con otros átomos de carbono para formar compuestos en cadena y cíclicos muy complejos. Esta propiedad conduce a un número casi infinito de compuestos de carbono, siendo los más comunes los que contienen carbono e hidrogeno. Se caracteriza también por su baja reactividad. A altas temperaturas, reacciona directamente con la mayoría de los metales formando carburos y con el oxígeno formando monóxido de carbono (CO) y bióxido de carbono (CO₂) (Fragoso, 2003).

Ciclo biogeoquímico del carbono.

Este ciclo produce unos intercambios de carbono (CO₂) entre los seres vivos y la atmósfera. La retención del carbono se produce a través de la fotosíntesis de las plantas, y la emisión a la atmósfera y a través de la respiración animal. Este proceso es relativamente corto y puede renovar el carbono de toda la tierra en 20 años (Ordóñez, 1999).

También existe un ciclo biogeoquímico que regula la transferencia entre la atmósfera, los océanos y suelos. El CO₂ es emitido a la atmósfera, por medio de los océanos, ríos, etc. que es absorbido con facilidad por el agua convirtiéndose en ácido carbónico. Este ácido influye sobre los silicatos que constituyen las rocas y se producen los iones bicarbonato. Los iones bicarbonato son asimilados por los animales acuáticos en la formación de sus tejidos. Una vez que estos seres vivos mueren quedan depositados en los sedimentos de los fondos marinos. Finalmente, el CO₂ vuelve a la atmósfera durante las erupciones volcánicas al fusionarse en combustión las rocas con los restos de los seres vivos (Fragoso, 2003).

En algunas ocasiones la materia orgánica queda sepultada sin producirse el contacto entre ésta y el oxígeno lo que evita la descomposición y, a través de la fermentación provoca la transformación de esta materia en carbón, petróleo y gas natural.

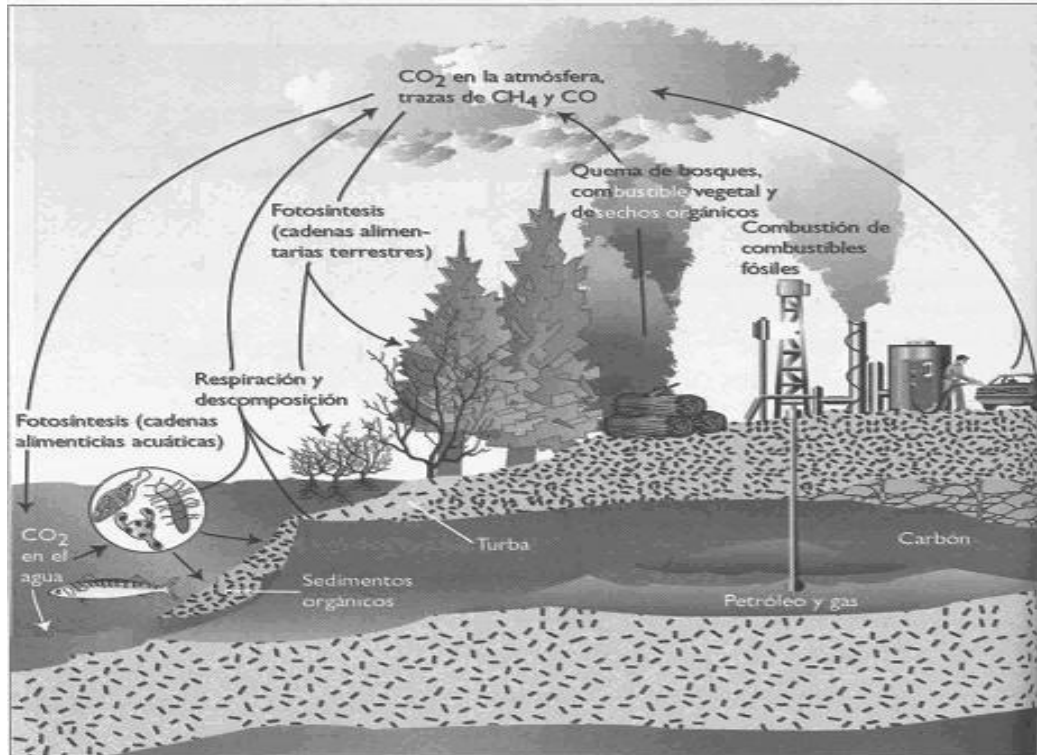


Figura 1. El ciclo del carbono en sistemas urbanos y naturales. (Fragoso, 2003).

Efecto invernadero.

Los compuestos químicos presentes en la atmósfera de la Tierra, como el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2) y el ozono (O_3), absorben la radiación térmica (de onda larga) emitida por la superficie y la atmósfera de la Tierra. La atmósfera se calienta por este mecanismo, emite radiación térmica, y una parte significativa de su energía actúa para calentar tanto la superficie como la capa inferior de la atmósfera. En consecuencia, la temperatura promedio del aire de la superficie de la tierra es aproximadamente $30\text{ }^\circ\text{C}$ más elevada de lo que sería sin la absorción atmosférica y la re-radiación de energía térmica. Este fenómeno se conoce como Efecto Invernadero y los gases responsables del efecto también se llaman gases de efecto invernadero (GEI) (Fragoso, 2003).

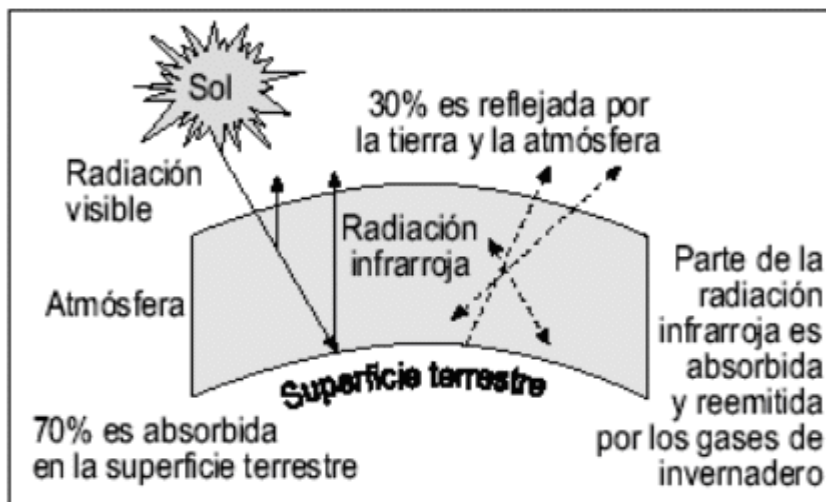


Figura 2. Efecto Invernadero. De la radiación solar que incide en nuestro planeta, la atmósfera y la superficie terrestre absorben un 70%. La radiación absorbida se refleja en forma de luz infrarroja. Los gases de invernadero absorben y remiten en varias ocasiones esta radiación, dando lugar a un calentamiento de la superficie del planeta 33 °C mayor que el que resultaría de escapar libremente la radiación al espacio exterior (Fragoso, 2003).

El carbono es el principal de los GEI ya que es el responsable del 71.5% en la atmósfera. En los últimos años la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera ha presentado un aumento. Se ha pasado de unas 280 ppm en la era preindustrial a unas 379 ppm en 2005 (aún cuando su concentración global en la atmósfera es de apenas 0,03%) (Acosta y Etchevers, 2005).

Las concentraciones de este gas en la atmósfera, se debe al consumo de combustibles fósiles por las naciones industrializadas, ya que la mayor parte por los procesos productivos, el transporte y los sistemas domésticos dependen de la energía derivada de los combustibles fósiles (Montoya *et al.*, 1995).

La emisión global del uso de dichos combustibles se ha incrementado en 3.5 veces 1950, y actualmente el volumen de emisiones se ubica en alrededor de 6.2 billones de toneladas por año. En este contexto se ubica la causa principal del incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera, desde que ocurrió la revolución industrial (Fragoso, 2003).

Así mismo, el cambio de uso del suelo ha contribuido a este incremento (Montoya *et al.*, 1995). La deforestación anual se calcula en 17 millones de hectáreas, lo que significa una liberación anual de cerca de 1.8 billones de toneladas de carbono por año; es decir, cerca del 20% del total de las emisiones antropogénicas (Fragoso, 2003).

Principales fuentes y depósitos de carbono.

Se considera depósito de carbono al sitio que sirve como almacén de los GEI (Ordóñez *et al.* 2001), y su función es el de capturar carbono de la atmósfera.

Mediante la fotosíntesis la vegetación capta CO₂ de la atmósfera o el que se encuentra disuelto en el agua y, con la ayuda de la luz solar, lo utilizan en la elaboración de moléculas sencillas de azúcares que acumulan en la biomasa (tronco, ramas, corteza, hojas y raíces) y en el suelo (mediante su aporte orgánico). Las plantas al mismo tiempo que lo absorben a través de la fotosíntesis, también lo emiten mediante su respiración, pero en

menos cantidad, por lo que el saldo neto de emisión es negativo, contribuyendo así a la reducción de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera a través de los denominados reservorios de carbono (Ordóñez *et al.* 2001; Gutiérrez y Lopera 2001).

Los cinco grandes reservorios son: (a) la atmósfera, (b) la vegetación terrestre, (c) el suelo, (d) los océanos y (e) los combustibles fósiles (Acosta y Etchevers, 2005; Sanhueza, 2005; Ordóñez *et al.* 2001).

Los bosques como depósitos de carbono.

Una opción de mitigación de carbono está definida como cualquier acción que de cómo resultado una reducción del incremento neto en las emisiones de este gas de un área determinada y/o por la sustitución de combustibles fósiles (Ordóñez, 1999).

En los ecosistemas vegetales conocidos como depósitos tienen la capacidad de mitigar los GEI por medio de la captura de carbono (Ordóñez *et al.* 2001; Ordóñez y Masera, 2001).

En los ecosistemas forestales se identificaron 3 opciones para mitigar los GEI: (1) conservación y almacenamiento: en donde se preserva la áreas naturales protegidas, fomentando el manejo sostenible de bosques naturales y el uso renovable de la madera (Masera *et al.*, 2000; Carpio y Ramírez, 2001); (2) reforestación: recupera áreas degradadas mediante acciones como la reforestación urbana, restauración para fines de subsistencia, el desarrollo de plantaciones comerciales para madera (Masera *et al.*, 2000); y (3) sustitución: el cual se sustituyen los productos industriales por aquellos hechos de madera, es decir obtener energía a partir de biomasa y finalmente por la reducción del uso de combustibles fósiles (Acosta y Etchevers, 2005; Masera *et al.*, 2000).

En el mundo, los bosques capturan y conservan grandes cantidades de carbono que cualquier otro ecosistema terrestre ya que participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y la superficie de la tierra (Ordóñez *et al.* 2001; Acosta y Etchevers, 2005).

La superficie de los ecosistemas forestales en la tierra es de 4.1×10^9 ha (Fragoso, 2003). Aproximadamente el 37% de carbono se encuentra en latitudes bajas (0° a 25° lat), 14% en las latitudes medias como (25° a 50° lat) y 49% en las altas de (50° a 75° lat) (Fragoso, 2003; Masera *et al.*, 2000).

Se ha estimado que, los bosques mediante la respiración emiten 55 GtC año^{-1} y por medio de descomposición emiten de 54 a 55 GtC año^{-1} , siendo la descomposición y la respiración los dos procesos emisores naturales más importantes en los bosques, sus emisiones suman un total aproximado de 110 GtC año^{-1} y en comparación, los océanos emiten por procesos químicos y biológicos cerca de 90 GtC año^{-1} (Masera *et al.* 2000)

La captura neta de carbono por unidad de área varía dependiendo del tipo de proyecto a realizar: por ejemplo, para los proyectos de reforestación, estudios iniciales han estimado que el promedio de captura de carbono es de 120 tC ha^{-1} y para los proyectos de manejo de bosques el promedio es de 88 tC ha^{-1} (Masera *et al.*, 2000). Estos promedios variarán dependiendo del diseño del proyecto, las condiciones del lugar, las condiciones de implementación y la tendencia de uso de suelo.

En los siguientes años, los boques podrían ser buenos depósitos de carbono permitiendo reducir de 20 a 50% de las emisiones netas de CO_2 a la atmósfera (Masera *et al.* 2000).

Concepto de captura de carbono.

Existen varios conocimientos científicos sobre algunos aspectos de captura de carbono en bosques; dado que distintos autores emplean diferentes términos al referirse a la misma opción forestal (Ordóñez *et al.*, 2001; Acosta y Etchevers, 2005; Gutrich y Howarth, 2006; Kirby y Potvin, 2007; Seidl *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2006; Banfield *et al.*, 2002; Foster y Morrison, 2002; Raven y Karley, 2006; Zhang *et al.*, 2007; Carpio y Ramírez, 2001; Chidiak *et al.*, 2003; Rodríguez *et al.*, 2006; Ordóñez, 1999; Maser *et al.*, 2000).

A esta acción de mitigar el dióxido de carbono por medio de depósitos, lo han llamado secuestro, captura o almacenamiento, la cual según la real academia de la lengua española, el concepto mas adecuado es captura. (Real Academia de la Lengua Española, 1984).

Método para estimar la captura de carbono en ecosistemas forestales.

El comportamiento del carbono en los ecosistemas forestales es muy complejo, por lo que para ello, es necesario realizar un análisis y así descubrir el potencial de captura de carbono, lo cual implica analizar conjuntamente el carbono capturado en vegetación (aérea y subterránea), suelos (incluyendo materia en descomposición) y productos forestales (Maser *et al.*, 2000; Ordóñez *et al.*, 2001;).

a) **Carbono contenido en la vegetación (C_v):** es la suma del carbono contenido en la biomasa aérea (tronco, hojas, ramas y partes reproductivas) y en la biomasa de las raíces (raíz) (Ordóñez, 1999; Ordóñez y Maser, 2001). Existen dos métodos para calcular la biomasa de los ecosistemas, el destructivo y el no destructivo o alométrico. Su elección dependerá de los datos que estén disponibles al momento de realizar la estimación (Ordóñez y Maser, 2001).

Método destructivo: Para la estimación de la biomasa de un rodal forestal, el procedimiento más común es el método de estimación por regresión. Este consiste en el muestreo destructivo de unos cuantos árboles para relacionar alguna de sus variables fáciles de medir con el contenido de biomasa, utilizando para ello métodos de regresión; por ejemplo, el diámetro normal (DN, diámetro a 1, 30 m) (Díaz-Franco *et al.*, 2007).

Las ecuaciones de biomasa mejoran su predicción cuando se consideran al mismo tiempo las variables diámetro y la altura, pero la medición de alturas no se realiza en la practica, debido a que toma mucho tiempo y en algunos bosques con coberturas cerradas no es fácil identificar la punta del árbol, sobre todo cuando las mediciones se hacen en forma indirecta (Díaz-Franco *et al.*, 2007).

Método no destructivo o alométrico: En caso de solo contar con datos como la altura y el diámetro de los árboles es posible estimar el carbono contenido en la biomasa utilizando ecuaciones alométricas (Ordóñez y Maser, 2001). Estas se estiman por medio de dos métodos como:

- Método utilizando inventarios forestales: en este método se toman en cuenta el contenido de carbono en la vegetación, el contenido de carbono en la biomasa aérea (volumen, densidad de la madera, factor de expansión) y el contenido de carbono en la biomasa de las raíces (Maser *et al.*, 2000).

Y así mismo en la biomasa aérea es el producto del Volumen (V), la densidad de la madera (WD), factor de expansión (BEF) y del contenido de carbono (CC) (valor promedio que generalmente es de 0.5) (Maser *et al.*, 2000).

Las estimaciones de las ecuaciones de biomasa y los factores de expansión están basados en conjuntos de datos que solo consideran árboles con vida y no toman en cuenta

materia orgánica en descomposición o árboles muertos. Esto podría generar errores en las estimaciones de la biomasa en los bosques templados, pero no en los bosques tropicales ya que estos ecosistemas poseen la mayor parte de su biomasa en la vegetación área viva (Maser *et al.*, 2000).

- Método utilizando ecuaciones alométricas: En caso de contar con la información de inventarios forestales se pueden utilizar una serie de ecuaciones alométricas que han sido desarrolladas con el objetivo de poder estimar la biomasa contenida en la vegetación utilizando datos fáciles de obtener en campo tales como la altura de los árboles (H) y el diámetro de los árboles a la altura del pecho (DBH) (Maser *et al.*, 2000).

b) **Carbono contenido en el suelo (C_s)**: es el carbono contenido en las capas del suelo forestal, se origina por la fragmentación de la roca madre meteorizada y que con el tiempo forma capas de materiales. Al irse acumulando éstas y compactando, almacenan una cierta cantidad de carbono, misma que aumentará por la continuidad de proceso de formación del suelo (Ordóñez y Maser, 2001; Ordóñez, 1999).

La dinámica del carbono en los suelos es también muy compleja, la conservación de las áreas forestales a otro tipo de usos del suelo ocasiona una pérdida irremediable del carbono existente en el suelo. De manera contraria a lo anterior si las tierras de cultivo o las raíces forestales degradadas son reforestadas se puede esperar un incremento en el contenido de carbono en los suelos (Maser *et al.*, 2000).

c) **Carbono contenido en la materia orgánica en descomposición (C_d)**: es el contenido de carbono que se encuentra en la materia orgánica en proceso de descomposición y es originada cuando las estructuras vegetales como las hojas, las ramas y el tronco son depositadas en el suelo (Ordóñez y Maser 2001; Ordóñez, 1999).

d) **Carbono contenido en productos forestales (C_p)**: son los productos forestales que almacenan carbono durante todo el tiempo de vida del producto (Maser, 2000) y cuando este tiempo termina, el carbono se incorporara al ciclo dependiendo del proceso de degradación del producto. Mientras mayor sea la vida media de un producto forestal, el carbono estará almacenado por más tiempo (Ordóñez y Maser, 2001; Ordóñez, 1999).

e) **Carbono ahorrado por la sustitución de combustibles fósiles (C_f)**: es una alternativa para contabilizar créditos comercializables por la sustitución de combustibles fósiles (por el uso de la biomasa forestal para la producción de energía), aclarando que este punto se contempla en el cálculo de la captura unitaria pero, no es ni captura, ni secuestro de carbono (Ordóñez y Maser, 2001; Ordóñez, 1999).

El carbono total capturado (C_T) en toneladas de carbono por hectárea se puede expresar como: (Ordóñez y Maser, 2001).

$$C_T = C_v + C_d + C_s + C_p + C_f$$

Y como resultado de la sumatoria se obtiene C_T que es igual al carbono total fijado en ton/ha o Mg C/ha., o se puede estimar dinámicamente como:

$$C_T = \frac{C_v + C_d + C_s + C_p + \sum C_f}{T}$$

donde: T = tiempo; de esta forma, C_t es el promedio del carbono fijado en vegetación, materia en descomposición, suelos y productos forestales, más la suma del

carbono ahorrado por la sustitución de combustibles fósiles debido al uso de bioenergía (Ordóñez y Masera, 2001).

Cuantificación de la biomasa.

Mediante los estudios de biomasa se puede obtener la distribución de la materia orgánica, y así evaluar efectos que modifiquen el equilibrio del ecosistema forestal (Gayoso *et al.*, 2000).

La biomasa se puede cuantificar de forma indirecta donde implica recolectar datos de campo y de inventarios para su posterior utilización en ecuaciones y modelo matemáticos calculados por medio de análisis de regresión (Sans *et al.*, 2007).

Se define la biomasa forestal como la estimación de materia orgánica existente en determinado ecosistema forestal, tanto aérea como subterránea. Normalmente se cuantifica en toneladas por hectárea de peso verde o seco (Schlegel *et al.*, 2002; citado en Sans *et al.*, 2007).

Existe un método, de menor confiabilidad por la utilización de funciones de volumen de fuste asociadas a la densidad básica de la madera. En la aplicación de los métodos indirectos, para transformar la biomasa de cada individuo a biomasa total del sistema se aplican factores de expansión, y factores de reducción para la contabilización de carbono (Gayoso *et al.*, 2000).

Mostacedo *et al.*, (2006), mencionan que para calcular la biomasa aérea de cada árbol en dos de los más importantes tipos de bosques de las tierras bajas de Bolivia, utilizaron los datos del diámetro (D), altura estimada (He) y la densidad de la madera (De) y se basaron en la fórmula propuesta por Brown *et al.*, (1989), Biomasa aérea = $\exp[-2.409 + 0.952 * \ln(De * D^2 * He)]$. Esta fórmula es la más aceptada científicamente (Mostacedo *et al.*, 2006 citado en Sans *et al.*, 2007).

Para determinar la cantidad de carbono almacenado en la parte aérea de ecosistemas forestales y de pastizales en tres regiones de México, Acosta *et al.*, (2001), realizaron en el cálculo de biomasa y para ello utilizaron las variables dasométricas: diámetro normal (DN), altura y el peso seco de cada individuo.

En otros estudios para cuantificar la biomasa forestal y el carbono, Sans *et al.*, (2007) utilizaron un factor de 1.4 a partir de la biomasa del fuste para el cálculo de la biomasa total (fuste y hojas). Luego redujeron el valor de biomasa a materia seca con un factor de 0.5 y finalmente para cuantificar el carbono se aplica otro factor de 0.5, mientras que para un trabajo en *Eucalyptus globulus* en Galicia, se utilizó el diámetro normal para calcular la biomasa en peso seco de las diferentes fracciones del árbol.

Sierra *et al.*, (2001) utilizaron para estimar la biomasa radicular dos tipos de ecuaciones de acuerdo al tamaño de las raíces (Sierra *et al.*, 2001 citado en Sans *et al.*, 2007).

Gayoso *et al.*, (2000), cuantifico la biomasa subterránea y utilizan el método denominado Skeleton debido a la dificultad operativa y económica que implica la extracción de raíces. El método consistió en remover el suelo sobre la zona de influencia de las raíces (ZIR), luego mediante el uso de un trípode y malacate, se extrae la raíz para su posterior limpieza y obtención de muestras según diámetro para proceder al pesado de las mismas.

Cuadro 2. Ecuaciones para la estimación de biomasa aérea y contenido de carbono (Sans *et al.* 2007 y Gayoso, 2000).

Autor	Estimaciones	Datos	Ecuación
Sutton <i>et al.</i> , 1983	Porcentaje de Contribución Evalúa el Aporte de Biomasa Radical a la Biomasa Total de los Árboles.	La proporción biomasa radicular/biomasa aérea (BR/BA) es la relación en peso seco de la masa del sistema radicular y la masa total de la parte aérea.	% Contribución = $(BR/BA * 100) / ((BR/BA) + 1)$
Brown <i>et al.</i> , 1989.	Estimación de Biomasa Aérea.	Diámetro (D) Altura estimada (He) Densidad de la madera (De)	Biomasa Aérea = $\exp[-2.409 + 0.952 * \ln(De * D^2 * He)]$
Sierra <i>et al.</i> , 2001	Estimación de Biomasa Radicular	Biomasa de Raíces de Gruesas (BRg) Considerándose como tales aquellas Raíces Mayores a 5mm de diámetro. Siendo DAP del árbol. Biomasa de raíces finas (MRf), consideradas aquellas menores a 5mm de diámetro. Siendo G el Área Basa del bosque	$\ln BRg = -4,273 + 2,633 * \ln D$ $MRf = 6,9981 + 0,2879 * G,$
Acosta <i>et al.</i> , 2001	Estimación de Carbono Almacenado en la parte aérea de los Ecosistemas Forestales.	Y = biomasa en kilos X = es el diámetro normal a y b son los parámetros a estimar. Variables dasométricas: * Diámetro normal (DN) * Altura * Peso seco de cada individuo.	$Y = aX^b$
Balboa <i>et al.</i> , 2006.	Biomasa en Peso Seco de las Diferentes Fracciones del Árbol	DN=Diámetro Normal W = Biomasa en Peso Seco (kg) dn= Diámetro normal (cm) h= altura (m) G= Área Basimétrica (m ² / ha)	Madera: $W = 0.0062.dn^{2.35}.h^{1.001} R^2$ 0.9753 Corteza: $W = 0.0093.dn^{2.46} R^2$ 0.7091 Ramas Gruesas: $W = 0.0076.dn^{3.39}.G^{-0.83} R^2$ 0.6986 Ramas Finas: $W = 0.0264.dn^{2.63}.G^{-0.81} R^2$ 0.8453 Ramitas: $W = 0.0451.dn^{3.08}.G^{-1.59} R^2$ 0.7617 Hojas: $W = 0.0043.dn^{3.69}.G^{-1.22} R^2$ 0.7502
Loguercio <i>et al.</i> , 2006.	Estimación de Carbono en Biomasa Forestal.		$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 DAP^2$ $Biomasa = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 DAP^2$ $Biomasa = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 H$ $Biomasa = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 H$ $Biomasa = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 H$ $Biomasa = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 H + \beta_3 DAP^2 H$ $Biomasa = \beta_0 + \beta_1 DAP^{\beta_2} H^{\beta_3}$ $Biomasa = \beta_0 DAP^{\beta_1}$
Martínez de Saavedra <i>et al.</i> , 2006.	Estimación de Biomasa Forestal y Carbono.	Factor de 1. 4 a partir de la biomasa del fuste para el cálculo de la biomasa total (fuste y hojas). Luego redujeron el valor de biomasa a materia seca con un factor de 0. 5 y finalmente para cuantificar el carbono se aplica otro factor de 0. 5	Carbono = Biomasa Fuste * 1.4 * 0.5 * 0.5

Modelos de simulación.

Modelo CO₂FIX: fue desarrollado principalmente por Mohren y Goldewijk en el Instituto de Investigaciones Forestales y de Ecologías Urbana de Holanda, en 1990 (Ordóñez, 1999).

El modelo original fue programado en Fortran 77, por lo que hubo que adaptarlo a interfaces gráficas usando Borland C++, Ver 4.5. De esta forma el usuario sin mucha experiencia puede trabajar en forma interactiva con el modelo. La tarea de adaptación y mejora del modelo original se llevó a cabo por el Laboratorio de Bioenergía del Instituto de Ecología de la UNAM y el Instituto Forestal y de Investigación Natural de Holanda, colaboración que dio lugar a la versión 1.2, del modelo CO₂FIX para Windows (Ordóñez, 1999).

Se basa en la simulación de ciclo de carbono para plantaciones forestales y se ha aplicado en diferentes regiones del mundo como bosque tropical lluvioso, bosque boreal y bosque templado decíduo, con una representación de sistemas de silvicultura tradicional (Maser, 2001; Maser *et al.*, 2001).

La estimación se fundamenta en el ciclo de carbono e integra el crecimiento anual y las tasas de pérdida de las principales combinaciones de la biomasa, incluyendo además la relación de la dinámica de la descomposición de la materia orgánica del suelo. La distribución relativa de follaje, ramas y raíces, y su relación con el incremento en el volumen del tronco (es decir, cada uno de los componentes arbóreos) son integrados en conjunto con un tiempo de vida esperado (Ordóñez, 1999; Maser *et al.*, 2000).

La diferencia entre la asimilación y la descomposición durante el desarrollo forestal determina la cantidad neta de carbono fijada durante el desarrollo de rodales y de la suma total de carbono, el cual esta permanentemente almacenado dentro de los ecosistemas (Maser *et al.*, 2000). En este modelo se pueden distinguir tres elementos principales:

- a) Reservorios: como troncos, ramas, hojas, hojarasca, humus, productos (Ordóñez *et al.*, 2001).
- b) Transiciones de masas de un reservorio a otro (incluyendo atmósfera), provocando por factores como mortalidad natural, cosechas, descomposición, caída de hojas y ramas, entre otras (Ordóñez *et al.*, 2001).
- c) Crecimiento de los reservorios vivos, como troncos, ramas, hojas y raíces (Ordóñez *et al.*, 2001).

Modelo cambio de uso de suelo y secuestro de carbono: Es un modelo que trata de simular y considerar la interacción entre el hombre y el bosque. Es simple y genérico, que se puede utilizar en diferentes condiciones y ambientes (Maser *et al.*, 2000).

Su principal objetivo es el de identificar las implicaciones de diferentes esquemas de manejo (Ordóñez *et al.*, 2001). Este modelo fue desarrollado bajo tres consideraciones principales: (1) capturar las interacciones físicas esenciales entre población y bosques en países en desarrollo, (2) no es demasiado complicado y (3) ser capaz de representar una amplia variedad de situaciones y esquemas de manejo (Ruiz, 2003).

Modelo GORCAM: Este modelo se trabaja en una hoja de cálculo de Excel y fue desarrollado para calcular los flujos netos de carbono en la atmósfera que estén asociados con el uso del suelo, el cambio en el uso del suelo y los proyectos bioenergéticos y forestales (Maser *et al.*, 2000).

El modelo requiere parámetros para describir: el destino del aprovechamiento forestal para varias corrientes de productos y desperdicios, la duración media de los

productos madereros y del C del suelo y la hojarasca, la eficiencia con que se utilizan los productos madereros (y valores comparables de los materiales a que sustituyen) y la energía necesaria para la ordenación del sistema de productos forestales (y valores comparables para la producción y entrega de los combustibles o productos alternativos). Los materiales de la madera pueden ser reciclados, colocados en un terreno de relleno o utilizados para generar energía al final de su vida útil (Maser *et al.*, 2000).

Cuadro 3. Ventajas y Desventajas de Modelos de Simulación (Maser *et al.* 2000 y Ordoñez, 1999).

Modelo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Brown y Lugo (1982)	Considera la densidad de carbono de los bosques más abundantes y otro tipo de vegetación, y la relación esta variable con otras variables climáticas.	Se aplica a cambios de gran escala en la vegetación terrestre.	No toma en cuenta opciones de manejo. Aplicable a evaluaciones tanto regionales como nacionales más que a proyectos.
Brown, Gillespie y Lugo (1989)	Considera la densidad de carbono en bosques tropicales relacionándolos con datos de inventarios forestales.	El tamaño y la forma de los árboles se relacionan con el contenido de carbono.	Aplicable a evaluaciones regionales o nacionales más que a proyectos.
CO₂Fix	Obtienen datos de las existencias y flujos de carbono en los bosques, tanto en la biomasa como en el suelo y en los productos maderables. Se basa e una curva de crecimiento esperada.	Se adapta a distintas variables locales tales como las especies y el incremento.	Sistemas agroforestales y bosques de bajo manejo.
LUCS	Se basa en la proyección de la demanda para determinados tipos de uso de suelo (agrícola). Depende mayormente de los insumos introducidos y de habilidades.	El modelo esta diseñado para valorar el impacto de un proyecto.	No se basa en tendencias históricas de deforestación.
GORCAM	Es similar al modelo de CO ₂ Fix, pero incluye la posibilidad de incorporar otro tipo de productos sustituidos.	Se adapta a variables locales.	Sistemas agroforestales y bosques mixtos. Las dinámicas de carbono en el suelo casi no se toman en cuenta.
CO₂LAND	Se basa en matrices de transición, calculados por el modelo de CO ₂ Fix.	Este programa combina información de uso de la tierra existente en bases de datos GIS.	Calcula existencias de carbono a nivel de paisajes, a partir de modelos de rodales construidos en CO ₂ Fix.

Imágenes Satelitales.

En varios estudios a nivel nacional e internacional, estiman el contenido de carbono, en ecosistemas forestales por medio de las imágenes satelitales. Estas imágenes son representaciones visuales de información, las cuales se capturan por un sensor localizado en satélites (Acosta y Etchevers, 2005). Estos sensores recogen información de la superficie de la tierra que luego se envía a la tierra y posteriormente se procesa para mostrarnos las características de la tierra (Carpio y Ramírez, 2001).

Existen varios modelos de imágenes satelitales como: LANDSAT 7, KH-11, AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), MODIS, SPOT-5; estos por mencionar algunos (Liu *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2007;).

También en México se han utilizado imágenes satelitales para estimación de carbono por medio del sensor SPOT-5 en bosques de *Pinus platula* (Aguirre-Salado *et al.*,

2007), y ajustaron modelos de regresión lineal múltiple, así como métodos no paramétricos para estimar biomasa y carbono en función de los datos espectrales capturados por la imagen y de índices construidos a partir de éstos.

Estudios realizados en México.

Los bosques de pino han registrado mayor contenido de carbono por hectárea en comparación con los bosques mixtos o tropicales. Así Ordóñez *et al.*, (2001), en un bosque de *Pinus pseudostrobus* encontraron que almacenan 217 MgC ha⁻¹; en tanto, Zamora (2003), estimó en un bosque de *Pinus* un almacén de 22 MgC ha⁻¹, para bosques de *Abies* presentó 25 MgC ha⁻¹.

Díaz-Lavariega *et al.*, (2007), registraron en bosques de *Pinus patula* Schl. *et* Cham., 183 MgC ha⁻¹.

Rodríguez-Laguna *et al.* (2007), estimaron en bosques tropicales subcaducifolio una captura de 94 MgC ha⁻¹, de los cuales 68 MgC ha⁻¹ se encuentran almacenados en los fustes, ramas y hojas, y el 14 MgC ha⁻¹ están en las raíces.

López-Telles *et al.* (2007), estimaron el carbono en bosques de pino-encino de Chihuahua, México, encontrando un contenido de carbono promedio de 42 MgC ha⁻¹ y 6 MgC ha⁻¹, en la biomasa de pino y encino respectivamente.

Régimen de propiedad de los bosques de México.

En México un 70% de los bosques es propiedad ejidal o comunal (Acosta y Etchevers, 2005). Según la Ley Federal de Reforma Agraria un ejido es la porción de tierra, bosque o agua que el gobierno entregó a un núcleo de población campesina para su explotación. Tomando en cuenta el artículo 52 del capítulo I sobre la propiedad de los bienes ejidales y comunales, dice que, se aplicara la ley a los bienes que pertenecen a los núcleos de población que de hecho o por derecho guarden el estado comunal (Ley Federal de Reforma Agraria, 1983).

En estos bosques se ha realizado algunos proyectos para mitigar la grave amenaza que existe en la región. Pero varios investigadores de América latina saben que es una gran oportunidad para avanzar en el desarrollo económico de propiedades ejidales y/o comunales (Acosta y Etchevers, 2005; Ordóñez, 1999; Masera *et al.*, 2000).

Pago por servicios ambientales.

Un aspecto esencial para poder implementar las diferentes opciones de mitigación forestal es determinar sus costos económicos en términos de los denominados “Costos Captura Carbono” (Masera *et al.*, 2000), es decir los costos por unidad de carbono capturado.

El pago por servicios ambientales es un mecanismo que se ha implementado en varios países para la protección y el manejo sostenible de los recursos naturales (Immerzeel *et al.*, 2008).

Algunos estudios realizados en América latina ha tenido un pago por servicio ambiental de entre 13 y 45 US\$ pero se ha tenido un precio base para servicio ambiental que es de 10 US\$ por tonelada por hectárea.

Importancia del estudio de Amecameca.

En proyectos de captura de carbono, algunos sistemas forestales tienen un potencial de captura de carbono y al mismo tiempo contribuyen en el desarrollo económico y social de los productores y comunidades particulares (Pagiola *et al*, 2006).

La importancia de realizar este estudio en los bosques de Amecameca es por su gran riqueza forestal y están presentes en la zona de influencia del Parque Nacional Izta-Popo, así como por su cercanía a la zona metropolitana del Valle de México, lo que ocasiona la gran incidencia de carbono que existe en esta zona y requiere ser capturado.

Por lo anterior los ejidatarios requieren conocer la cantidad de carbono que capturan sus bosques, y conocer si son adecuados para generar servicios ambientales por el concepto captura carbono y recibir un beneficio económico de ello.

La mayor parte del municipio de Amecameca es forestal, ocupa la mitad de su territorio y solo el 4% se ocupa como zona urbana. Tiene aproximadamente 8, 000 hectáreas de bosque de las cuales 5, 000 pertenecen a bienes comunales de la región y las restantes son de pequeña propiedad.

Se distinguen tres zonas: 1) Protección: Se ubican en la zona de los volcanes, donde existen bosques de pino y encino; (2) Conservación: comprende las zonas agrícolas; y (3) Restauración: que es la parte contigua al Popo (PMDUA, 2003)

Las alteraciones al medio ambiente más representativas se dan sobre las faldas de los volcanes, que son provocadas esencialmente por la tala ilegal (PMDUA, 2003).

Por lo anterior es importante conocer el potencial de captura de carbono de los bosques comunales tanto conservados, como en repoblación, así como afectados por tala y plaga.

Se considera que el bosque de *Pinus hartwegii* es la vegetación predominante cerca de los volcanes y que son los principales almacenes de carbono.

Preguntas de investigación

¿Cuánto carbono almacenan los bosques comunales de *Pinus hartwegii* con diferente grado de alteración y repoblación?

Hipótesis

Según Ordóñez *et al.*, (2001), el contenido de carbono en un bosque de *Pinus* es de 217 MgC ha⁻¹, en tanto, Zamora (2003) registró únicamente 22 MgC ha⁻¹. Por lo anterior, los bosques de *Pinus hartwegii* registraran entre 22 a 217 MgC ha⁻¹.

Objetivos

General.

Determinar la cantidad de carbono que almacena el bosque de *Pinus hartwegii* de la comunidad de Amecameca, Estado de México.

Particulares.

a) Determinar la densidad y la distribución diamétrica de arbolado de un bosque de *Pinus hartwegii*, con diferentes grados de conservación.

b) Estimar la relación DAP-contenido de carbono en los bosques de *Pinus hartwegii* comunales de Amecameca, Estado de México.

Descripción de la zona de estudio.

Ubicación: El municipio de Amecameca está situado en las faldas de la Sierra Nevada, dentro de la provincia del eje neovolcánico y en la cuenca del río Moctezuma – Pánuco (PMDUA, 2003).

Sus coordenadas son longitud N 98° 37' 34'' y 98° 49' 10'', latitud O 19° 3' 12'' y 19° 11' 2''. La altura sobre el nivel del mar es de 2,420 metros en la cabecera municipal. Se ubica en la porción sur del oriente del estado de México (PMDUA, 2003).

Clima. Dentro del Municipio de Amecameca predomina el clima frío, cuenta con una temperatura promedio 14.1 °C, una máxima de 18°C y una mínima de 3 °C, aunque en las partes altas puede descender bajo cero en cualquier temporada del año (PMDUA, 2003).

El mes más frío es Enero con 2.4 °C promedio pero en Febrero o Diciembre puede descender a temperaturas bajo cero. Los meses más calurosos son Abril y Mayo (hasta 34 °C) (Gaceta Municipal, 2006).

La clasificación climática elaborada por el instituto de Geografía de la UNAM indica que esta zona es de tipo C (w₂)(w) para altitudes menores a los 3800 m. más húmedo que los templados subhúmedos con lluvias en verano (Gaceta Municipal, 2006).

Para altitudes mayores a 3800 m, el clima es tipo EFHw un clima muy frío con más lluvioso es Julio (341.0 mm). Las granizadas se presentan tres o cuatro veces al año (Gaceta Municipal, 2006).

Los vientos en la primavera son del Norte y en otoño son del Sur. La temporada de lluvias empieza a finales del mes de Mayo y principios del mes de Junio y terminan en el mes de Octubre (Gaceta Municipal, 2006).

Hidrografía. El municipio forma parte de la Región Hidrológica del Valle de México, originada fundamentalmente por aguas de deshielo de los volcanes (Gaceta Municipal, 2006).

La microcuenca de Amecameca de Juárez presenta corrientes subterráneas alimentadas por la filtración de agua de lluvia, la que no se filtra es captada para los sistemas de agua de algunas poblaciones incluida Amecameca, también se forman algunos ríos y arroyos como son: Palo Rechino, Amalacaxco, Alcalican- Los Reyes, Chopanac, Estotzongo, La Coronilla- Amipulco, casi todos llegan al Río Amecameca para luego unirse a la Subcuenca de Chalco (Gaceta Municipal, 2006; PMDUA, 2003).

El acuífero formado por llano de Ozumba – Amecameca se localiza a profundidades de entre 15 y 150 metros, es agua dulce y por tal susceptible a contaminarse; a más profundidad existen mantos acuíferos potables y de fácil extracción (Gaceta Municipal, 2006).

El Sistema Hidráulico “El Salto” construido entre 1936- 1940 distribuye al Municipio un promedio de 33 litros/segundo, sin embargo, no es el único sistema para la distribución del vital líquido existen otros como el Sistema Morelos, Sistema Los Reyes - Ramos Millán, Sistema Sureste, Sistema Chalma y Santiago Cuautenco (Gaceta Municipal, 2006).

Orografía. La sierra nevada es la cadena más importante de la región; recorre el territorio de norte a sur y sus vertientes ocupan la mayor parte de la zona oriente. La sierra Nevada culmina en los volcanes del Popocatepetl e Iztaccíhuatl que tienen una altitud de 5452 y 5284 m. s. n. m., respectivamente, y son la segunda y tercera montañas más altas de México.

El Popocatepetl tiene un cráter elíptico, que mide alrededor de 800 m en su eje menor, y tiene una profundidad de 500 metros; ha hecho erupción durante varios años hasta 2004. El Iztaccíhuatl más que un largo edificio volcánico, es una sierra cuyo eje norte sur mide siete kilómetros (PMDUA, 2003).

Está formado por una serie de volcanes alineados más pequeños que son: el Telapón, el Papayo, el Tecámac y el Tláloc. La serranía de Aqualco una ambos volcanes, en el lugar llamado Tlamacaxco, hoy Tlamacas o paso de Cortés. El pecho alcanza la mayor altitud 5286; la cabeza 5146 metros; y los pies 4749 metros. El 20 de julio de 1868 “la volcana” como la llaman los lugareños, expulsó grandes peñascos por una cobertura próxima a la cumbre; desde entonces no hay noticias de actividad en el Iztaccíhuatl (Gaceta Municipal, 2006).

Geología. El Iztaccíhuatl y el Popocatepetl se formaron en el período del Mioceno (PMDUA, 2003; Gaceta Municipal, 2006).

A pesar de su origen común presentan características distintas, ya que mientras el Iztaccíhuatl emergió de una fractura de gran tamaño por donde emanaron materiales en puntos distintos, el Popocatepetl emergió de una sola boca formando la estructura que presenta (edificio volcánico); esto dio origen a una serie de volcanes alineados que lo conforman, son de diferentes tamaños y se conocen como: el Telapón, el Papayo, el Tecámac, y el Tláloc. El Popocatepetl tiene un cráter elíptico que mide alrededor de 800 m. en su eje menor y una profundidad de 500 m (Gaceta Municipal, 2006).

La clasificación geológica de Amecameca de Juárez está conformada de la siguiente manera, existen tres series de rocas del Iztaccíhuatl:

1. Serie Volcánica Xochitepec, las más antiguas expuestas por la erosión de los arroyos a lo largo de las laderas del Iztaccíhuatl y corresponden al Terciario Medio. Las rocas de esta serie son Traquiandesitas de hornablenda de color claro. Muy acentuadas en la cañada Alcalican (Gaceta Municipal, 2006).

2. La serie Volcánica Andesítica Iztaccíhuatl, donde predominan las Andesitas porfidicas de piroxena y conforman la masa principal del volcán (Gaceta Municipal, 2006).

3. Serie Basáltica, son basaltos arrojados en grandes cantidades por los conos pequeños de formación reciente y se sitúan al pie del Iztaccíhuatl; estos son de alta permeabilidad y permiten la infiltración con facilidad formando corrientes subterráneas. Son útiles como material de relleno (Gaceta Municipal, 2006).

En las zonas bajas y planas predominan los aluviales, que dan a esta área un gran potencial para el desarrollo agrícola (PMDUA, 2003).

Edafología. Los suelos de los bosques de Amecameca son andosoles, y litosoles (PMDUA, 2003), y el material parental de los suelos está formado por cenizas volcánicas y pómez (tefras) (Gaceta Municipal, 2006).

Litosoles: son suelos de 10 cm. de espesor sobre roca de tepetate, estos suelos no se desarrollan debido a la altitud en la que se ubican (mas de 4,500 m. s. n. m.) clima frío y rápido escurrimiento del agua hacen que difícilmente se implante la vegetación (Gaceta Municipal, 2006).

Andosoles: se caracterizan por derivarse de las cenizas volcánicas recientes presentan características de baja densidad aparente, son suelos ligeros con alta retención de humedad y nutrimentos puede presentar un horizonte A (úmbrico, mólico, ócrico o vítrico), y un horizonte B (cámbrico poco desarrollado) (Gaceta Municipal, 2006).

Flora. Este bosque se ubica entre los 3,500 y 4,200 metros de altitud. Son pinares abiertos, donde predomina una sola especie de pino (*Pinus hartwegii*), con abundantes gramíneas amacolladas, es un bosque que se mezcla entre las altitudes más bajas con abetos y ailes. En los volcanes, el pino (*Pinus hartwegii*) llega a las mayores altitudes en el mundo (PMDUA, 2003).

Por encima de los 4,000 msnm, este bosque se mezcla con una pradera alpina o vegetación de paramos de altura; las especies dominantes son los pastos amacollados, así como el cardo santo (*Cirsium nivale*) que tiene propiedades medicinales (PMDUA, 2003).

Entre los 3,400 y los 2,900 msnm, se localiza el segundo piso de vegetación, formado por oyameles (*Abies religiosa*), que se encuentran principalmente en los cañones, mientras en las laderas son dominantes los pinos y cedros. Se encuentran madroños (*Arbutus xalapensis*) y ailes (*Alnus firmifolia*). Las especies arbustivas y herbáceas no varían mucho del estrato anterior, pero no solo son tan abundantes gracias a que hay una conservación de la vegetación original. En el límite superior de éste piso se forma una masa original de oyameles o abetos donde mora una gran cantidad de la fauna silvestre (PMDUA, 2003).

Fauna. A lo largo de la microcuenca se observa una diversidad de la fauna silvestre que alberga desde mamíferos, aves, reptiles, anfibios e insectos que sin duda se han adaptado al clima, al tipo de hábitat y a las diferentes altitudes (PMDUA, 2003).

Es notable la presencia de una especie que vive en esta zona, el conejo de los volcanes o teporingo (*Romerolagus diazii*); otros animales son: la musaraña (*Criptotys alticola*), conejos y liebres (*Syvilagus florinadus*), ardillas (*Sciurus nelsonii*), coyote (*Canis latrans*), armadillo (*Dasipus novemcinctus*), mapaches (*Procyón lotor*) y Zorrillo (*Mephitis mephitis*) (PMDUA, 2003).

Entre los reptiles más significativos encontramos la víbora de cascabel (*Crotalus triseriatus*), lagartijas y tizincoyotes (PMDUA, 2003).

En cuanto a las aves, tienen presencia el gavilancillo (*Falco sparverius*), águilas, correcaminos, codorniz, lechuza, búho, cuervo, zenzontle, jilguero, calandria, gorrión, azulejo, tórtola, coquito, chillón, tigrillo, primavera, carpintero, colibrí, chochoyota, seseto, cardenal, cacaxtle, tordo y mulato. Dentro de los insectos habita la araña capulina, araña tigre, alacrán, catarinas, mosquitos, mariposas, palomas y gusanos de varias especies (PMDUA, 2003).

Lamentablemente existe fauna que se encuentra en peligro de extinción, por la cacería a que está expuesta y el tráfico ilegal de animales, las especies en desaparición son el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), esta especie actualmente se encuentra bajo un programa de reproducción en cautiverio en la UMA Temascal; el venado, zorros, el mázate, gato montes, puma y diversas aves. (PMDUA, 2003).

Material y Método

Selección del área de estudio.

Por medio de un mapa y con el apoyo de las autoridades de Bienes Comunales de Amecameca, se ubicó el área de estudio perteneciente a los bosques comunales de Amecameca, Estado de México. Se eligió un bosque cuya especie predominante es el de *Pinus hartwegii* y las áreas de muestreo (cuadro 3), se consideraron representativos por tener árboles de diferentes edades y diferentes condiciones de conservación.



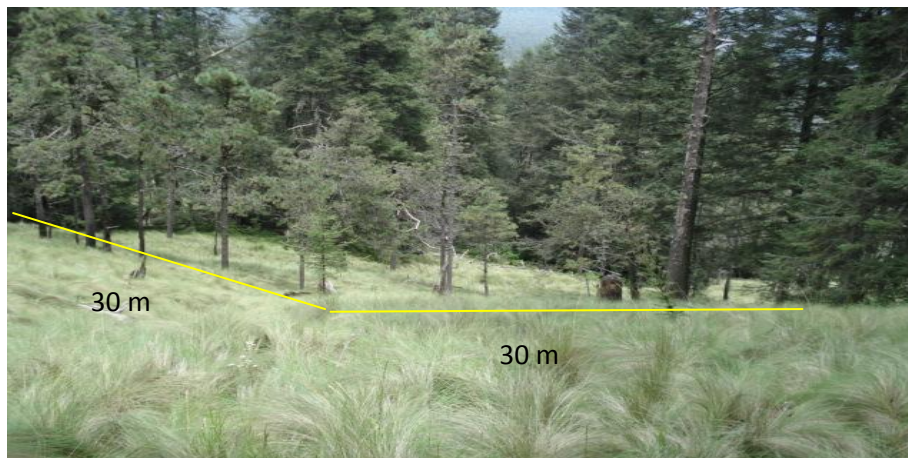
Figura 3. Bosques comunales de *Pinus hartwegii* en distintos niveles de conservación.

Cuadro 4. Coordenadas de bosques comunales de *Pinus hartwegii* en diferentes condiciones de conservación.

Sitio	Bosque	Coordenadas
I	Bosque Conservado	N 19° 05' 04.21''
II		W 98° 39' 02.61''
III	Bosque Plagado	N 19° 05' 18.83''
IV		W 98° 37' 09.12''
V	Sitio con repoblación	N 19° 05' 20.82'' W 98° 37' 08.80''
		N 19° 05' 20.61'' W 98° 37' 15.51''

Método de muestreo.

Cada sitio de muestreo fue de aproximadamente 1000m² (0.1Ha).



Se establecieron cinco sitios de muestreo: 1) dos sitios con bosque conservado reconocido por ausencia de vestigios de tala, tocones, incendios, plagas o pastoreo. 2) dos sitios con bosque plagado presentaba vestigios de *Dendrotocnus sp.*, con árboles de vigor bajo y ramas secas. 3) un sitio con repoblación de individuos juveniles de *Pinus hartwegii* de 1 a 26 años.

Registro de datos.

En cada sitio se contabilizaron todos los árboles, para obtener la densidad arbórea (num. de árboles/0.1ha.) y se tomaron datos de: *Altura*. Midiendo con una cinta métrica desde la base hasta ápice del ultimo verticilo. *Edad*. Se estimó contando el número de nudos presentes en el fuste divididos entre dos y corroborando la información proporcionado por los comuneros (información proporcionada por el C. Fernando Cisneros Velázquez, Presidente Comisariado de Bines Comunales de Amecameca). *Diámetro o DAP*. Se determinó con una cinta métrica hasta la altura del pecho que es de aproximadamente 1.30m.

Se colectaron 6 plantas completas de las siguientes edades: dos individuos de 1 año, un individuo de 4 años, un individuo de 6 años, un individuo de 10 años y un individuo de 68 años de edad. En cada individuo se cuantifica la biomasa de raíz, tallo o fuste, ramas, ramillas y hojas.



La biomasa de raíz se obtiene excavando cuidadosamente hasta obtenerla lo más completa e intacta posible, después se obtiene el peso fresco. La biomasa del tallo, se obtiene desde el cuello de la raíz hasta la yema apical. En árboles de más de 10 años, se fragmentará en secciones para así registrar su peso total. La biomasa de las ramas se obtiene separándolas de las hojas y pesándolas. La biomasa de las hojas se obtiene registrando su peso conjunto.



Las muestras se empaquetaron y se trasladaron al laboratorio para la obtención del peso seco.

En laboratorio las muestras tomadas en campo fueron puestas a secar en una estufa (Felisa, modelo FE-132D, serie 0203133) a una temperatura constante de 37° C, durante 72 horas, para lograr eliminar el agua contenida.

Posteriormente las muestras se sacan de la estufa y son pesadas de la misma manera que se hizo en campo para así obtener su peso en seco o biomasa.



Análisis de datos.

Para obtener el peso del carbono almacenado se considero multiplicar el peso de la biomasa por el factor de 0.5.

Para obtener la ecuación biomasa, se graficó edad contra biomasa de cada componente. Se procede a encontrar la ecuación por regresión lineal con modelos: lineal simple, exponencial, potencial, logarítmico y polinomial, se elige la ecuación que tenga mayor coeficiente de determinación R^2 .

Para obtener la ecuación diámetro-edad se grafican los datos de diámetro-edad. Se procede a encontrar la ecuación por regresión lineal, se elige la ecuación que tenga mayor coeficiente de determinación R^2 .

Para obtener la estructura dimétrica, de cada cuadrante se registraron todos los arboles y se obtuvo la densidad arbórea promedio por ha^{-1} y el diámetro.

Los datos que se obtuvieron en este trabajo solo consideraron el carbono acumulado en biomasa aérea y raíz, porque los comuneros de Amecameca decidieron que estos bosques sean utilizados para fines de conservación.

Resultados

Estructura diamétrica.

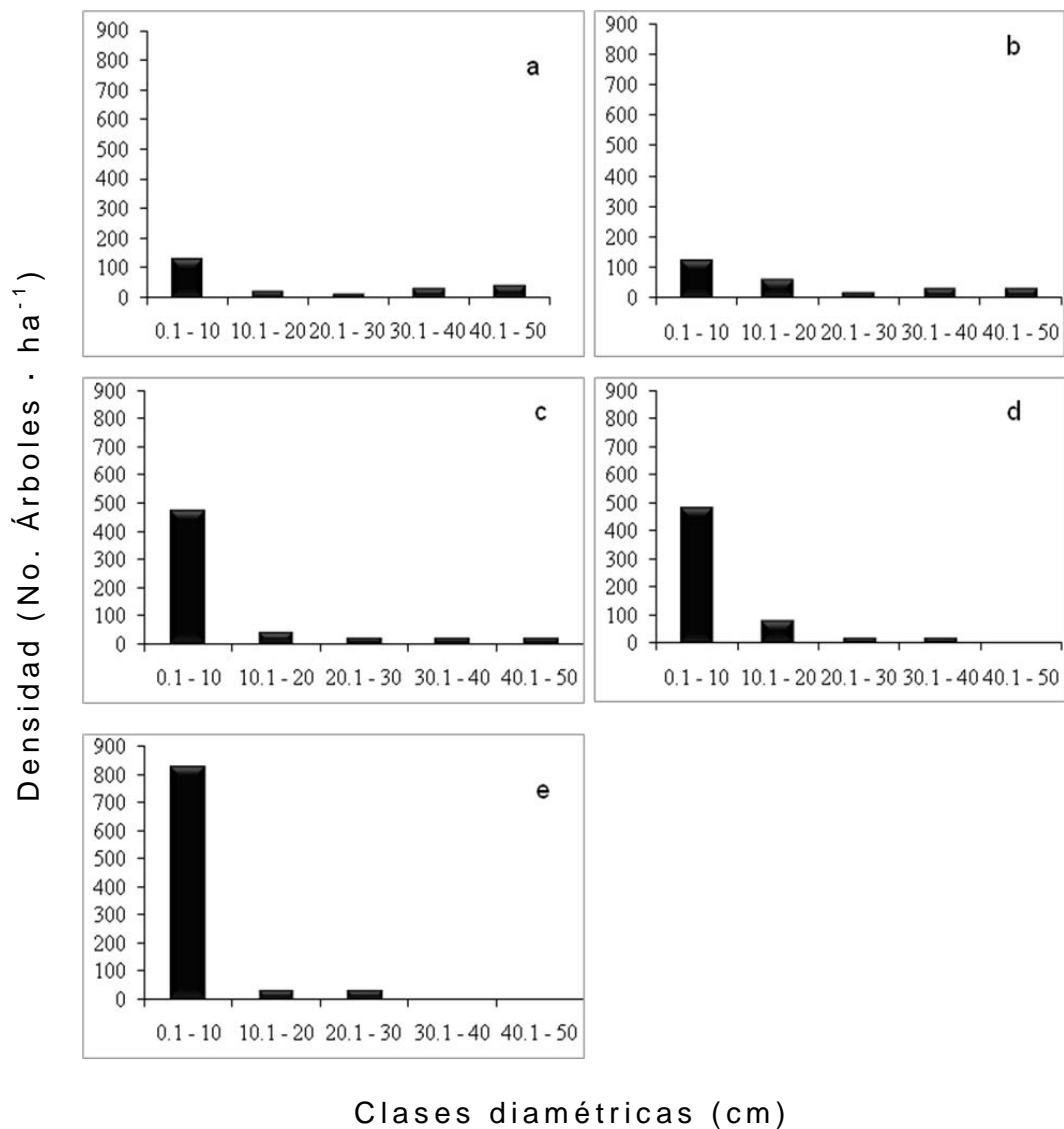


Figura 4. Estructura diamétrica de los bosques comunales: a, b) bosques conservados; c, d) bosques plagados y e) sitio con repoblación de *Pinus hartwegii* de Amecameca, Estado de México.

La densidad de los cinco sitios presentó una dominancia en la categoría diamétrica menor de 10 cm con 130, 120, 470, 480 y 830 individuos por ha^{-1} , en los sitios de bosques conservados, plagados y sitios con repoblación respectivamente (Figura 4).

Edad –diámetro.

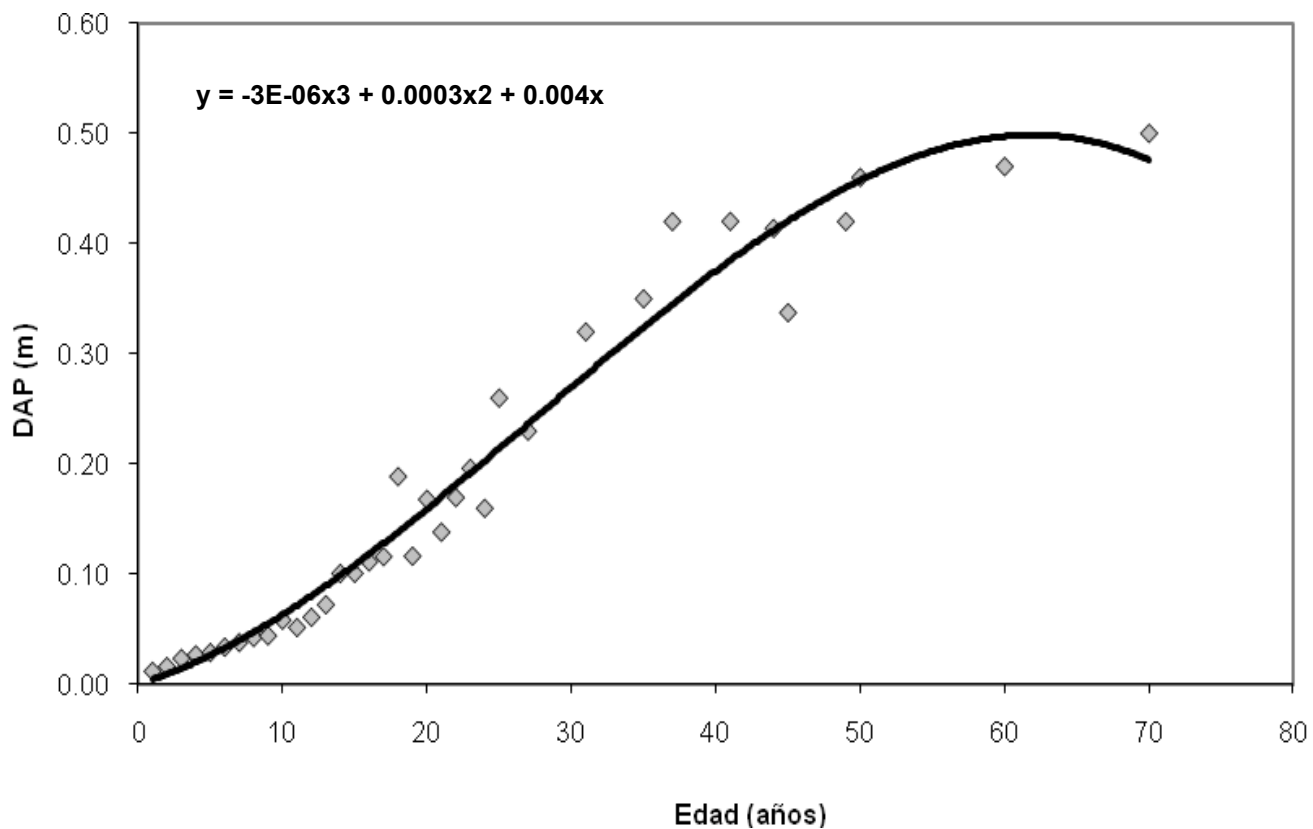


Figura 5. Relación entre el DAP y la edad de *Pinus hartwegii* de los bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

La relación DAP-Edad, se ajusto con una ecuación polinomial de tercer orden que muestra una R^2 de 0.9667. El DAP máximo se encuentra a los 50 m (Figura 5).

Biomasa.

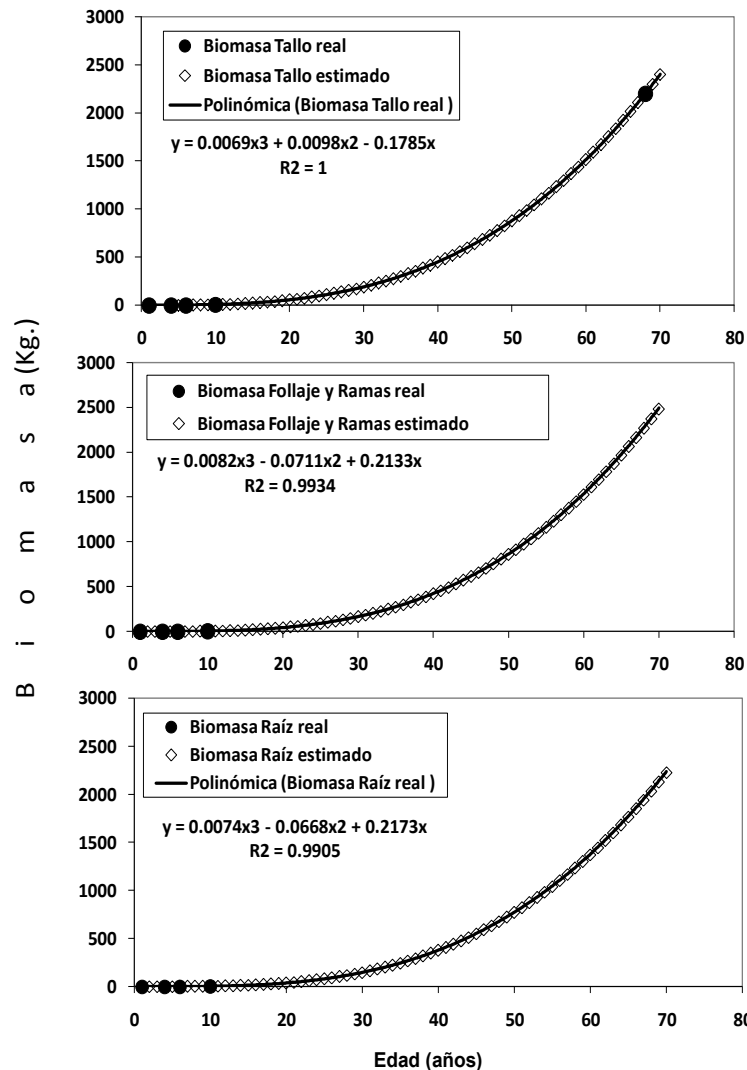


Figura 6. Relación de Biomasa de 3a) Tallo, 3b) Follaje y Ramas, 3c) Raíz; con respecto a la edad de individuos de Pinus hartwegii de los bosques comunales del municipio de Amecameca, Estado de

La relación Biomasa – Edad en los tres casos se ajusto con una ecuación polinomial de tercer orden, con una R^2 de 1 para el caso de la biomasa de tallo, R^2 de 0.9934 para la biomasa de follaje-ramas y una R^2 de 0.9905 para la biomasa de raíz (Figura 6.)

Altura.

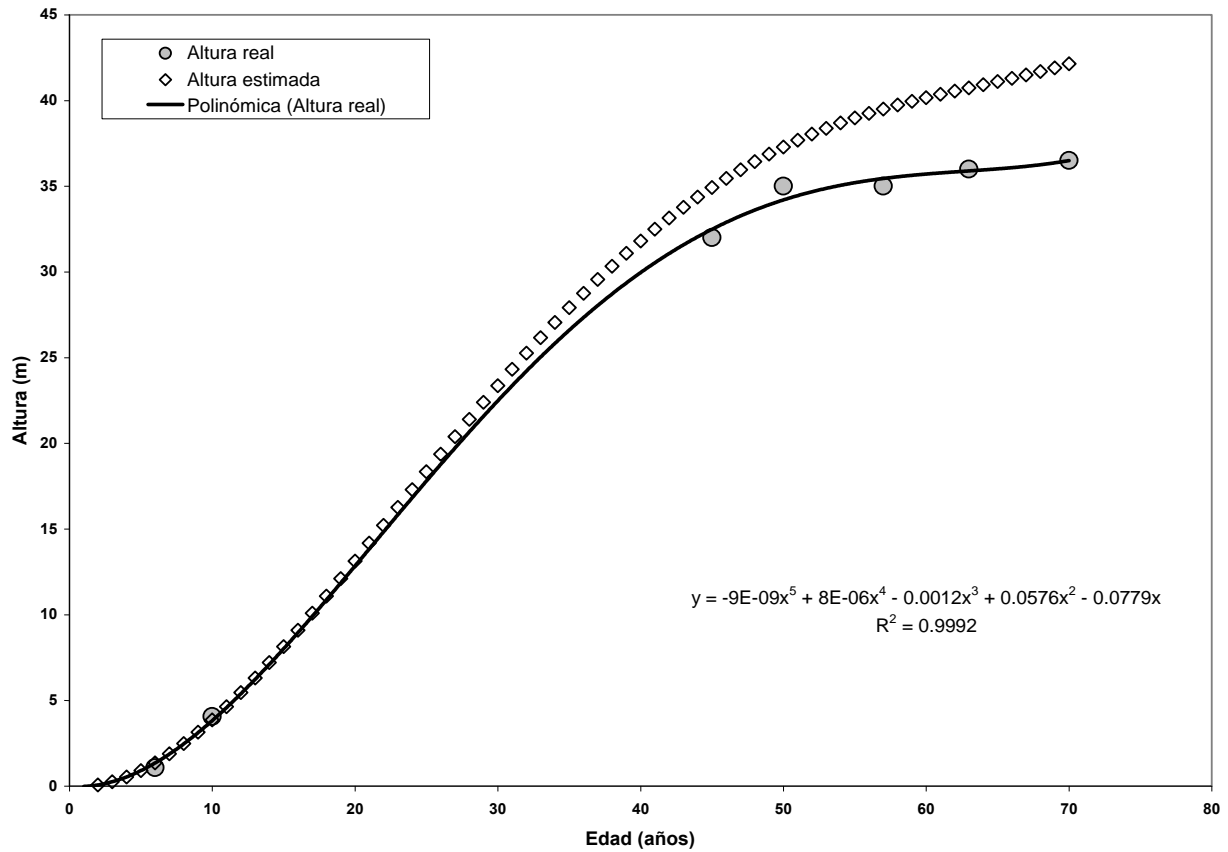


Figura 7. Relación entre la altura real y la altura estimada con respecto a la edad de individuos de *Pinus hartwegii* de los bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

Se presentó la máxima altura de 35 m aproximadamente a la edad de 50 años y la relación Altura – Edad se ajustó con una ecuación polinomial de quinto orden con una R^2 de 0.9992 (Figura 7).

Carbono Total.

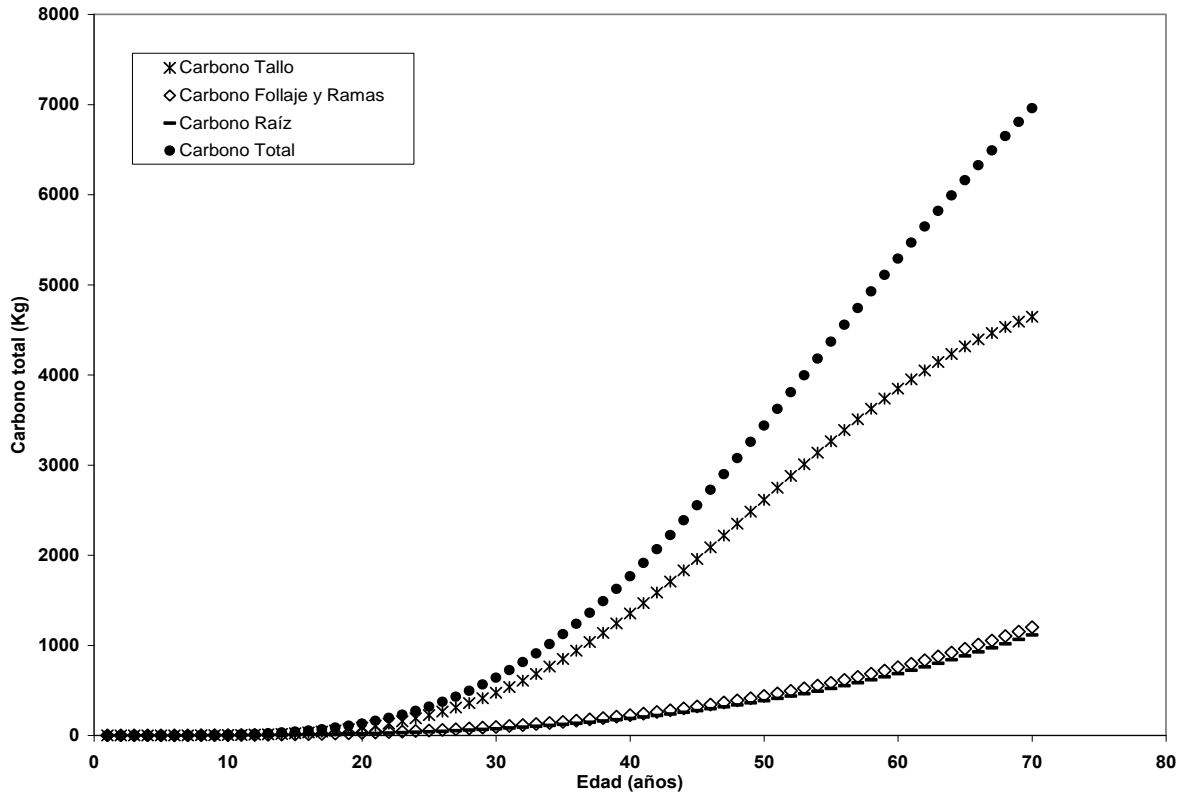


Figura 8. Carbono total con respecto a la edad de individuos de *Pinus hartwegii* de los bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

El carbono total presente en un individuo de *Pinus hartwegii* comienza a crecer a la edad de los 20 años. El tallo presenta un gran contenido de carbono, le sigue el carbono de Follaje – Ramas y el carbono de Raíz que presentan casi el mismo contenido de carbono. En un individuo de 50 años tienen un carbono total 3,438.10 Kg, de los cuales el 74.06% (2,614.63 Kg) corresponde al tallo, 12.76% (439.63 Kg) se encuentran en follaje – ramas y el 11.18% (384.43 Kg) se encuentra en la raíz (Figura 8).

DAP-Carbono Total.

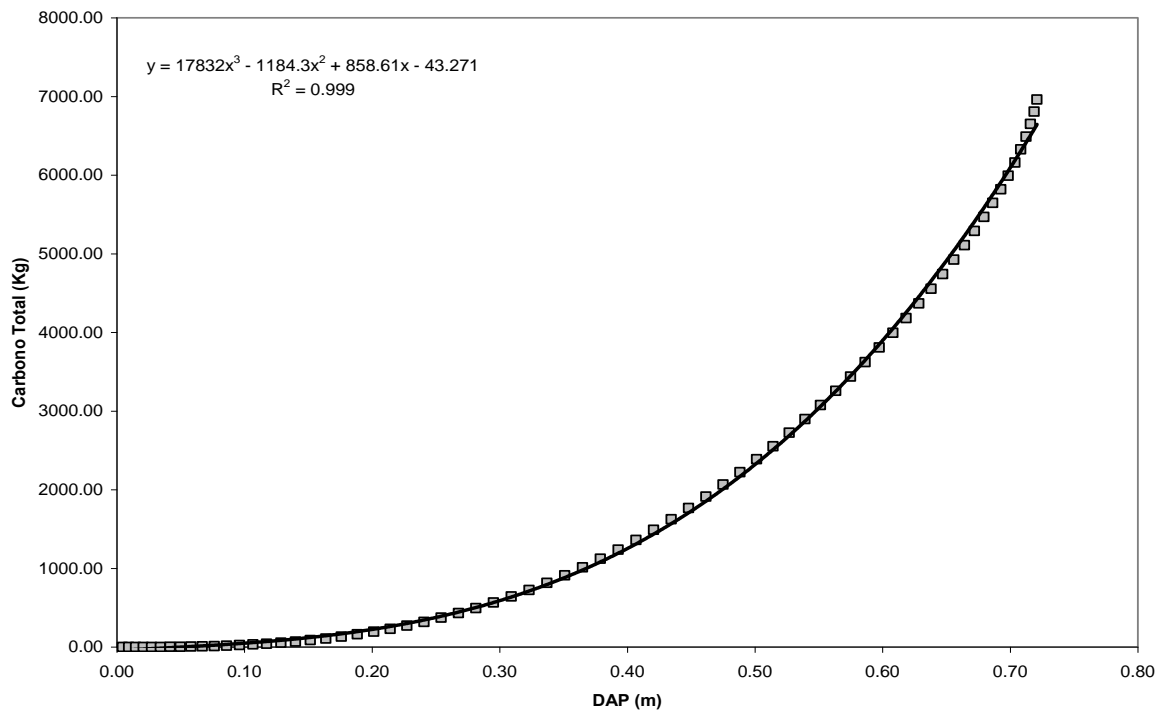


Figura 9. Carbono total almacenado en un individuo con respecto al DAP, en *Pinus hartwegii* de los bosques comunales de Amecameca, Estado de México.

La ecuación que mejor describe la relación DAP-carbono total y que puede ser utilizada por los comuneros es una ecuación polinomial de tercer orden con una $R^2 = 0.999$ (Figura 9.)

Captura de Carbono.

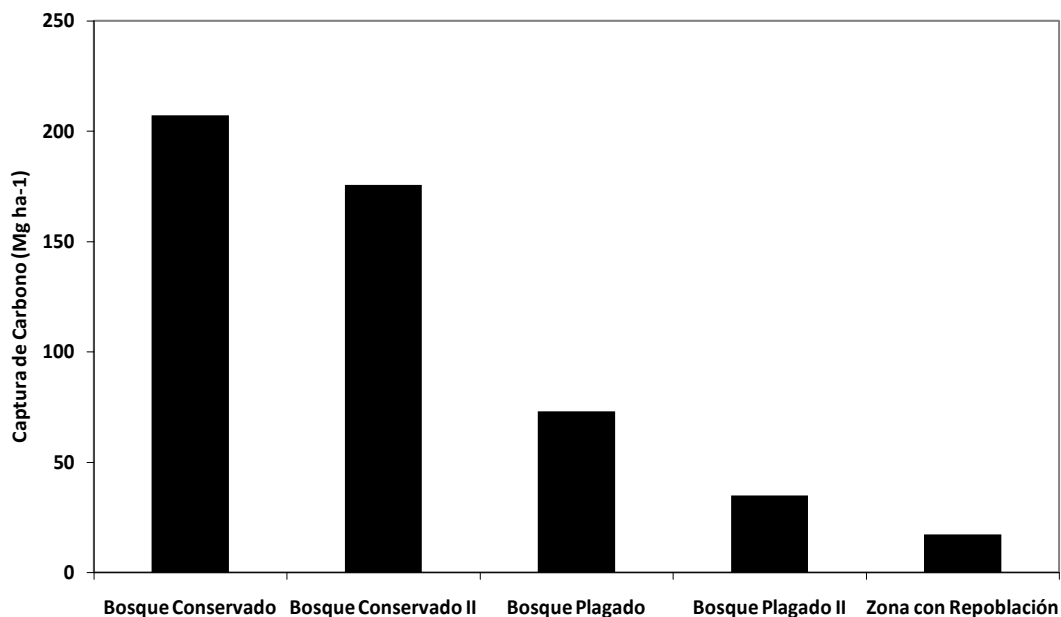


Figura 10. Estimación de Carbono total para Bosques conservados, Bosques Plagados y zona repoblada de los bosques comunales de *Pinus hartwegii* del municipio de Amecameca, Estado de México.

Se presenta mayor contenido de Carbono en el cuadrante II del bosque conservado con $207.058 \text{ MgC/ha}^{-1}$, le sigue el cuadrante I del mismo bosque con un $175.61 \text{ MgC/ha}^{-1}$, para los caso del cuadrante I y II del Bosque plagado tienen un contenido de carbono entre $73.01 \text{ MgC/ha}^{-1}$ y $34.90 \text{ MgC/ha}^{-1}$ y para la zona con repoblación con individuos de hasta 26 años presenta un contenido de carbono de $17.23 \text{ MgC/ha}^{-1}$ (Figura 10).

Discusión

Los bosques comunales de *Pinus hartwegii* de la zona de Amecameca presentaron una dominancia de arbolado con diámetros menores a 10 cm en los tres sitios estudiados, lo que indica que estos bosques presentan repoblación.

La mayor densidad de brinzales de *Pinus hartwegii* en zonas abiertas indican que es posible el establecimiento de plantaciones para la captura de carbono, y estas alcanzaran su mayor DAP (≈ 0.45 m), aproximadamente a los 50 años. A esta edad un individuo acumulará un total de C de 3438 kg. Si se considera que la CONAFOR paga el servicio de captura de carbono en plantaciones, durante los primeros cinco años, entonces :

Edad de plantación	Edad del árbol	# de árboles	Carbono capturado	Pago por Hectarea
1	2	900	1.24434	120
2	3	900	2.66274	260
3	4	900	5.22108	520
4	5	900	9.3762	930
5	6	900	15.58494	1550

Avendaño-Hernández, 2007, estimo la biomasa y carbono en árboles de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et CHAM. Mediante ecuaciones alométricas utilizando 26 árboles de con diámetro normal entre 6.5 y 79 cm, no indica a que edad se alcanza este diámetro, obteniendo la concentración de carbono en el fuste de 46.57%, para las ramas 46% y el del follaje 46.07% por lo que la concentración promedio para un árbol fue de 46.48%.

Para bosques de *Pinus*, Acosta-Mireles et al. (2007), determino el carbono de diferentes componentes para un bosque de *Pinus patula* por medio de ecuaciones alométricas obteniendo así 52.21% de carbono para el follaje, 49.47 % en las ramas y 46.26 % del fuste, de esta forma la concentración promedio por árbol fue de 50.31%, no indica a que DAP ni a qué edad alcanza su mayor concentración.

Nabuurs y Morhen, (1993) determino la captura de carbono mediante ecuaciones alométricas en una vegetación de *Pinus caribea* teniendo como resultado 145 MgC ha⁻¹. Así mismo, con un bosque de pinus radiata utilizando también ecuaciones alométricas obtuvieron 136 MgC ha⁻¹.

De Jong et al. (1997) determino la captura de carbono en bosques de pino por medio de inventarios forestales obteniendo 120 MgC ha⁻¹.

Ordoñez et al. (1998), determino la captura de carbono en un bosque de coníferas utilizando ecuaciones de regresión obtenido 91 MgC ha⁻¹. Odoñez et al. (2001) en un bosque de *Pinus pseudostrubus* determino la captura de carbono por medio del modelo de simulación CO₂Fix, obteniendo 217 MgC ha⁻¹.

Zamora, 2003, utilizo ecuaciones de regresión obteniendo 22.35 MgC ha⁻¹ para un bosque de pino.

Diaz-Lavariega et al 2007, determino el contenido de carbono en un bosque de *Pinus patula* Schl. Por medio de ecuaciones alometricas y tuvo como resultado 183.2 MgC ha⁻¹.

Lopez-Tellez et al. 2007, en un bosque de pino encino determino el contenido de carbono por medio de ecuaciones de regresión lineal y obtuvo 42.026 MgC ha⁻¹.

Rodriguez-Laguna et al. 2007 determino el contenido de carbono para un bosque tropical utilizando el modelo potencial obteniendo 94.6% MgC ha⁻¹.

Los resultados anteriores se ubican dentro de lo registrado para otros bosques de *Pinus*, ya que oscilan desde 22 MgC ha⁻¹ (Zamora 2003), hasta los 217 MgC ha⁻¹ para bosques de *Pinus pseudostrobus* (Ordoñez et al., 2001).

Para los bosques plagados y los bosques con repoblación la captura de carbono es menos en comparación con los estudios registrados de *Pinus*.

En este trabajo se utilizo la ecuación polinomial $y=17832x^3 - 1184.3x^2 + 858.61x - 43.271$, es la mejor que se ajusto con un $R^2= 0.999$ y con ello se evita sobreestimaciones en los resultados de captura de carbono.

El carbono total presente en un individuo de *Pinus hartwegii* comienza a incrementarse a la edad de los 20 años y acumula continuamente carbono. Para un individuo de 50 años obtuvo un carbono total de 34.38 MgC ha⁻¹ de los cuales el 74.06% corresponde al fuste, el 12.76% al follaje y el 11.18% a la raíz.

La captura de carbono en los bosques de *Pinus hartwegii* varia entre los 17.23 MgC ha⁻¹ hasta los 191.33 MgC ha⁻¹. El mayor contenido de carbono se encuentra en los bosques conservados, obteniendo la mayor concentración en el fuste, seguido del follaje y raíz.

Para los comuneros de Amecameca estos resultados son necesarios ya que al saber cuanto carbono capturan sus bosques ellos podrán conocer si sus bosques son rentables para entrar al programa de servicios ambientales.

Conclusiones.

1. Los bosques conservados de *Pinus hartwegii* registran 191.33 MgC ha⁻¹.
2. Los bosques plagados de *Pinus hartwegii* almacenan 53.96 MgC ha⁻¹.
3. Los sitios en repoblación de *Pinus hartwegii* de 26 años capturan 17.23 MgC ha⁻¹.
4. Los bosques de *Pinus hartwegii* presentan uno de los valores mas altos de carbono capturado en bosques de coníferas.

Literatura citada

- Acosta, M., J. D. Etchevers. 2005. Los Sumideros de Carbono: Una Alternativa para el Cobro de Servicios Ambientales. Programa de Investigación en Servicios Ambientales. SAGARPA-INIFAP. pp. 129 – 140.
- Aguirre-Salado, C.A., J.R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, R. Haapanen, A.I. Aguirre-Salado. 2007. Mapeo de Biomasa y carbono en bosques manejados de *Pinus patula* mediante datos espectrales SPOT 5 HRG: regresión y K-nn. VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales.
- Banfield, G. E., J. S. Bhatti, H. Jiang, M. J. Apps. 2002. Variability Regional Scale Estimates of Carbon Stocks in Boreal Forest Ecosystems: Results from West – Central Alberta. *Forest Ecology and Management*. pp. 169. pp. 15 – 27.
- Campbell, J. E., J. C. Moen, R. A. Ney, J. L. Schnoor. 2007. Comparison of Regression Coefficient and GIS-based Methodologies for Regional Estimates of Forest Soil Carbon Stocks. *Environmental Pollution* XX. pp. 1 – 7.
- Carpio, C., O. Ramírez. 2001. Estudios Económicos Sobre El Uso de los Bosques Latinoamericanos Para Mitigar El Cambio Climático. *Revista Asturiana de Economía*. Universidad Tecnológica de Tejas. – RAE No. 21. Pp. 1 – 27.
- Catling, D. C., M. W. Claire. 2005. How Earth's Atmosphere Evolved to an Oxidic State: a Status Report. *Earth and Planetary Science Letters*, 237. pp. 1 – 20.
- Chidiak, M., A. Moreyra, C. Greco. 2003. Captura de Carbono y Desarrollo Forestal Sustentable en la Patagonia, Argentina: Sinergias y Desafíos. CENIT-CEPAL-UDESA. Argentina. pp. 1 – 136.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala, J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de Ecuaciones Alométricas para Estimar Biomasa y Carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13 (1). Pp. 25 – 34.
- Diccionario de la Lengua Española, Real Academia Española. A – Guzpatarra. Madrid, 1984. Pp. 70, 268.
- Feynman, J. 2007. Has Solar Variability Caused Climate Change that Affected Human Culture?. *Advances in Space Research*, 40. pp. 1173 – 1180.
- Foster, N. W., I. K. Morrison. 2002. Carbon Sequestration by a jack pine Stand Following Urea Application. *Forest Ecology and Management*, 169. pp. 45 – 52.
- Fragoso, P. I. 2003. Estimación del Contenido y Captura de Carbono en Biomasa Aérea del Predio “Cerro Grande” Municipio de Tancítaro Michoacán, México. Uruapan, Michoacán. Tesis. pp. 1 – 77.
- Gaceta Municipal (2006). Plan de desarrollo Municipal 2006 – 2009. Órgano Informativo. No. 1. pp. 1 – 174.
- Gayoso, J. 2000. Medición de la Capacidad de Captura de Carbono en Bosques Nativos y Plantaciones de Chile. *Revista Forestal Iberoamericana*. Universidad Austral de Chile. Vol. 1 (1): Pp. 1 – 13.
- Gutiérrez, V., G. Lopera. 2001. Valoración Económica de la Fijación de Carbono en Plantaciones Tropicales de *Pinus plántula*. Universidad Nacional de Colombia. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. pp. 1 – 19.
- Gutrich, J., R. B. Howarth. 2006. Carbon Sequestration and the Optimal Management of New Hampshire Timber Stands. *Ecological Economics* Vol. 62. pp. 441 – 450.

- Hodell, D. A., F. S. Anselmetti, D. Aristegui, M. Brenner, J. H. Curtis, A. Gilli, D. Grzesik, T. J. Guilderson, A. D. Müller, M. B. Bush, A. Correa-Metrio, J. Escobar, S. Kutterolf. 2008. An 85 – Ka Record of Climate Change in Lowland Central America. *Quaternary Science Reviews*. Vol. 10, No. 1016. pp. 1 – 13.
- Husch, B. 2001. Estimación del Contenido de Carbono de los Bosques. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. INFORA, Chile. pp. 1 – 9.
- Huynh, T. T., C. J. Poulsen. 2005. Rising Atmospheric CO₂ as a Possible Trigger for the end – Triassic Mass Extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 217. pp. 223 – 242.
- Immerzeel, W., J. Stoorvogel, J. Antel. 2008. Can Payments for Ecosystems Services Secure the Water Tower of Tibet?. *Agricultural Systems*, 96. pp. 52 – 63.
- Jara, L. F., F. Gutierrez, A. Paspuel, G. Ordóñez, P. Asimbaya. 2001. Monitoreo de Plantaciones Forestales para Fijación de Carbono en el Ecuador. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistema Forestales. Chile. pp. 1 – 21.
- Kirby, K. R., C. Potvin. 2007. Variation in Carbon Storage Tree Species: Implications for the Management of a Small-Scale Carbon Sink Project. *Forest Ecology and Management*, 246. pp. 208 – 221.
- Kraenzel, M., C. Potvin, A. Castillo, T. Moore. 2003. Carbon Storage of Harvest – age teak (*Tectona grandis*) Plantations, Panama. *Forest Ecology and Management* No. 173. Pp. 213 – 225.
- Krcmar, E., G. C. van Kooten. 2005. Boreal Forest Carbon Sequestration Strategies: A Case Study of the Little Red River Cree First Nation Land Tenures. *Canadian Journal of Agricultural Economics* 53. pp. 325 – 341.
- Lasaga, A. C., H. Ohmoto. 2002. The Oxygen Geochemical Cycle: Dynamics and Stability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 6, No. 3. pp. 361 – 381.
- Ley Federal de Reforma Agraria. 1983. Vigésima cuarta Edición. Editorial Porrúa.
- Liu, J., J. Drummond, Q. Li, J. C. Gille, D. C. Ziskin. 2005. Satellite Mapping of CO Emission from Forest Fires in Northwest America Using MOPITT Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 95. pp. 502 – 516.
- Liu, J., S. Liu, T. R. Loveland. 2006. Temporal Evolution of Carbon Budgets of the Appalachian Forests in the U. S. from 1972 to 2000. *Forest Ecology and Management*, 222. pp. 191 – 201.
- Locatelli, B., S. Leonard. 2001. Un Método para Medir el Carbono Almacenado en los Bosques de Malleco, Chile. *Bois et Forêts des Tropiques*, 267 (1). pp. 69 – 81.
- Madrigal, J., C. Hernando, M. Guijarro, C. Díez, E. Jiménez. 2006. Distribución de biomasa y Fijación de Carbono Tras Clareos Mecanizados Intensos en Regenerado Post-Incendio de *Pinus pinaster* Ait. *Invest Agrar: Sist Recur For* 15 (2). Guadalajara, España. pp. 231 – 242.
- Masera, O. R. 2001. Carbon Sequestration Dynamics in Forestry Projects: The CO2FIX V.2 Model Approach. Instituto de Ecología, UNAM. México, D. F. Pp. 1 – 13.
- Masera, O. R., B. De Jong, I. Ricalde. 2000. Consolidación de la Oficina Mexicana para la Mitigación de Gases de Efecto Invernadero. Instituto de Ecología, UNAM. pp. 1 – 185.

- Monroy, R. C., J. N. Chaidez. 2004. Ecuaciones de Aditividad para Estimar Componentes de Biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques*. Vol. 10 (2). pp. 29 – 43.
- Montero, G., M. Muñoz, J. Dones, A. Rojo. 2004. Fijación de CO₂ por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. en los montes «Pinar de Valsaín» y «Matas de Valsaín». *Campus Universitario*. 27002 Lugo. España. pp. 399 – 415.
- Montoya, G., L. Soto, B. De Jong, K. Nelson, P. Farias, P. Yakactic, J. H. Taylor. 1995. Desarrollo forestal sustentable: Captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología. México. pp. 1 – 50.
- Ordóñez, D. J. 1999. Captura de Carbono en un Bosque Templado: el Caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología – SEMARNAP. Primera Edición. México, D. F. pp. 1 – 74.
- Ordóñez, J. A., B. H. de Jong. O. Maser. 2001. Almacenamiento de Carbono en un Bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7 (2). pp. 27 – 47.
- Ordóñez, J. A., O. Maser. 2001. Captura de Carbono ante el Cambio Climático. *Madera y Bosques*, 7 (1). pp. 3 – 12.
- Pagiola, S. Bishop, N. Landell – Mills. 2006. La venta servicios ambientales forestales: Mecanismos basados en el mercado para la conservación y desarrollo. Segunda Edición. Instituto Nacional de Ecología (INE – SERMANAT). México. pp. 337 – 358.
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Amecameca. 2003. Gobierno del Estado de México. Secretaria de Desarrollo Urbano y Vivienda. pp. 1 – 174.
- Raven, J. A., A. J. Karley. 2006. Carbon Sequestration: Photosynthesis and Subsequent Processes. *Current Biology*. Vol. 16. No. 5. pp. 1 – 3.
- Rodríguez, L. R., J. J. Pérez, O. A. Calderón, E. T. Garza. 2006. Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL*. Vol. 9 (2). pp. 179 – 188.
- Ruiz, F. 2003. Simulación Mediante un Modelo basado en Factores Socioeconómicos (LUCS). US AID y Gobierno de México Modelaje de la Deforestación en México e Implicaciones para los Proyectos de Secuestro de Carbono. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, A. C. pp. 1 – 26.
- Sanhueza, J. E. 2005. Seminario, Situación Actual de los Proyectos Forestales en el Mercado de Carbono: El Contexto Nacional. SOFOFA. Santiago, Chile. pp. 24.
- Sans, C., G. Daniluk, R. Escudero, F. Irisity, L. Soria, E. Priore, M. Peludo, G. Arnaboldi, R. Giosa. 2007. Determinación de parámetros y ecuaciones para estimar biomasa en plantaciones forestales. Estudio realizado en el marco del “Convenio Especifico de Colaboración Tecnológica. Uruguay. pp. 1 – 30.
- Schelhaas, M.J., P. W. van Esch, T. A. Groen, B. H. J. de Jong, M. Kanninen, J. Liski, O. Maser, G. M. J. Mohren, G. J. Nabuurs, T. Palosuo, L. Pedroni, A. Vallejo, T. Vilén. 2004. CO2FIX V 3.1 manual – a modellig framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. Wageningen University Enviromental Sciences. pp. 1 – 51.
- Seidl, R., W. Rammer, D. Jäger, W. S. Currie, M. J. Lexer. 2007. Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. *Forest Ecology and Management* 248. pp. 64–79.

-
- Van Kooten, G. C. 2004. Economics of Forest and. Agrucultural Carbon Sinks. Climate Change and Managed Ecosystems. pp. 1 – 34.
- Van Kooten, G. C., E. Krcmar-Nozic, B. Stennes, R. van Gorkom. 1999. Economics of fósil fuel substitution and Word product links when trees are planted to sequester carbon on agricultural lanas in western Canada. Forest Sciences Centre, vol. 29. Canada. pp. 1669 – 1678.
- Zamora, J. C. 2003. Estimación del contenido de carbon en biomasa aérea en el bosque de pino del Ejido “La Majada” municipio de periban de ramos, michoacan. Tesis. Uruapan, Michoacan. pp. 2 – 10.
- Zhang, J. Y. Ge, J. Chang, B. Jiang, H. Jiang, C. Peng, J. Zhu, W. Yuan, L. Qi, S. Yu. 2007. Carbon Storage by Ecological Service Forests in Zhejiang Province, Subtropical China. Forest Ecology and Management No. 245. pp. 64 –75.