



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

Estimación del contenido y captura potencial
de carbono del bosque de *Pinus hartwegii*
Lindl. y *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham
en el Parque Nacional Nevado de Toluca,
Estado de México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G A

P R E S E N T A

IRMA ESTEFANÍA GARCÍA SÁNCHEZ



**Director de Tesis:
Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz.
2011**



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.

1. Datos del alumno

García
Sánchez
Irma Estefanía
Tel. 56394598
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
303047951

2. Datos del tutor

Dr.
Ordóñez
Díaz
José Antonio Benjamín

3. Datos del sinodal 1

Dra.
Almeida
Leñero
Lucía Oralia

4. Datos del sinodal 2

M. en C.
Álvarez
Arteaga
Gustavo

5. Datos del sinodal 3

M. en C.
Hernández
Tejeda
Tomás

6. Datos del sinodal 4

M. en C.
González
Hernández
Antonio

7. Datos de la tesis

Estimación del contenido y captura potencial de carbono de los bosques de *Pinus hartwegii* Lindl. y *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham en el Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México.

62 p.
2011

Dedicatoria

*En memoria de la persona que me enseñó
a sonreírle a la vida a pesar de las adversidades,
porque siempre serás mi ejemplo de fortaleza y voluntad de vivir.*

*A ti, que tuviste la ilusión de verme terminar
esta etapa que inicié a tu lado.*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el conocimiento que ha dejado en mí.

A mi director de tesis el Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez por todo su apoyo en la realización de este trabajo.

Al M. en C. Héctor Hugo Regil García y el Dr. Franco Maass por proporcionar la base de datos y la cartografía de uso de suelo del Parque Nacional Nevado de Toluca que se ocuparon en este estudio.

A mis sinodales: el Dr. Gustavo Álvarez Arteaga, la Dra. Lucía Almeida Leñero, el M. en C. Tomas Hernández Tejeda y el M. en C. Antonio González Hernández, por sus aportaciones y comentarios que hicieron en este estudio.

A la Biól. Regina Vega Trejo y el Biól. Oscar Aguado Bautista por sus revisiones y sugerencias en el trabajo.

A mis amigas de la facultad: Vanessa, Lucía, Regina, Vitzta y Montse por estar conmigo en toda la carrera y después de ella, compartir muchas risas y buenos momentos.

A Oscar, por el inmenso apoyo que me has dado siempre, por tus ánimos y la fuerza que me brindaste para seguir adelante en los momentos malos, por enseñarme a ver este mundo de una manera diferente y motivar en mí muchas cosas buenas, mucho de este logro te lo debo a ti.

A mi querida familia, que me apoyó durante mi formación: mamá, papá, hermano, primas, y a mis tías por su cariño y ánimos únicos en la vida, en especial a mi tía Caro por escuchar las locuras que pasé durante este trabajo y confortarme cuando lo necesitaba...siempre te llevaré conmigo.

RECONOCIMIENTO:

ESTA TESIS SE REALIZÓ CON EL APOYO DEL FONDO MIXTO CONACYT - ESTADO DE MÉXICO, COMO PARTE DEL PROYECTO “DEFINICIÓN DE ACCIONES SOBRE EL RIESGO EN MATERIA DE ADAPTACIÓN Y VULNERABILIDAD PARA EL SECTOR PRIMARIO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MÉXICO”

ÍNDICE

RESUMEN	I
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Un problema de origen social: el cambio climático	1
1.2. Causas antrópicas del cambio climático	3
1.2.1. La atmósfera	
1.2.2. Efecto invernadero	
1.2.3. Emisiones de GEI antropogénicas	
1.3. El carbono en el ambiente	7
1.3.1. Ciclo del carbono	
1.4. Los bosques: una alternativa a la reducción del CO ₂ antropogénico	9
1.4.1. Los servicios ambientales: captura de carbono	
1.4.2. Estimación de la captura de carbono	
II. JUSTIFICACIÓN	15
III. ANTECEDENTES	19
IV. OBJETIVOS	21
4.1. General	21
4.2. Particulares	21
V. ZONA DE ESTUDIO	22
5.1. Localización geográfica	22
5.2. Relieve	23
5.3. Geología	23

5.4. Edafología	24
5.5. Hidrología	25
5.6. Clima	25
5.7. Vegetación	26
VI. MÉTODO	27
6.1. Variables dasométricas	30
6.2. Estructura de los sitios	31
6.3. Estimación del contenido de carbono en la vegetación	33
6.4. Captura potencial de carbono	35
VII. RESULTADOS	36
7.1. Estructura horizontal de la vegetación del PNNT	36
7.2. Contenido de carbono en la vegetación	39
7.3. Captura potencial de carbono	42
VIII. DISCUSIÓN	43
8.1. Estructura horizontal de la vegetación del PNNT	43
8.2. Estimación del contenido de carbono de los bosques de <i>A. religiosa</i> y <i>P. hartwegii</i>	44
8.3. Estimación de la captura potencial de carbono del bosque de <i>A. religiosa</i> y <i>P. hartwegii</i>	46
IX. CONCLUSIONES	49
X. REFERENCIAS	50

ÍNDICE DE CUADROS

	Páginas
Cuadro 1. Componentes principales de la atmósfera terrestre	3
Cuadro 2. Comparación del almacenamiento global de carbono en el bosque boreal, bosque tropical y bosque templado	11
Cuadro 3. Comunidades vegetales y cantidad de sitios muestreados	30
Cuadro 4. Clases diamétricas de los diámetros normales	33
Cuadro 5. Índice de valor de importancia de las especies estudiadas	36
Cuadro 6. Promedio del contenido de carbono por comunidad vegetal	40
Cuadro 7. Captura potencial de carbono y captura de CO ₂ e por comunidad vegetal	42
Cuadro 8. Contenido de carbono (MgC/ha) de diferentes bosques de <i>A. religiosa</i> y <i>P. hartwegii</i> en México	47

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Diagrama para entender el flujo de energía y el efecto invernadero de la tierra	4
Figura 2	Registro de las mediciones directas de CO ₂ en la atmósfera	6
Figura 3	Ciclo del carbono: flujo del carbono en procesos naturales y ocasionados por el humano	8
Figura 4	Flujos de carbono en el ecosistema forestal	10
Figura 5	Emisiones de carbono en México por el uso de combustibles de origen fósil	16
Figura 6	Ubicación del Parque Nacional Nevado de Toluca, Edo. de México	22
Figura 7	Método empleado en la estimación del contenido y captura potencial de carbono en el PNNT	27
Figura 8	Unidades de muestreo utilizadas en las dos etapas del estudio	28
Figura 9	Mapa de los sitios de muestreo y su cobertura de suelo en el PNNT	29
Figura 10	Fórmulas empleadas en el análisis de la estructura de las comunidades vegetales en el PNNT	32
Figura 11	Distribución de las clases diamétricas de las especies arbóreas del Parque Nacional Nevado de Toluca	37
Figura 12	Estructura diamétrica de <i>A. religiosa</i> en el Parque Nacional Nevado de Toluca	38

Figura 13	Estructura diamétrica de <i>P. hartwegii</i> en el Parque Nacional Nevado de Toluca	38
Figura 14	Contenido de carbono total de acuerdo a la comunidad vegetal muestreada del Parque Nacional Nevado de Toluca	39
Figura 15	Distribución de los valores de contenido de carbono de <i>A. religiosa</i> y su línea de regresión generada	40
Figura 16	Distribución de los valores de contenido de carbono de <i>P. hartwegii</i> y su línea de regresión generada	41

RESUMEN

Se realizó la estimación del contenido y captura potencial de carbono de los bosques de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT). Tomando como base los datos registrados en los últimos 7 años por el investigador Sergio Franco Maass, las variables utilizadas, fueron la altura y el diámetro normal (1.30 m) de los árboles en 106 sitios muestreados en las diferentes coberturas forestales. Se clasificó a los bosques de *A. religiosa* y *P. hartwegii* en 9 comunidades vegetales. El contenido de carbono, se calculó por medio de la biomasa, usando un factor de expansión del 1.3 y un factor de contenido de carbono de 0.45. La relación entre el diámetro normal (DN) y el contenido de carbono (CC) se obtuvo por medio de la ecuación $y = 1.855E^{-004} * x^{2.206}$ para *A. religiosa* y $y = 4.097E^{-005} * x^{2.564}$ *P. hartwegii*, con una significancia del 0.98 y del 0.99 respectivamente. El potencial de captura de carbono y de CO₂ se calculó para cada comunidad vegetal estudiada, a partir del incremento corriente anual (ICA) de la especie, densidad y contenido de carbono (CC). Se encontró que *A. religiosa* es la especie que predomina en el PNNT por la alta densidad de individuos; con abundancia en las clases diamétricas de <7.5, 7.5- 12.4 y 12.5- 17.4. La segunda especie con mayor presencia y dominancia fue *P. hartwegii*. En general los bosques de *A. religiosa* obtuvieron el mayor contenido de carbono en la vegetación, principalmente el bosque de *A. religiosa* con 4,999 MgC, aunque en promedio el bosque con el mayor valor fue el de *A. religiosa-P. hartwegii* con 188 MgC/ha. En el caso del bosque de *P. hartwegii*, obtuvo 82.23 MgC/ha, siendo el bosque de *P. hartwegii*-patizal inducido el que obtuvo el mayor promedio del contenido de carbono con 95 MgC/ha. En cuanto a la captura potencial de carbono la comunidad con el valor más alto correspondió al bosque de *A. religiosa* con 78.97 MgC/año, mientras que el bosque de *P. hartwegii* obtuvo 60.23 MgC/año. Es por esto que el PNNT representa una fuente de servicios ambientales por las cubiertas forestales que se distribuyen en el área, principalmente el de la captura de carbono.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Un problema de origen social: el cambio climático

Uno de los problemas graves que enfrenta la sociedad contemporánea, debido a un aumento desmedido del uso de combustibles de origen fósil y la pérdida de ecosistemas, es el “cambio climático”, definido como “el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que ocasionan una alteración en la composición de la atmósfera y un aumento de la temperatura global que se suma con el clima natural” (CMNUCC, 1992).

El clima en el tiempo ha sido variable, impulsado por causas naturales en periodos muy grandes, sin embargo desde el siglo pasado han ocurrido diferentes fenómenos climáticos que se ven relacionados con el calentamiento de la superficie terrestre. Entre dichos fenómenos se encuentran la disminución de la superficie cubierta por nieve o hielos, la reducción del tiempo de congelación de algunos lagos y ríos, el registro del aumento en el nivel del mar de 3.1 mm/año desde 1993, el cambio en los patrones de precipitación de algunas regiones, incrementos en la intensidad de los vientos, entre otros (IPCC, 2007). De los últimos doce años, de acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), once figuran como los más cálidos, con un aumento de temperatura mundial de 0.74°C (IPCC, 2007).

Los diversos efectos ocasionados por el cambio climático impactan el ambiente, a la economía y a la sociedad de todos los países del mundo. Las consecuencias recaen en distintos sectores indispensables en la vida del ser humano como lo son: la disminución del agua dulce, debido a las sequías y pérdida de los glaciares; daños en la agricultura y con esto en la producción de alimentos, alteraciones de los ecosistemas terrestres y costeros, con ello la pérdida de la biodiversidad, llevando a muchas especies de varias regiones del mundo a la probable extinción; y por otra parte la posible proliferación de

enfermedades (como el dengue y la malaria) que perjudican la salud humana (UNFCCC, 2007).

Los eventos climáticos extremos observados en el siglo pasado y principios de éste, originaron una creciente preocupación por la comunidad científica, lo que generó la creación de centros de investigación sobre esos fenómenos. En 1988 se crea el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en el cual personas de diferentes profesiones y nacionalidades realizan evaluaciones sobre la magnitud y las cronologías de los cambios; sus posibles efectos en el ambiente y la sociedad; y la creación de estrategias realistas para poder contrarrestar los efectos del cambio climático (UNFCCC, 2004).

El gran interés que se tuvo, desde la convención de Río de Janeiro, llevó a los países a formar una convención internacional en marzo de 1994, conocida como: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés). En ella, los países se comprometen a reducir sus emisiones de los gases efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles, con el objetivo de estabilizar las concentraciones de dichos gases en la atmósfera, a tal grado de que no causen alteraciones en el sistema climático (Torres y Guevara, 2002; UNFCCC, 2004).

Con el fin de que las partes integradas a la convención cumplieran con la disminución de sus emisiones de una forma contable y precisa, se adopta el Protocolo de Kyoto en 1995; sin embargo éste entró en vigor en 2005 por no lograr que la mayoría de las partes firmaran el acuerdo (UNFCCC, 2007).

Cada año desde la entrada en vigor de la Convención, las partes se reúnen y toman decisiones para el posterior desarrollo de las normas y la adopción de nuevos compromisos sustantivos (UNFCCC, 2007).

1.2. Causas antrópicas del cambio climático

1.2.1. La atmósfera

El planeta está rodeado por una delgada capa de gases denominada atmósfera, dichos gases están sujetos a la acción de la gravedad y se encuentran en diferentes concentraciones constantes ó fluctuantes (Cuadro 1).

Cuadro 1. Componentes principales de la atmósfera terrestre (Wallace y Hobbs, 2006; Mohanakumar, 2008).

Componentes	Concentración por volumen
Nitrógeno (N ₂)	78.08%
Oxígeno (O ₂)	20.95%
Argón (Ar)	0.93%
Dióxido de carbono (CO ₂)	380 ppm
Vapor de agua (H ₂ O)	0-5 ppm
Neón (Ne)	18 ppm
Helio (He)	5 ppm
Metano (CH ₄)	1.75 ppm
Kriptón (Kr)	1 ppm
Hidrógeno (H ₂)	0.5 ppm
Óxido nitroso (N ₂ O)	0.3 ppm
Ozono (O ₃)	0-0.1 ppm
Aerosoles, polvo	Altamente variable

La atmósfera se divide en varias regiones tomando como base el perfil de altitud y de temperatura (Seinfeld y Pandis, 2006). En la parte más interna se encuentra la troposfera, ésta se caracteriza por la disminución de la temperatura con la altura, contiene aproximadamente el 80% del aire de la atmósfera, vapor de agua, nubes, precipitación y movimientos de aire, además de que en ella se da la regulación de la temperatura del aire y el sistema climático (Mohanakumar, 2008). Conforme asciende la altitud se encuentra la estratosfera, cuya importancia radica por la presencia de grandes cantidades de ozono, el cual absorbe la luz ultravioleta de los rayos solares lo que permite que sea habitable la Tierra

(Wallace y Hobbs, 2006). Las siguientes capas son la mesosfera, termósfera y exosfera.

1.2.2. Efecto invernadero

En la atmósfera ocurre un importante fenómeno natural conocido como **efecto invernadero** (Figura 1). Este comienza por la entrada de la luz solar de alta energía a la atmósfera, en donde se retiene un 20% por los gases presentes, ya que éstos no pueden absorber ondas de longitud corta dejando pasar la mayoría hacia la superficie terrestre. El 30% es reflejado al espacio (albedo) y el 50% restante llega a la superficie, se transforma en forma de luz solar de baja energía (onda de longitud grande) y se reemite hacia la atmósfera en donde es absorbida por ciertos gases que pueden retener ese tipo de longitud de onda (Mitchell, 1989; Caballero *et al.*, 2007). Esto hace que se reemitan a la superficie o liberen al espacio los rayos para mantener el equilibrio (Mitchell, 1989; Magaña, 1994). El calor almacenado permite el calentamiento de la superficie del planeta, lo cual genera una diferencia de temperatura de unos 33°C, mayor que si no se tuviera atmósfera y se dejaran escapar los rayos al espacio (Ahrens, 2001).

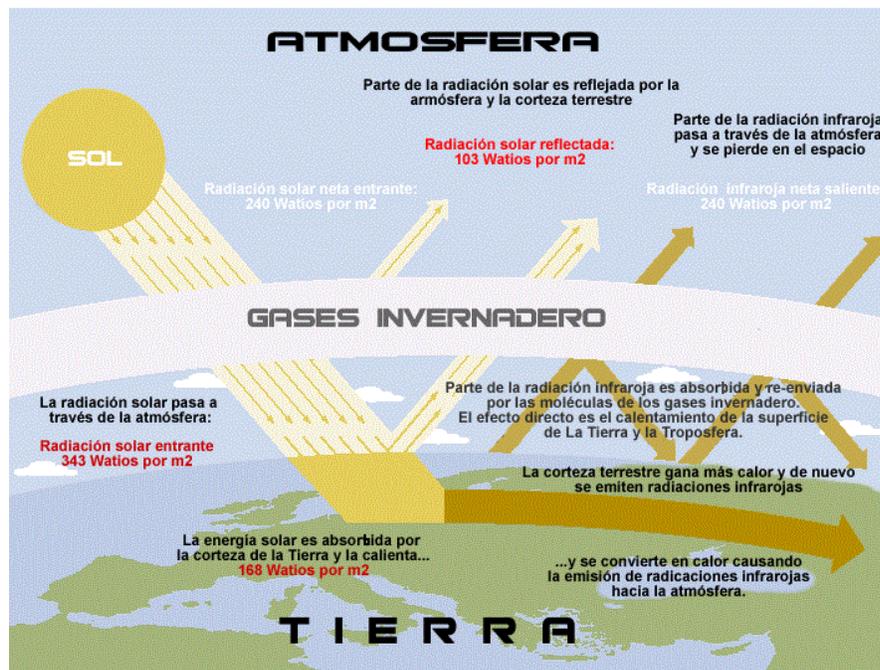


Figura 1. Diagrama para entender el flujo de energía y el efecto invernadero de la tierra (UNDP-GRID-ARENDAL, 2011).

Los gases encargados de este fenómeno son denominados de efecto invernadero (GEI) y son: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃) y gases sintéticos como los clorofluorocarbonados (CFC): hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), siendo los dos primeros los de mayor importancia en el efecto invernadero (IPCC, 2001). Sin embargo, a pesar de que esto sucede de forma natural, ciertas actividades por parte del humano han alterado los niveles de concentración de los GEI en la atmósfera, al introducir nuevas fuentes de emisiones y quitar los llamados sumideros que los incorporan. Tales actividades incluyen el consumo de combustibles de origen fósil, así como la deforestación e incendios forestales. Esto conlleva a un aumento en el efecto invernadero, pues al existir más gases absorbentes, se atrapa mayor radiación que eleva la temperatura del planeta, lo que trae consigo cambios en las variaciones climáticas (Plass, 1956; IPCC, 2001).

1.2.3. Emisiones antropogénicas de GEI

La principal fuente emisora de los GEI es el consumo de combustibles fósiles por parte de las industrias del petróleo, gas y producción de cemento. El aumento de estos gases se ha observado desde comienzos de la revolución industrial en 1750 (IPCC, 2007; Boden *et al.*, 2009).

De los GEI emitidos a nivel mundial por el ser humano, el CO₂ contribuye aproximadamente con un 77% del total de GEI. A la fecha se han liberado aproximadamente 329 billones de toneladas a la atmósfera, principalmente por el consumo de combustibles de origen fósil y la producción de cemento (Boden *et al.*, 2009). De esta cantidad, alrededor de la mitad ha sido liberada desde los años 70's, misma que ha rebasado el intervalo natural que se tenía desde hace 650,000 años (Figura 2; IPCC, 2007; Boden *et al.*, 2009).

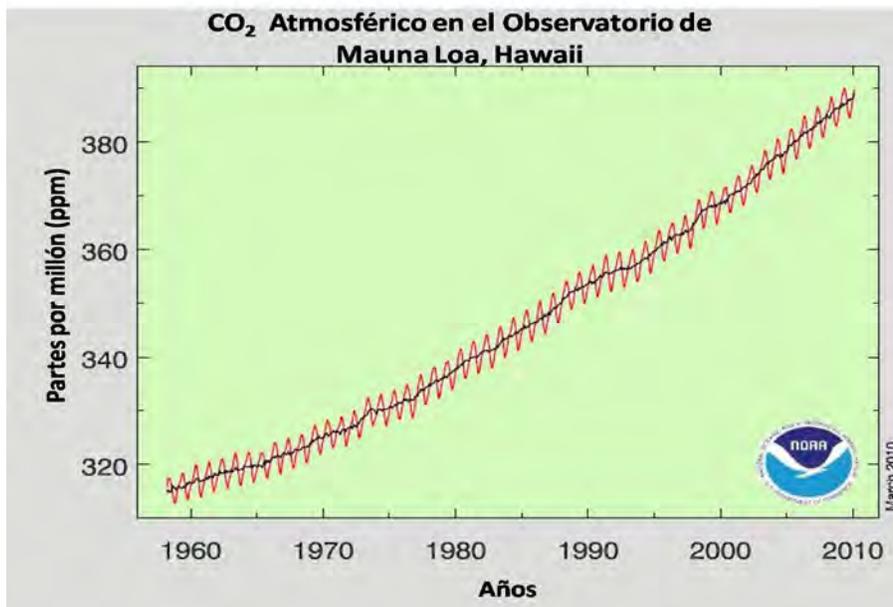


Figura 2. Registro de las mediciones directas de CO₂ en la atmósfera. La curva negra representa los datos corregidos según la estación (Pieter Tans, 2010; NOAA, 2010).

El segundo GEI que ha presentado un aumento en sus concentraciones en la atmósfera es el CH₄, que aporta aproximadamente un 14% del total de GEI y es emitido por actividades como la agricultura, la ganadería y quema de biomasa. El sector agricultura contribuyó con el 13.5 % del total de gases de efecto invernadero emitidos en el mundo (IPCC, 2007).

El N₂O es emitido por la combustión, quema de biomasa, fertilizantes, agricultura y por fuentes biológicas de los océanos y suelos. Tiene un tiempo de vida en la atmósfera de 114 años. En 1998, la concentración en la atmósfera era de 314 ppbv con una tasa de crecimiento de 0.25%, lo cual contribuye al efecto invernadero en un 8% (IPCC, 2001 y 2007).

Los clorofluorocarburos (HFC, PFC y SF₆) contribuyen con el 1% al efecto invernadero. Sus principales fuentes de emisión provienen de la producción industrial, refrigerantes, aerosoles y solventes. Su tiempo de duración en la atmósfera va de 2 a más de 50 000 años (IPCC, 2001).

1.3. El carbono en el ambiente

El carbono se puede encontrar en combinación con diferentes elementos, formando principalmente compuestos orgánicos que constituyen a la mayoría de los seres vivos; forma parte de los gases de la atmósfera, se presenta en procesos de vulcanismo, en sedimentos submarinos, entre otros (Jaramillo, 2004).

1.3.1. Ciclo del carbono

El flujo del carbono opera a través de una variedad de respuestas y mecanismos de retroalimentación entre la tierra, atmósfera y los océanos (IPCC, 2001). En la superficie terrestre, el ciclo (Figura 3) se da por la entrada del CO₂ atmosférico a través de los estomas de las plantas para realizar la fotosíntesis. Parte de este compuesto lo utilizan para integrarlo a sus tejidos vegetales y a su vez, una parte del carbono contenido es regresado a la atmósfera por procesos como la respiración autotrófica, la descomposición de la materia muerta ó por incendios y otras perturbaciones (Jaramillo, 2004; Foley y Ramankutty, 2004).

Por otro lado, el ciclo también se lleva a cabo en los océanos, en los que se retiene 50 veces más carbono que en la atmósfera y por un mayor periodo de tiempo (Jaramillo, 2004). El carbono que entra es disuelto en el agua y pasa a formar bicarbonatos (H₂CO₃), carbonatos (CO₃²⁻) o bien en una mínima parte CO₂ que puede ser intercambiado a la atmósfera (Le Quéré y Metzl, 2004). El carbono transformado puede ser aprovechado por organismos, que al morir, sus restos son disueltos como carbono orgánico, y son transportados o agregados en partículas de carbono orgánico que pueden ser remineralizados y retenidos en la profundidad del océano para pasar a formar parte de los sedimentos por miles de años. De aquí pueden dirigirse a la corteza baja de la tierra por el proceso de subducción y salir nuevamente por la actividad volcánica o hidrotermal (Le Quéré y Metzl, 2004; Jaramillo, 2004).

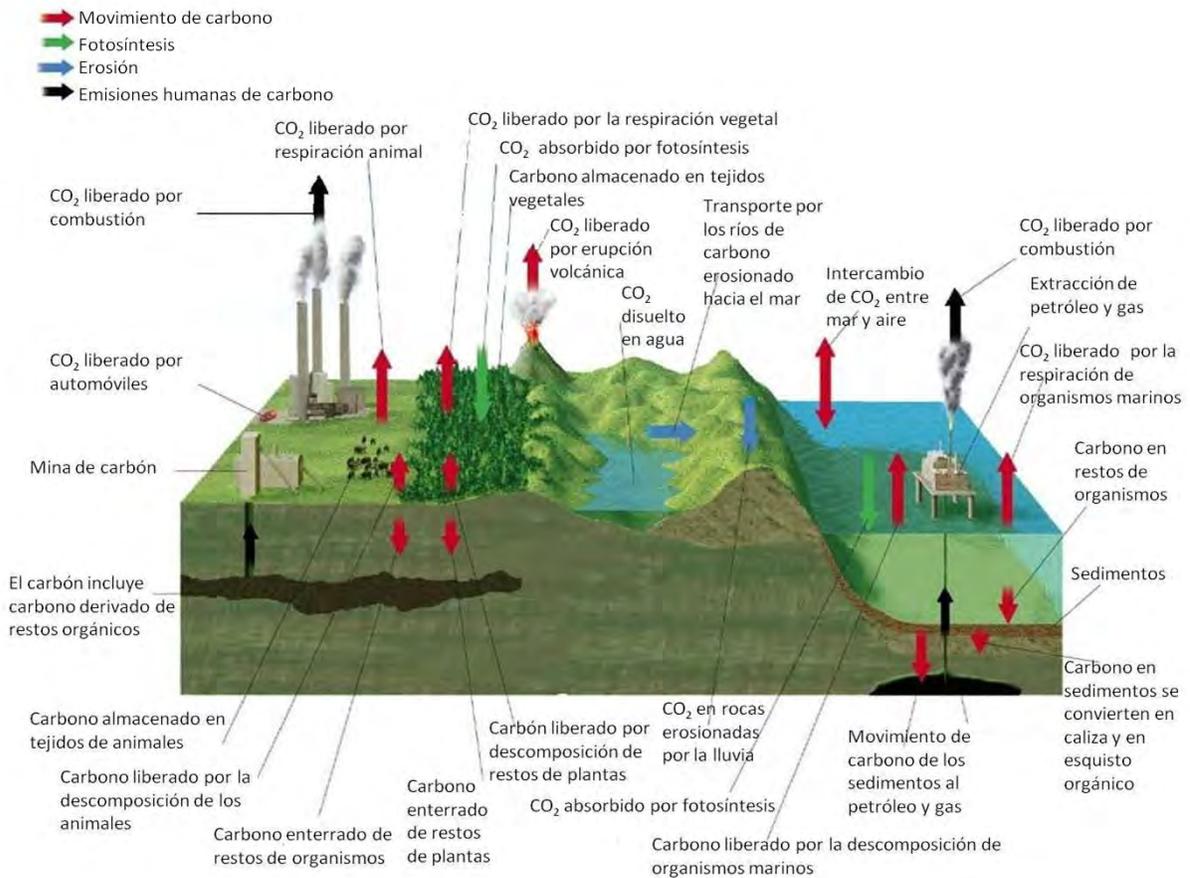


Figura 3. Ciclo del carbono: flujo del carbono en procesos naturales y ocasionados por el humano (Kump, 2009).

Aunque las emisiones de carbono por parte del hombre no superan a las que ocurren en el ciclo global, éstas contribuyen con una o dos Gt de carbono al flujo neto que es de 55 Gt anuales (IPCC, 2007).

1.4. Los bosques: una alternativa a la reducción del CO₂ antropogénico

Los bosques han sido considerados sumideros de carbono, debido a su gran capacidad de captura y almacenamiento del carbono (IPCC, 2001; Ordóñez y Masera, 2001; UNFCCC, 2007).

El CO₂ es absorbido por los árboles introduciéndose en el metabolismo de la fotosíntesis mediante la asimilación del carbono por la enzima Rubisco (Lorimer, 1976; Portis, 1995; Caemmerer y Quick, 2000). En este proceso es liberado parte del CO₂ a la atmósfera por medio de la respiración, aunque en una mínima cantidad comparado con lo que se absorbe (Raghavendra, 1998; Douce y Heldt, 2000).

El carbono que es fijado sirve para la formación de compuestos orgánicos como la glucosa, que a su vez se utiliza para el desarrollo de las estructuras del árbol como son ramas, hojas y tronco; así como el crecimiento en altura, follaje y diámetro (Ordóñez y Masera, 2001). Además, al aprovechar y convertir a los árboles en productos maderables el carbono se conserva almacenado en estos productos (Figura 4). Estas estructuras pueden almacenar carbono durante años ó hasta siglos (Ordóñez y Masera, 2001; Valero, 2004). Por otro lado, la degradación de sus componentes de carbono los transforma y devuelve a la atmósfera en forma de CO₂, lo que convierte a las masas forestales como la segunda fuente emisora de CO₂ después del consumo de combustibles de origen fósil (Plass, 1956; Granados *et al.*, 2007).

El saldo neto de captura de carbono por parte de los bosques va a depender de la composición, edad, distribución de tamaños, estructura y las etapas de regeneración en la que se encuentren, ya que se ha visto que las tasas de captura aumentan en bosques jóvenes mientras que en un bosque maduro estas tasas declinan (Torres y Guevara, 2002; DSE, 2005).

El principal almacén de carbono en los ecosistemas forestales está en el suelo. Según la FAO (2002) la reserva de carbono orgánico en el suelo es de 1500 Gt, mientras que la vegetación y la atmósfera almacenan 650 Gt y 750 Gt, respectivamente.

El proceso de almacenamiento del carbono por parte del suelo es muy complejo y su tiempo de residencia va a depender de la composición química en la que se encuentre la materia orgánica, si el carbono está estabilizado por medio de los coloides y arcillas presentes, puede tener una edad de hasta miles de años, a comparación del carbono que se encuentra en la hojarasca o follaje que presenta enlaces débiles, liberado en un plazo de 3 a 8 años (Jandl, 2001; FAO, 2002).

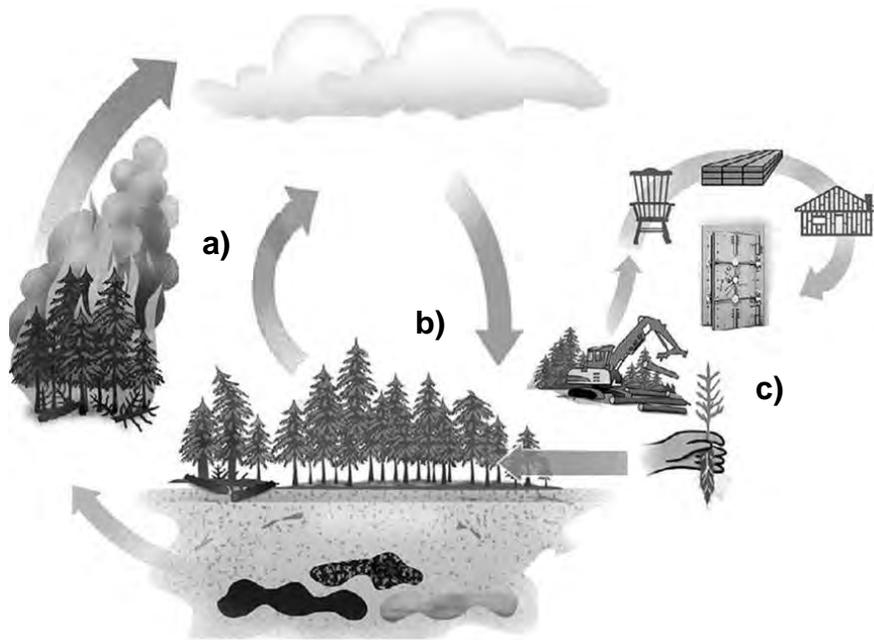


Figura 4. Flujos de carbono en el ecosistema forestal. Se ilustran los tres movimientos del carbono en un bosque: a) el carbono liberado por procesos como la respiración, incendios, muerte de individuos, descomposición de materia muerta; b) el carbono absorbido por la fotosíntesis; y c) el carbono almacenado en el suelo, en la biomasa de los árboles y en los productos maderables (The forest foundation, 2008).

De esta manera, los bosques son considerados el ecosistema terrestre con la mayor captación y almacenamiento de carbono en forma de biomasa y en el suelo (Ordóñez *et al.*, 2001). El almacenamiento y la captación de carbono puede diferir en los tipos de vegetación en los que se encuentre, en zonas tropicales el almacén de carbono es mayor en la vegetación que en el suelo, mientras que en bosques boreales la acumulación es mayor en el suelo (Matthews *et al.*, 2000).

Estudios recientes (Cuadro 2) mencionan que la mayor captura y almacenamiento sucede en los bosques boreales, debido a que las bajas temperaturas reducen las tasas de descomposición de la materia orgánica, lo cual forma suelos orgánicos profundos y turberas con grandes acumulaciones de carbono por área, además del carbono en la vegetación (Carlson *et al.*, 2009).

Cuadro 2. Comparación del almacenamiento global de carbono en el bosque boreal, bosque tropical y bosque templado. Modificado de Carlson *et al.*, 2009.

Tipo de vegetación	Almacenamiento de carbono (Gt)
Bosque boreal	703
Bosque tropical	375
Bosque templado	121

1.4.1. Los servicios ambientales: captura de carbono

Los servicios ambientales se definen como el conjunto de condiciones y procesos naturales que los ecosistemas generan y que el humano puede aprovechar de manera directa o indirecta para obtener beneficios y bienestar en su vida (Torres y Guevara, 2002).

Uno de los ecosistemas que brinda una gran cantidad de servicios ambientales al humano son los bosques. Desde sus orígenes los humanos han obtenido estos beneficios, muchas veces sin darse cuenta de esto. Entre los servicios ambientales que estas áreas nos brindan están (Alcamo *et al.*, 2003):

- Servicios de aprovisionamiento: se refiere a los productos tangibles obtenidos de manera directa, originados por las áreas forestales; como son combustible, fibras, agua, comida, recursos genéticos.
- Servicios de regulación: beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos; siendo los principales, la regulación del clima, regulación del agua, control de la erosión, mantenimiento de la regulación del aire, polinización y la regulación de los ciclos biogeoquímicos dentro de los cuales se incluye la captura de carbono.
- Servicios culturales: beneficios no materiales que provienen del ecosistema forestal a través del enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, reflexión, recreación y experiencias espirituales, religiosas de diversidad cultural.
- Servicios de mantenimiento: son necesarios para la formación de los otros servicios, su impacto es indirecto sobre las personas o bien a través de mucho tiempo, entre estos están el ciclo de los nutrientes, formación del suelo y la producción primaria.

1.4.2. Estimación de la captura de carbono

La contribución de los ecosistemas forestales en la liberación, captura y almacenamiento de carbono, puede ayudar a generar estrategias para disminuir las concentraciones de carbono en la atmósfera, por lo que es necesaria la estimación del carbono total que se tiene en un ecosistema.

Debido a que el flujo de carbono entre atmósfera-bosque es muy dinámico con diferentes tiempos de captura y residencia, para su estimación es necesario medir el contenido de carbono en los diferentes almacenes existentes en el ecosistema. Los principales son: carbono contenido en la vegetación, el suelo, la materia orgánica en descomposición y el carbono contenido en productos forestales (Ordóñez, 1999; Ordóñez y Maser, 2001).

Los estudios dirigidos a la estimación de captura de carbono en la vegetación, se basan principalmente en la medición de la biomasa aérea del rodal¹ en cuestión, esta biomasa incluye hojas, tronco principal, ramas y corteza, los cuales representan de manera indirecta la cantidad de carbono que es acumulado en los individuos arbóreos (Vidal *et al.*, 2003; Pimienta de la Torre *et al.*, 2007; Díaz *et al.*, 2007).

La biomasa se cuantifica principalmente por dos métodos: el directo y el indirecto (Fonseca *et al.*, 2009). El primero se basa en un método destructivo en el que se trozan varios individuos, se miden el diámetro normal (1.3 m) y la altura, se pesan cada una de las trozas y se obtiene su peso seco para realizar ecuaciones de regresión (Husch, 2001; Díaz *et al.*, 2007). Este método es el que expresa la biomasa con mayor precisión y las ecuaciones creadas pueden ser usadas para predecir la biomasa de otros individuos de la misma especie a partir de variables más fáciles de medir (Snowdon *et al.*, 2002). Sin embargo, muchas veces este método es muy costoso por la cantidad de individuos que se tienen que destruir para obtener las ecuaciones (Dávalos *et al.*, 2008).

¹Rodal: porción del bosque definida sobre la base de un conjunto de criterios asociados a uno o más objetivos de manejo (Corvalán y Hernández, 2006).

El método indirecto utiliza los procedimientos de cubicación de los árboles para obtener el volumen de madera, similares a las cantidades expresadas en los productos forestales (Husch, 2001). Posteriormente se mide el peso seco ó la densidad específica por factores de conversión; o bien, se usan modelos de regresión lineal en los que se puedan usar variables medibles en campo ó tomados de inventarios forestales como son el diámetro normal, altura, área basal y densidad específica de la madera (Husch, 2001; Fonseca *et al.*, 2009).

II. JUSTIFICACIÓN

Más de la mitad del territorio mexicano presenta áreas forestales, mismas que albergan una gran biodiversidad y que lo sitúan entre los 17 países con mayor diversidad del mundo o megadiversos (CONABIO, 2006). Un ejemplo claro de la biodiversidad que alberga es, la presencia de más de la mitad de las especies del género *Pinus* y entre 130 y 150 especies de encino (*Quercus* sp), de las cuales el 85% de los pinos y 70% de encinos son endémicos a México (CONABIO, 1998; Serrano, 2002; Sánchez *et al.*, 2003). Esta riqueza se debe a los diferentes factores ambientales que propician las diversas comunidades vegetales del país; como son el clima, el relieve accidentado, la posición geográfica del territorio, su historia biogeográfica y los eventos geológicos (CONABIO, 1998; Rzedowski, 2006).

A pesar de esta biodiversidad, diferentes factores directos e indirectos han generado una pérdida de la cubierta vegetal durante el último siglo. La principal actividad que la ocasionó ha sido el cambio en el uso del suelo por parte de los propietarios o usufructuarios al deforestar sus tierras para realizar prácticas agrícolas y ganaderas por no encontrar una fuente de ingresos provenientes de las áreas forestales (WWF, 2007). Esto representa un serio problema ya que más del 80% del territorio forestal pertenecen a comunidades indígenas y ejidales, que son más vulnerables ya que están condicionadas a las necesidades de sus habitantes (Fregoso *et al.*, 2001; CONABIO, 2006).

El conjunto de estos factores ha ejercido una fuerte presión sobre los bosques y las selvas del país llevándolos a un punto crítico (Serrano, 2002) siendo una de sus múltiples consecuencias la disminución en la capacidad de la vegetación para secuestrar el carbono de la atmósfera, y el aumento en sus concentraciones, lo que contribuye al fenómeno del cambio climático en el país.

México se ubica entre los 15 países con mayores emisiones de carbono (Figura 5), de las cuales, el 27% proviene del sector de transportes, el 30% de la generación de energía, el 12% por manufactura y construcción, 7% por el consumo propio de la industria energética, 7% por tierras agrícolas y un 6% otros (SEMANART, 2009; INE, 2009). No obstante que la aportación del país no rebasa el 2% de las emisiones mundiales totales, la tendencia de sus emisiones ha incrementado en los últimos años llegando en el 2006 a 118,950 toneladas métricas de carbono (Boden *et al.*, 2009).

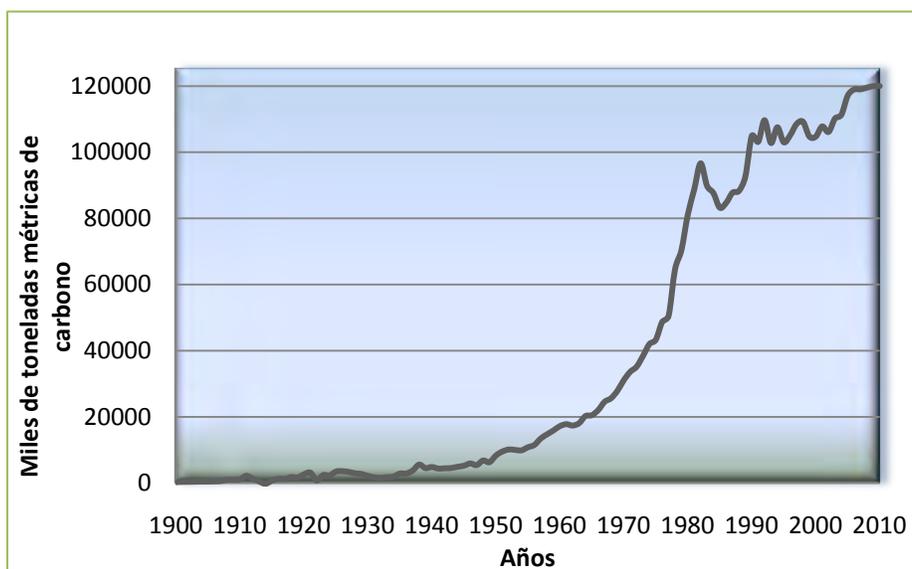


Figura 5. Emisiones de carbono en México por el uso de combustibles de origen fósil. Durante el pasado siglo y principios de éste las emisiones de carbono han tenido diversas fluctuaciones, con pocas variaciones al principio pero al final se ha dado un incremento importante en las emisiones de carbono, atribuidas a: 1) el aumento en producción y uso de petróleo y gas a lo largo del siglo XX, a pesar de que entre 1970 y 1980 éste tuvo una disminución significativa en el consumo por el aumento en el precio del petróleo, lo que ocasionó una reducción importante en las emisiones de carbono, sin embargo actualmente es el responsable del 63% de éstas emisiones; 2) el incremento del consumo de gas natural durante los últimos años, ahora es responsable del 25% de las emisiones de CO₂ por combustibles de origen fósil en México (Boden *et al.*, 2009).

La estrategia más económica y de menor plazo que tiene México para contrarrestar las emisiones de carbono antropogénicas está enfocada principalmente en la conservación de sus tipos de vegetación, ya que tienen un gran potencial como mitigadores del cambio climático (SEMARNAT, 2003).

Los estudios realizados por Maser y colaboradores en el 2001, indican que para el año 2030 México lograría la disminución de las emisiones de los GEI capturando 46 millones de toneladas de carbono por parte de las zonas forestales si se adoptaran estrategias de manejo sustentable de bosques naturales (SEMARNAT, 2003).

A su vez, los ecosistemas forestales son los más vulnerables ante los efectos del cambio climático. Por ello, de no tomarse las medidas de mitigación parte de ellos podrían perderse o ser desplazados, según las capacidades de adaptación a corto plazo que tengan las especies vegetales. Los bosques templados y el matorral xerófilo serían los más afectados, al reducir su distribución por el aumento de la temperatura superficial de la tierra (Villers y Trejo, 2004).

En el caso del Nevado de Toluca, la presencia de ecosistemas templados, lo hacen imprescindible para las poblaciones circundantes del Valle de Toluca, ya que ofrecen diversos servicios ambientales como son: captación de agua, mantenimiento de la biodiversidad, calidad del aire y agua, provisión de biomasa y captura de carbono; así como la mitigación de inundaciones, el control de la erosión y la estabilización del clima regional (Valdez, 2008). Además, por su superficie, es el más importante de los 17 Parques Nacionales del Estado de México (Aguilar, 2007).

Aunque el decreto del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) como zona de conservación está dirigido a la protección de los ecosistemas del lugar, debido a su cercanía con la ciudad de Toluca, la cobertura forestal está sujeta constantemente a un deterioro progresivo y una seria disminución de las comunidades vegetales por parte de las actividades humanas (García del Valle, 1999). Entre ellas el aumento de la población y de los asentamientos urbanos en

la zona vinculada al parque, el cambio de uso del suelo para convertirlo en zonas agropecuarias, talas clandestinas, incendios forestales para la apertura de zonas de pastizal, infraestructura, la explotación de los recursos naturales como madera y otras especies vegetales, la extracción de tierra, el reencauzamiento y la sobreexplotación de los escurrimientos superficiales y probablemente la pérdida de especies de los bosques templados por el cambio climático (García del Valle, 1999; Aguilar, 2007; Valdez, 2008).

Otro problema que enfrenta al igual que otras zonas forestales del país, es el tipo de tenencia de la tierra, ya que el 59% del parque es propiedad ejidal, el 29% es privada, el 10% es propiedad federal y el 2% restante es desconocido, lo que ha ocasionado un difícil cumplimiento de las funciones destinadas a esta área (Vargas, 1997).

De acuerdo a Franco y colaboradores (2006b), durante el periodo 1972-2000 el PNNT perdió 4200 ha de bosque, las cuales representan un 8.4% de la superficie forestal original. Con una tasa de deforestación anual de 0.31%, los bosques de pino son los más afectados, ya que durante el periodo estudiado se perdieron más de 3,300 ha, equivalentes a más del 20% de los bosques de pino de la zona, derivado en su mayoría de la tala selectiva que causa una grave disminución de la diversidad genética de los bosques del parque. Con ello se han perdido grandes superficies de sumideros de carbono que pueden contribuir a la mitigación de las emisiones de los GEI provenientes de la zona metropolitana de Toluca.

Es la situación alarmante por ser un Parque Nacional destinado a la conservación de los recursos naturales y provisión de servicios ambientales. El presente trabajo pretende aportar información sobre el contenido de carbono y la captura potencial por parte de los bosques de *Pinus hartwegii* y de *Abies religiosa* del PNNT y con ello sentar las bases para tomar medidas para su futuro manejo y conservación.

III. ANTECEDENTES

El PNNT ha sido objeto de diversos estudios por sus características distintivas y la diversidad de sus recursos. Entre los estudios realizados sobre la vegetación están los de Villalpando en 1968, en el que se documentaron y describieron cuatro zonas ecológicas en la zona alpina del Nevado. En 1987 Sandoval-Basso hace un análisis y actualización cartográfica del uso del suelo y vegetación del PNNT. González Trápaga (1986), estudió la zona alpina; Villers y López (1995), realizaron una evaluación de las áreas de uso agrícola y forestal en la cuenca del río Temascaltepec en el Nevado.

Con base en análisis de fotointerpretación y de evaluación botánica, Villers y colaboradores (1998), obtuvieron las características generales de los bosques templados del PNNT, desde las especies dominantes, hasta las zonas con mayor perturbación por la acción humana. En 1999, García del Valle realizó una evaluación forestal del estado de conservación del PNNT para el desarrollo de programas de manejo.

Zúñiga Soto (2006), hizo una revisión bibliográfica de 202 años de trabajos realizados en el PNNT, analizó la información acerca de los estudios bióticos, así como las localidades con mayores colectas de plantas vasculares. Determinó las zonas que requieren mayor investigación, una de las cuales es el bosque de *Abies religiosa*.

Franco y colaboradores (2006a) realizaron análisis del cambio en el uso del suelo del PNNT en el periodo 1972-2000, mediante técnicas de fotointerpretación y un Sistema de Información Geográfica (SIG), para determinar el aumento o disminución de la densidad de la zona forestal del parque.

En ese mismo año Franco y colaboradores realizaron un estudio sobre las tasas de deforestación ocurridas en el periodo 1972-2005; valoraron los cambios de cobertura del suelo y analizaron la dinámica de la perturbación y recuperación que sufrieron las zonas forestales durante ese periodo.

Con relación a la captura de carbono, Franco (2009) obtuvo los índices de contenido de carbono de la vegetación en los bosques de coníferas y latifoliadas del PNNT, analizó las emisiones y capturas de carbono por parte de los bosques en el periodo 1972-2000 con base en las existencias del contenido de carbono de cada año e identificando las zonas que sufrieron algún cambio de composición y densidad, en cuanto a las emisiones de carbono se encontró que los bosques del PNNT son un emisor neto de aproximadamente 260 mil MgC debido principalmente al deterioro del arbolado y la deforestación.

IV. OBJETIVOS

4.1. General

Estimar el contenido y la captura potencial de carbono de los bosques de *Pinus hartwegii* y de *Abies religiosa*, en el Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México.

4.2. Particulares

Estimar la biomasa aérea y su carbono almacenado por hectárea

Analizar la estructura de la cobertura forestal y determinar su relación con el contenido y el potencial de captura de carbono.

Determinar la correlación entre el contenido de carbono y el diámetro normal (DN).

V. ZONA DE ESTUDIO

5.1. Localización geográfica

El Parque Nacional Nevado de Toluca se encuentra a los 18° 59' y 19°13' norte y 99°37' y 99°55' oeste. Se localiza al suroeste de la ciudad de Toluca, Estado de México (Figura 6). Comprende los municipios de Zinacantepec, Villa Guerrero, Texcaltitlan, Temascaltepec, Amanalco, Villa Victoria, Almoloya de Juárez, Toluca, Calimaya, Coatepec de Harinas, Tenango del Valle (Vargas, 1997).

Forma parte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico y de la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac; teniendo como límites físicos a partir de la cota de los 3000 msnm (García del Valle, 1999; Zúñiga, 2006).

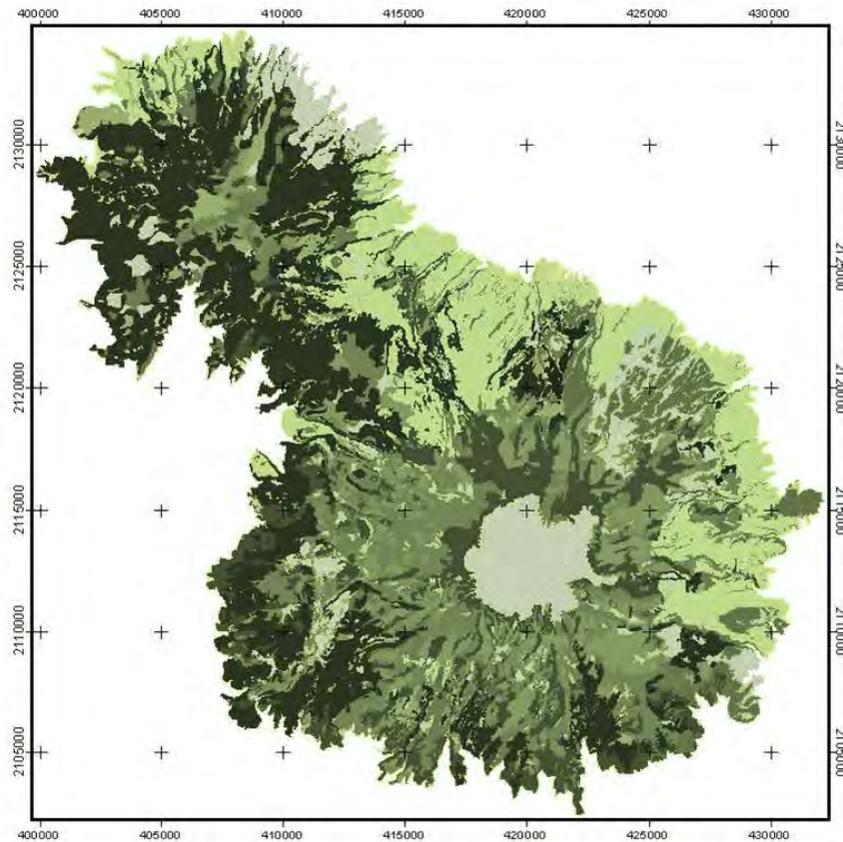


Figura 6. Ubicación del Parque Nacional Nevado de Toluca, Edo. de México (Franco *et al.*, 2006).

5.2. Relieve

El volcán Nevado representa la cuarta cima más alta del país por sus 4,680 msnm. Se caracteriza por tener diferentes elevaciones de picos y crestas como resultado de la actividad eruptiva y de erosión, entre ellas destacan El Pico del Fraile al sur (4,660 msnm), el Pico del Águila al noroeste (4,550), el Espinazo al centro oeste (4,500-4,550 msnm), Cerro Prieto al oeste (4,260 msnm), el Pico Negro al centro oeste (4,400 msnm) y el Espinazo del Portezuelo al noreste (4,300 msnm) y dos elevaciones que demarcan la parte abierta del cráter hacia el este-sureste (4,100 msnm) y sureste (4,200 msnm) (Vargas, 1997; Macías, 2005; Zúñiga, 2006).

En el centro del cráter se encuentra una elevación llamada “el Ombligo”, la cual divide a dos lagunas de agua dulce que se forman ahí, además se encuentran dos lagunas intermitentes generadas por otras dos pequeñas elevaciones (Vargas, 1997; Zúñiga, 2006).

Su relieve es accidentado principalmente por el lado sur y este, en donde la inclinación de la pendiente es mayor. Existen una serie de barrancas que corresponden a los principales arroyos que descienden de la cumbre, las más notables y profundas son las de los arroyos: Cano al norte, la Ciénega al este, el Grande y la Cieneguita hacia el sureste y el Chiquihuitero al sur (González-Trapaga, 1986; Vargas, 1997).

5.3. Geología

El Nevado de Toluca es un volcán extinguido construido sobre una compleja secuencia de formaciones metamórficas y sedimentarias del Jurásico-Cretácico. Pertenece al Plioceno tardío-Holoceno aunque, otros autores le asignan una edad pleistocénica de aproximadamente 30,000 años; constituido por andesitas y dacítas calcialcalinas (Vela *et al.*, 1976; García *et al.*, 2002).

Según Macías (2005) evidencias recientes indican que la actividad volcánica comenzó hace 2.4 millones de años, con la formación del Paleonevado, el cual estaba ubicado al sur-sureste del edificio actual.

Es un volcán estratificado profundamente modificado por una actividad violenta y explosiva, y por la erosión. Entre los eventos volcánicos identificados está una erupción vulcaniana de hace 28,000 años antes del presente (AP), una erupción pliniana que dejó unos depósitos denominados Pómez Toluca Inferior (24000 años AP) y otra erupción pliniana que generó la Pómez Toluca Superior (11600 años AP) (Vela *et al.*, 1976; García *et al.*, 2002). En el último periodo de erupciones se cerró el domo del cráter formando “El Ombligo” (Zúñiga, 2006).

5.4. Edafología

Los suelos presentes en el PNNT corresponden a cinco tipos (García del Valle; 1999):

- Andosoles húmicos, de textura media, representando el 90% de la superficie del parque.
- Feozems háplicos, de textura media, en un 6% del área, localizado al norte y oeste del volcán.
- Litosoles de textura media a gruesa, en la parte alta del volcán, cubriendo el 2% de la superficie.
- Regosoles éutricos con textura gruesa que corresponde al 1% del área, situado de los 4,200 a 4,500 msnm
- Cambisoles crómicos, de textura media, que ocupan el 1% del área al noroeste del volcán.

En general los suelos varían de medianamente profundos a profundos, con colores oscuros en la superficie, y con un alto contenido de materia orgánica y elevado intercambio catiónico (Vela *et al.*, 1976).

5.5. Hidrología

El Parque Nacional Nevado de Toluca está incluido en dos regiones hidrológicas la región Lerma-Chapala-Santiago número 12 y la región Medio Balsas número 18 (García del Valle, 1999).

Los escurrimientos superficiales que provienen de la parte alta del Nevado forman varios ríos tributarios del Lerma y el Balsas (Vela *et al.*, 1976). Varios de los escurrimientos al llegar a la parte baja forman los arroyos la Hortaliza al sur, Zacango y Grande al norte (Vargas, 1997).

5.6. Clima

Se encuentran tres tipos de clima de acuerdo a la clasificación de Köppen, modificado por García (1973):

- Clima frío de altura E(T)H, con temperatura media anual entre -2° y 5°C y temperaturas media anual del mes más caliente entre 0 y 6.5°C, en la cumbre del volcán;
- Clima semifrío C(E)(w2)b(i)g, con régimen de lluvias en verano, subhúmedo, con precipitación invernal inferior al 5%, es isotermal, en las laderas del parque y demás elevaciones; y
- Clima templado subhúmedo C(w2)b(i')g con régimen de lluvias en verano, subhúmedo, con precipitación invernal inferior al 5%, poca oscilación térmica, en los límites inferiores del parque

La temperatura media anual es de 3.9°C (en Alberge, estación de Microondas), con una precipitación anual promedio de 1,086.6 mm. El mes más frío es enero, los más cálidos son mayo, junio y septiembre (Vargas, 1997).

5.7. Vegetación

Existen varias comunidades vegetales, de las cuales aproximadamente 33,880 hectáreas son de bosques (Vargas 1997). Los tipos de vegetación que se encuentran en el parque son los bosques de coníferas, principalmente los de *Abies religiosa*, localizados a una altitud de 3,000 a 3,500 msnm, los bosques de pino como el bosque de *Pinus pseudostrobus* y *P. ayacahuite* de 2,800 a 3,200 msnm, bosque de *Pinus montezumae* de 3,000 a 3,200 msnm y bosque de *Pinus hartwegii* de 3,500 a 4,000 msnm. Sobrepasando los 4,000 msnm se encuentra el zacatonal alpino en el cual predominan algunas gramíneas altas y amacolladas, y líquenes (Vela *et al.*, 1976; Almeida *et al.*, 2004).

VI. MÉTODO

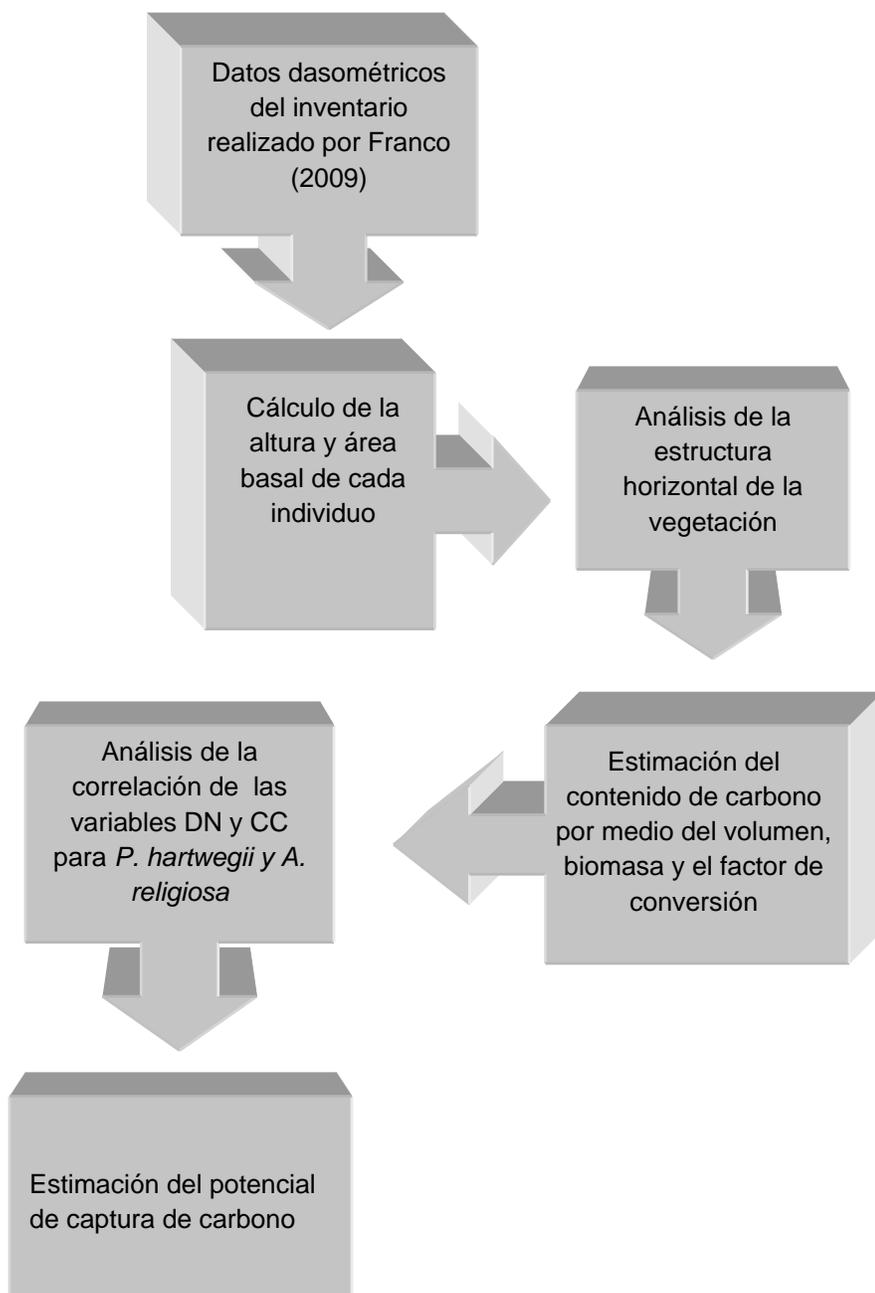


Figura 7. Método empleado en la estimación del contenido y captura potencial de carbono en el PNNT.

Descripción del muestreo empleado en el inventario forestal de Franco (2009):

El muestreo se realizó en los últimos siete años en dos etapas, la primera se basó en los inventarios forestales con un décimo de hectárea, establecido en la clase de cobertura vegetal y uso de suelo seleccionados (Figura 8). Los sitios se delimitaron por una parcela de forma circular de 17.84 m de radio, con una superficie de 1,000 m² cada uno y su respectiva compensación por la pendiente (Franco, 2009).

En la segunda etapa a fin de obtener el contenido de carbono y su potencial de captura por hectárea, por tipo de cobertura vegetal y uso del suelo se aplicó un muestreo anidado (n=3), jerárquico, estratificado con distribución sistemática (basado en Ordóñez, 2008; Ordóñez *et al.*, 2008; Figura 8).

Etapas:

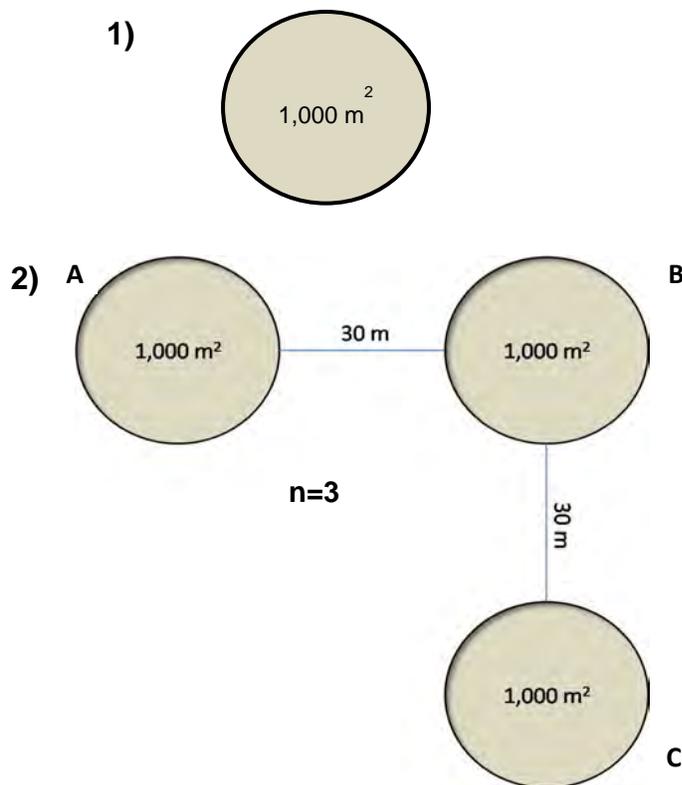


Figura 8. Unidades de muestreo utilizadas en las dos etapas del estudio (Franco, 2009).

- 1) Parcela de forma circular, utilizada en la primera etapa de muestreo (2002).
- 2) Diseño anidado (n=3) utilizado en la segunda etapa de muestreo (2004).

Se definieron 106 sitios de muestreo en la cobertura de suelo del bosque de *A. religiosa* y *P. hartwegii* del PNNT (Figura 9).

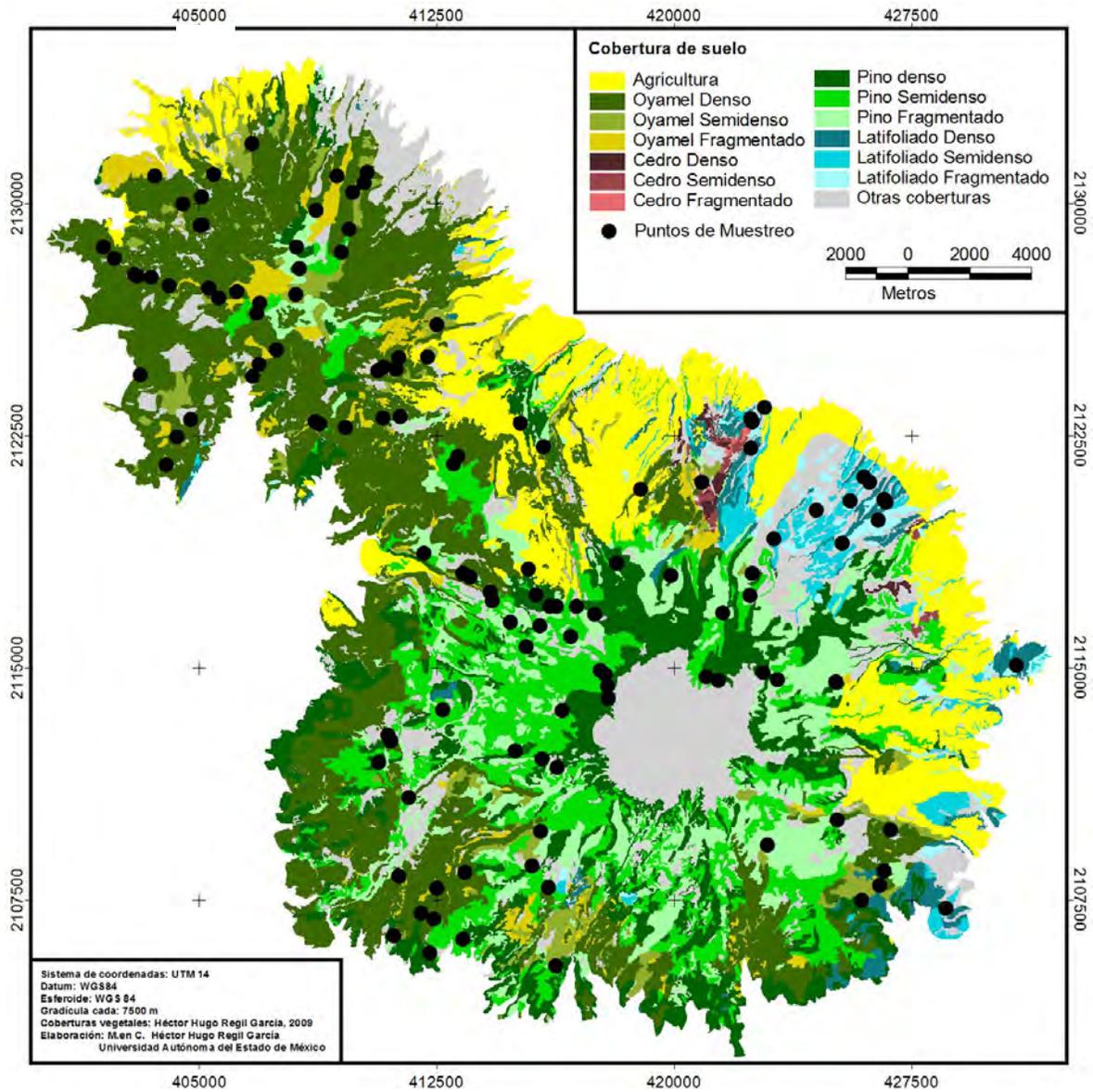


Figura 9. Mapa de los sitios de muestreo y su cobertura de suelo en el PNNT.

De la cobertura vegetal muestreada se clasificaron 9 comunidades vegetales (Cuadro 3).

Cuadro 3. Comunidades vegetales y cantidad de sitios muestreados

Comunidad vegetal	Total de sitios
Bosque de <i>Abies religiosa</i>	32
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Alnus</i> sp	2
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus hartwegii</i>	7
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Pinus hartwegii</i> - matorral inerme	1
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	41
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> - <i>Abies religiosa</i>	14
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> - <i>Alnus</i> sp	3
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> - <i>Abies religiosa</i> - <i>Alnus</i> sp	2
Bosque de <i>Pinus hartwegii</i> -pastizal inducido	4

6.1. Variables dasométricas

Los datos utilizados del inventario fueron: el diámetro normalizado (DN) a una altura de 1.30 m, el registro del género y especie de los árboles medidos en la unidad de muestreo.

La altura se estimó utilizando la ecuación propuesta por Franco (2009) en función del diámetro:

$$h = 0.0027DN^2 + 0.5968DN + 0.5027$$

Donde:

h= altura (m)

DN= diámetro normalizado (m)

El área basal se obtuvo por medio del diámetro, ésta se refiere al área donde se ubica el diámetro normal (1.30 m). Se encuentra directamente relacionada con el volumen del fuste y es utilizada como indicador de la dominancia y cobertura de una especie (Galeana, 2008). El cálculo del área basal se realizó con la siguiente fórmula:

$$AB= \pi (DN^2/4)$$

Donde:

AB= área basal

$\pi= 3.1416$

DN= diámetro normal a 1.30 m

6.2. Estructura de los sitios

El análisis estructural de las zonas forestales es una forma de evaluar la ocurrencia de las especies, así como su distribución en la superficie del bosque. Esto se llevó a cabo por medio del análisis de la densidad, frecuencia y dominancia de las especies (Alvis, 2009).

Para confirmar la importancia estructural de las especies en el PNNT, se utilizó el valor de importancia, en relación con la densidad relativa, dominancia relativa y frecuencia relativa, por medio de las siguientes fórmulas (Ruíz y Fandiño, 2009):

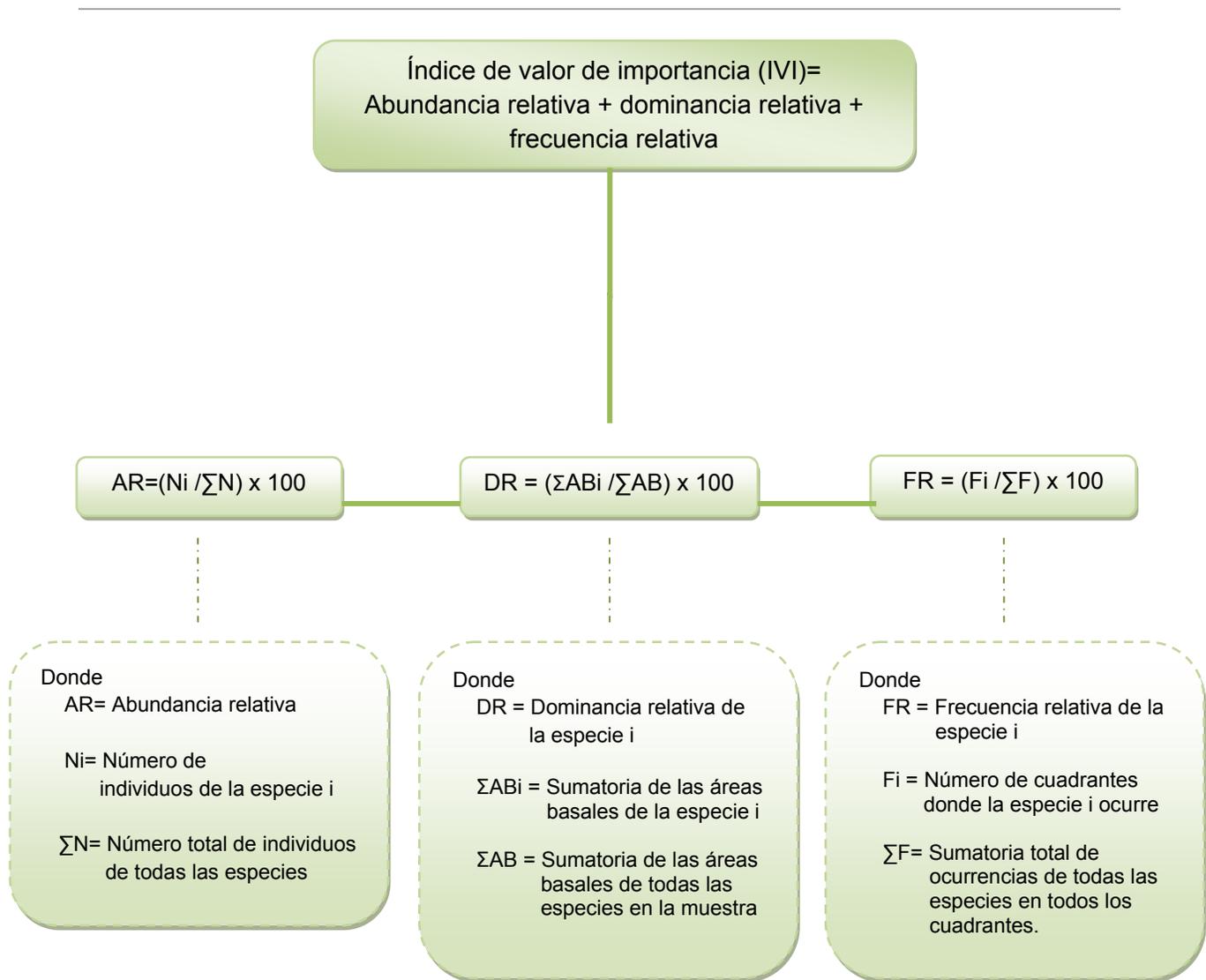


Figura 10. Fórmulas empleadas en el análisis de la estructura de las comunidades vegetales en el PNNT. Modificado de Ruíz y Fandiño, 2009.

El análisis de las clases diamétricas indicó el estado en que se encuentran las poblaciones forestales y su dinámica en el ecosistema. Los diámetros de los individuos fueron agrupados en clases diamétricas, con intervalos de 5 cm cada uno, partiendo de un diámetro mínimo menor de 7.5 cm (Cuadro 4).

Cuadro 4. Clases diamétricas de los diámetros normales

Nombre de la clase	Clase diamétrica (cm)
1	<7.5
2	7.5-12.4
3	12.5-17.4
4	17.5-22.4
5	22.5-27.4
6	27.5- 32.4
7	32.5-37.4
8	37.5-42.4
9	42.5-47.4
10	47.5-52.4
11	52.5-57.4
12	57.5-62.4
13	62.5-67.4
14	>67.5

6.3. Estimación del contenido de carbono en la vegetación

Con la información dasométrica se obtuvo el contenido de carbono de las especies muestreadas a partir del cálculo del volumen y la biomasa aérea.

Volumen

La determinación del volumen se generó a partir del área basal, multiplicada por la altura y por un coeficiente mórfico (Espinoza, 2005).

$$V= (AB) (h) (0.7)$$

Donde:

V= volumen (m³)

AB= área basal (m²/ha)

h= altura (m)

0.7= coeficiente mórfico

Biomasa

La biomasa aérea se refirió a la materia orgánica contenida en fuste, ramas, hojas, y las partes reproductivas de los árboles (Ordóñez, 2004), se estimó al multiplicar el volumen de cada árbol por un factor de densidad de la madera reportada para los pinos y oyameles (Franco, 2009):

$$B = (V) (D)$$

Donde:

B= biomasa (Mg)

V= volumen (m³)

D= densidad de la madera (0.49
g/cm³)

En el caso de la estimación de las latifoliadas asociadas en los bosques de *P. hartwegii* y *A. religiosa*, se aplicó la ecuación de peso total reportada para bosques templados mexicanos (Ayala, 2001). Y se dividió entre 1000 para convertirlo a toneladas (Franco, 2009).

$$\text{Peso total (PT)} = 1.91 (\text{Diámetro})^{1.782}$$

Al resultado de la biomasa se le aplicó un factor de expansión (FE) del 1.3 (igual al 30%), reportado por el IPCC (2006). El objetivo de multiplicar el FE por la biomasa es añadirle al árbol las partes restantes no cuantificadas (Russo, 2009).

Contenido de carbono (CC)

A partir de la biomasa se calculó el contenido de carbono en la biomasa aérea, que representa entre el 45-50% de la biomasa seca, éste puede variar según las especies y las condiciones del lugar. En este estudio se multiplicó la biomasa por 0.45 (IPCC, 2006). La suma de cada sitio se convirtió en megagramos de carbono almacenado por hectárea (MgC/ha).

Con fines de observar el comportamiento del contenido de carbono en función del diámetro normal se utilizó un modelo de correlación mediante la ecuación $y=b*x^k$ (en donde b y k son parámetros de la ecuación, $x=DN$ y $y=CC$), utilizada en diferentes estudios, para estas dos especies (Avendaño *et al.*, 2009; Jiménez, 2010).

6.4. Captura potencial de carbono

La captura potencial de carbono estimado para cada sitio se obtuvo por medio del incremento corriente anual (ICA), el cual se refiere al aumento volumétrico de un árbol en un año.

En este estudio se tomaron como referencia los valores del ICA para *A. religiosa* y *P. hartwegii* de 8.27 y 4.74 ($m^3/ha/año$), respectivamente (Musálem y Solís, 2000). Los valores del ICA se remplazaron en la fórmula de potencial de captura de carbono (Ordóñez, 2008):

$$P_{cc} = I.C.A. * \delta * CC$$

Donde:

Pcc: Potencial de captura de carbono ($MgC/ha/año$)

ICA: Incremento corriente anual ($m^3/ha/año$)

δ : densidad de la madera de cada especie (t/m^3)

CC: contenido de carbono (valor de 0.45, propuesto por el IPCC, 2003)

Para conocer la captura de CO_2 equivalente se multiplicó el contenido de carbono de cada sitio por la relación del peso molecular del CO_2 ($C=12 + O_2=32$), es decir 44, con el peso molecular del C ($44/12$), expresado en toneladas de CO_2 (IPCC, 2006).

VII. RESULTADOS

El inventario corresponde a 3220 individuos, de los cuales 3149 fueron coníferas y 71 fueron latifoliadas.

7.1. Estructura horizontal de la vegetación del PNNT

De las especies localizadas la que presenta un mayor valor de importancia fue *A. religiosa* representando el 51% del total, con un valor de dominancia de la mitad del total de las especies, la siguiente especie fue *P. hartwegii*, la cual tuvo el valor más alto en las frecuencias, con una ocurrencia en 71 sitios de los 106 su porcentaje de valor de importancia fue de 39% (Cuadro 5). El menor valor fue para *Fraxinus*, por presentar solo dos individuos de talla pequeña.

Cuadro 5. Índice de valor de importancia de las especies estudiadas

Especie	IVI
<i>A. religiosa</i>	154.15
<i>P. hartwegii</i>	115.71
<i>P. montezumae</i>	12.47
<i>Alnus</i> sp.	10.10
<i>Cupressus</i> sp.	2.04
<i>Pinus</i> sp	1.82
<i>P. ayacahuite</i>	0.78
<i>Fraxinus</i>	0.69

Los diámetros normales se analizaron en general y para las dos especies con mayor frecuencia.

La Figura 11 muestra la distribución de la frecuencia de individuos totales en las clases diamétricas propuestas. El mayor número de individuos se encuentra en las primeras clases (1 y 2). La principal categoría diamétrica fue la del intervalo de 7.5-12.5 cm de diámetro (clase 2), con 449 individuos. De esta le siguieron la 1 y 10 con 405 y 336 individuos respectivamente. El menor número de individuos se encontró en la clase 13, con 72.

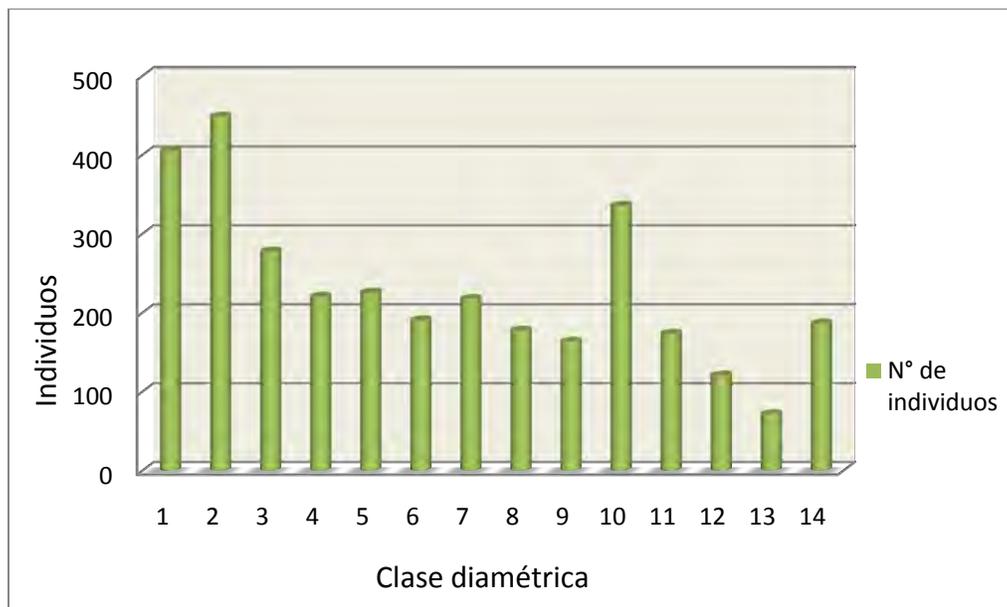


Figura 11. Distribución de las clases diamétricas de las especies de árboles del Parque Nacional Nevado de Toluca.

La distribución diamétrica para *A. religiosa* presentó un 40% de individuos con diámetros pequeños. La mayor frecuencia de dichos individuos se encontró en la clase 2 con 295, y las siguientes categorías con mayor número de individuos fueron la 1 y la 3. Sin embargo, *A. religiosa* fue la especie forestal que presentó la mayor frecuencia de individuos con un diámetro mayor de 67.5 cm; de los 187 individuos totales para la clase 14, 142 eran oyameles (Figura 12).

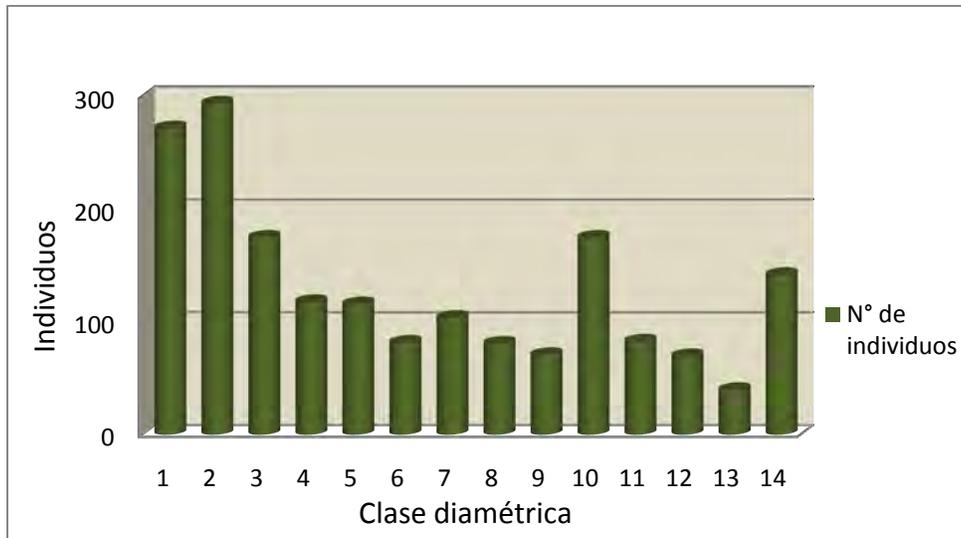


Figura 12. Estructura diamétrica de *A. religiosa* en el Parque Nacional Nevado de Toluca.

P. hartwegii tuvo una mayor frecuencia en la clase número 10 con 148 individuos, lo que equivale al 13% del total de individuos. Las siguientes fueron las clases 2 y 1, con 123 y 120 individuos, respectivamente. Las demás categorías tuvieron frecuencias entre 70 y 90 individuos, a excepción de las últimas tres clases con frecuencias entre 30 y 40 individuos (Figura 13).

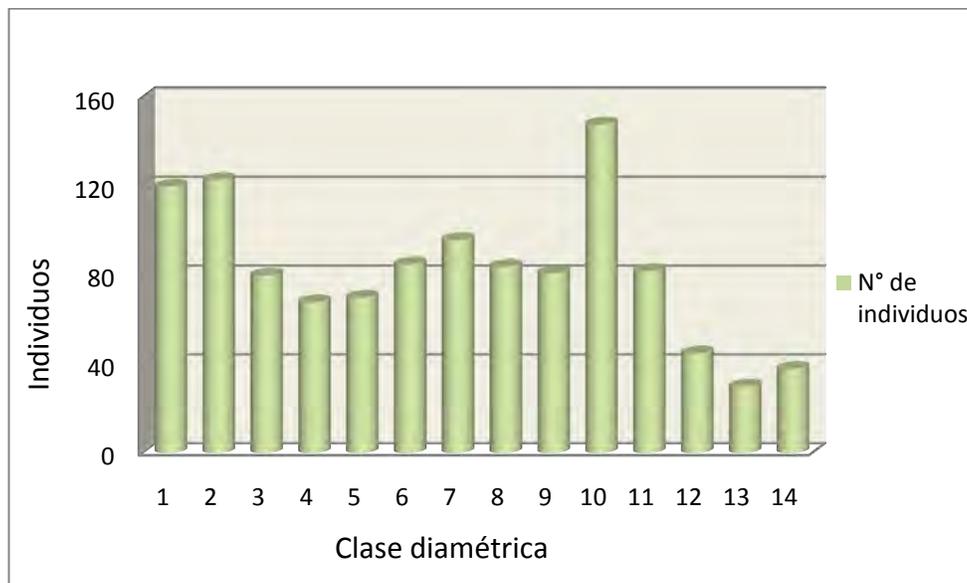


Figura 13. Estructura diamétrica de *P. hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Toluca.

7.2. Contenido de carbono en la vegetación

La estimación del contenido de carbono total de los 106 sitios con dominancia de bosques de *Abies religiosa* fue de 6,612 MgC y 5,222 MgC de los bosques de *P. hartwegii*. El sitio con el mayor contenido de carbono por hectárea corresponde al bosque de *A. religiosa-P. hartwegii* con 356 MgC/ha, el sitio con menor contenido de carbono se encontró en el bosque de *P. hartwegii* con 2.3 MgC/ha.

El bosque de *A. religiosa* representó el mayor contenido de carbono total con 4999.29 MgC, debido a la dominancia y densidad que presentó en cada sitio de muestreo, a comparación de las demás comunidades vegetales (Figura 14).

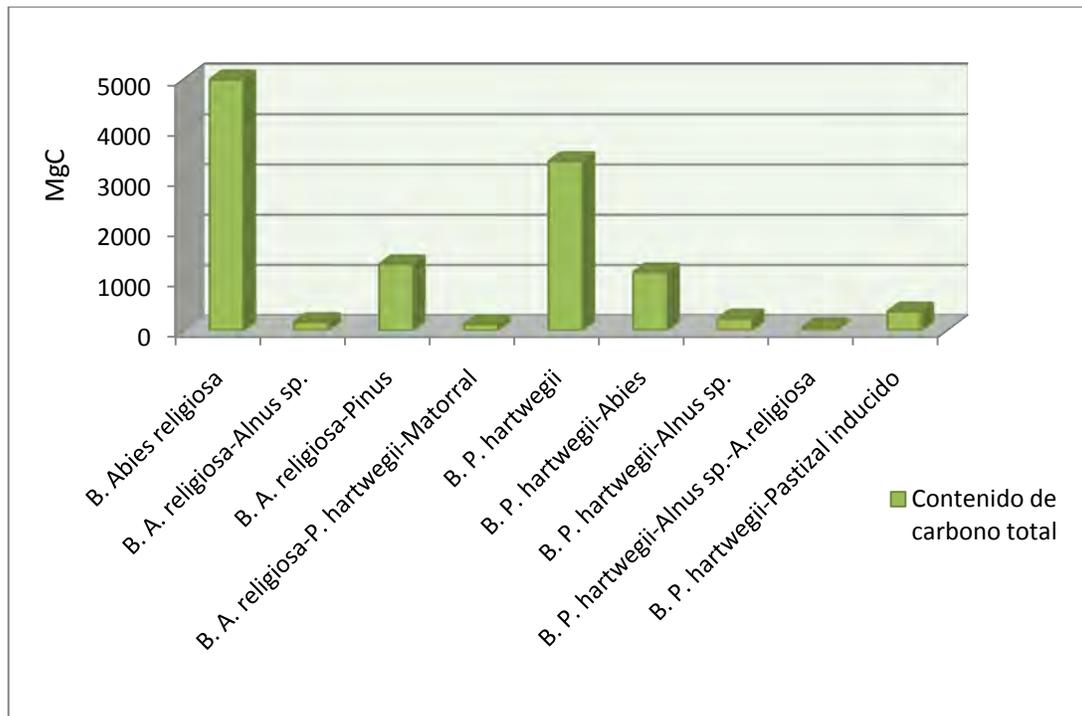


Figura 14. Contenido de carbono total en MgC de acuerdo a la comunidad vegetal muestreado del Parque Nacional Nevado de Toluca.

Los promedios de la estimación del contenido de carbono por comunidad vegetal muestreada se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Promedio del contenido de carbono por comunidad vegetal

Comunidad vegetal	Promedio del Carbono almacenado MgC/ha
Bosque de <i>A. religiosa</i> - <i>P. hartwegii</i>	188.49
Bosque de <i>A. religiosa</i>	156.23
Bosque de <i>A. religiosa</i> - <i>P. hartwegii</i> - Matorral	125.58
Bosque de <i>P. hartwegii</i> -Pastizal inducido	95.03
Bosque de <i>A. religiosa</i> - <i>Alnus</i> sp.	84.30
Bosque de <i>P. hartwegii</i> - <i>A. religiosa</i>	83.02
Bosque de <i>P. hartwegii</i>	82.28
Bosque de <i>P. hartwegii</i> - <i>Alnus</i> sp.	80.11
Bosque de <i>P. hartwegii</i> - <i>Alnus</i> sp. - <i>A. religiosa</i>	32.96

Los resultados para la ecuación $y=b*x^k$ para *Abies religiosa* se muestra en la siguiente gráfica (Figura 15).

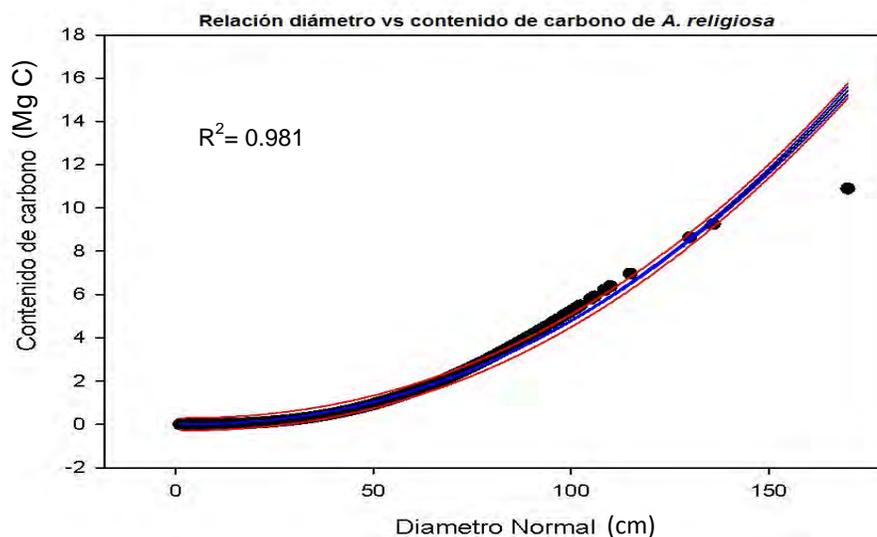


Figura 15. Distribución de los valores de contenido de carbono de *A. religiosa* y su línea de regresión generada

La ecuación obtenida fue:

$$y = 1.855E^{-004} * x^{2.206}$$

Se observa la correlación entre las variables DN y contenido de carbono la cual fue de 0.981, para *A. religiosa*. El error estándar estimado para este modelo de regresión fue de 0.148. El contenido de carbono aumenta de manera potencial de acuerdo al diámetro normal. La tasa de agregación del contenido de carbono entre los diferentes diámetros es de 2.206.

Para *P. hartwegii* la correlación entre las variables también fue significativa por tener una R^2 de 0.99 (Figura 16). El error estándar estimado fue de 0.021.

La ecuación obtenida fue:

$$y = 4.097E^{-005} * x^{2.564}$$

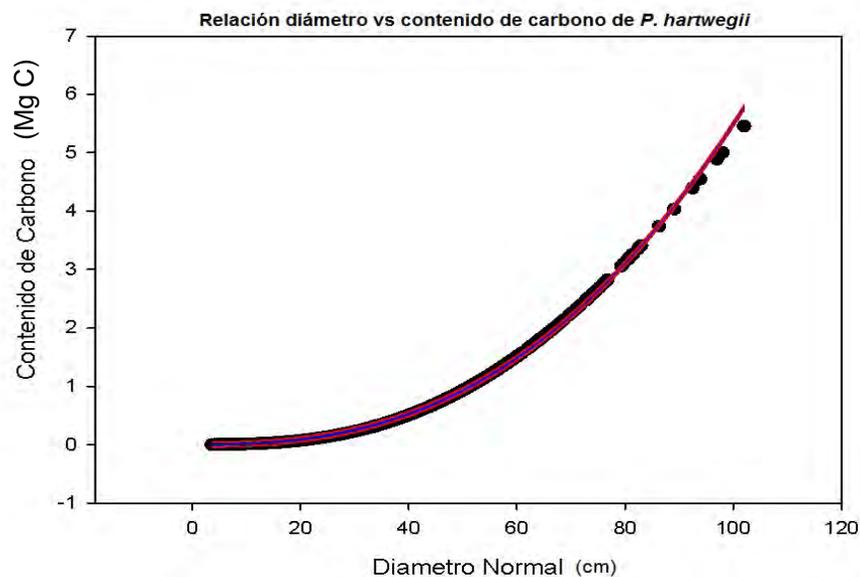


Figura 16. Distribución de los valores de contenido de carbono de *P. hartwegii* y su línea de regresión generada.

En ambas especies se observa que el contenido de carbono aumenta poco (sin llegar a los 0.5 MgC) en los primeros diámetros, hasta llegar a los 40 cm de diámetro en el cual, tiende a verse un aumento mayor.

7.3. Captura potencial de carbono

La captura potencial de carbono total se determinó para cada cobertura vegetal muestreada, así como la captura total de CO₂ (Cuadro 7). En total los bosques de *A. religiosa* y *P. hartwegii* tienen una captura potencial de carbono de 199 MgC/año, que equivale a 730 t de CO₂ capturado. Sus respectivos errores de estimación fueron 0.081 y 0.299.

Cuadro 7. Captura potencial de carbono y captura de CO₂e por comunidad vegetal

Comunidad vegetal	Captura potencial de carbono (MgC/año)	Captura de CO ₂ e t
Bosque de <i>A. religiosa</i>	78.97	289.56
Bosque de <i>P. hartwegii</i>	60.23	220.84
Bosque de <i>P. hartwegii</i> - <i>A. religiosa</i>	22.07	80.93
Bosque de <i>A. religiosa</i> - <i>P. hartwegii</i>	19.49	71.46
Bosque de <i>P. hartwegii</i> -Pastizal inducido	7.25	26.59
Bosque de <i>P. hartwegii</i> - <i>Alnus</i> sp	4.53	16.60
Bosque de <i>A. religiosa</i> - <i>Alnus</i> sp.	3.15	11.54
Bosque de <i>A. religiosa</i> - <i>P. hartwegii</i> -Matorral	2.26	8.29
Bosque de <i>P. hartwegii</i> - <i>Alnus</i> sp. - <i>A. religiosa</i>	1.32	4.83

VIII. DISCUSIÓN

8.1. Estructura horizontal de la vegetación del PNNT

Se confirman la dominancia de *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* en los bosques del Parque Nacional Nevado de Toluca, pues más del 70% de la cobertura forestal muestreada está representada por estas especies, debido principalmente a las condiciones geográficas y climáticas que favorecen su distribución.

Los resultados del análisis de las clases diamétricas muestran que la estructura de la población arbórea en general, está en diferentes etapas sucesionales, lo cual, es característico de un bosque multietáneo. Dentro de todas las categorías diamétricas las clases con mayor número de individuos son las primeras (<7.5-17.4 cm DN), lo que indica que, el bosque está en una etapa de recuperación. Sin embargo, la mayoría de los individuos están distribuidos en las demás clases diamétricas con una tendencia a disminuir, exceptuando algunas clases con diámetros mayores en donde se puede observar un alto número de individuos (como el caso de la clase 10).

Las principales especies: *A. religiosa* y *P. hartwegii*, presentan un mayor número de individuos con diámetros pequeños, (es decir su mayor densidad poblacional se encuentra en las primeras clases diamétricas). Para *A. religiosa* la presencia de individuos pequeños significa que, las condiciones ambientales son propicias para su supervivencia, ya que la etapa inicial de crecimiento depende de las condiciones de sombra (nodricismo) en que se encuentre y de la competencia por parte de la vegetación del sotobosque (Nieto *et al.*, 2003). Esta regeneración que se observa, también concuerda con el estudio realizado por Franco y colaboradores (2006b) en el cual, mencionan que los bosques de *A. religiosa* han mostrado una recuperación en los últimos años en el PNNT.

En el caso de *P. hartwegii*, los individuos presentan una distribución en todas las clases y con poca variación en las centrales; sin embargo, en las clases con mayores diámetros (12, 13 y 14), la frecuencia disminuye a menos de 50 individuos por clase (Figura 10). El hecho anterior se puede explicar por la fuerte presión a la que han estado sometidos estos bosques debido a la extracción selectiva de la madera (Franco *et al.*, 2006b).

8.2. Estimación del contenido de carbono de los bosques de *A. religiosa* y *P. hartwegii*

En este estudio, el inventario se realizó primero bajo un tipo de muestreo sistemático con parcelas circulares de 0.1 ha, sin embargo, se optó por modificarlo a un muestreo sistemático anidado ($n=3$), jerárquico, estratificado con distribución sistemática, pues bajo éste método se obtiene un coeficiente de confiabilidad (r^2) de 0.85 en los resultados aumentando la bondad del muestreo empleado (Ordóñez, 2008) y recabando de manera más precisa las características de la población (Velasco *et al.*, 2002).

Para la estimación de la biomasa y el contenido de carbono se aplicó un método indirecto, el cual consistió en tomar variables del inventario realizado en campo, aplicar ecuaciones volumétricas y factores de conversión que han sido propuesto por diferentes autores (Husch, 2001; IPCC, 2006; Ordóñez, 2008) y que han resultado eficientes para obtener una estimación confiable que permita ponderar las existencias de carbono total, además a diferencia del método directo, es más económico y tiene menor impacto en las poblaciones.

Debido a la presencia de varios individuos con diámetros menores a 7.5 cm los valores de biomasa fueron bajos, entre un intervalo de 0 a 24 Mg/0.1ha, a comparación de otros estudios en donde el intervalo va de 2.1 a 32.6 Mg/0.1ha de biomasa en un bosque de *P. hartwegii* (Rojas, 2004) y de 2.9 a 32.9 Mg/0.1ha en un bosque de *P. pseudostrobus* (Fragoso, 2003).

Las comunidades vegetales con dominancia de *Abies religiosa* tuvieron los valores más altos de contenido de carbono siendo la principal el bosque de *A. religiosa*-*P. hartwegii* con un promedio de 188 MgC/ha, sin embargo el bosque de *A. religiosa* obtuvo un total de casi 5 mil MgC almacenado, ya que existen individuos con altos contenidos de biomasa y por lo tanto, un mayor almacén de carbono en ella (Figura 15). A diferencia del bosque de *A. religiosa*, el bosque de *P. hartwegii* obtuvo un menor contenido de carbono (82.23 MgC/ha), siendo el bosque de *P. hartwegii*-pastizal inducido el que obtuvo el mayor promedio (95 MgC/ha), debido principalmente a las dimensiones de los individuos en los sitios muestreados. Estos resultados y los obtenidos por Franco (2009), coinciden en que, los mayores índices de contenido de carbono se encuentran en los bosques de *Abies religiosa* del PNNT, aunque en ese estudio existieron diferencias entre la clasificación, la cual incluyó el bosque de latifoliadas, cobertura vegetal que también alberga importantes cantidades de carbono.

Los altos valores del coeficiente de correlación obtenidos en el modelo potencial realizado para *P. hartwegii* y *A. religiosa*, indican que el diámetro normal es un parámetro confiable para estimar el contenido de carbono, lo cual ha sido observado por otros autores como Díaz y colaboradores (2007), Avendaño y colaboradores (2009) y Jiménez (2010). Además los modelos obtenidos permiten estimar y monitorear la captura de carbono en años posteriores.

En las gráficas de correlación también se observó que en los diámetros menores de 20 cm, el contenido de carbono aumenta poco presentando valores similares entre cada diámetro, debido a que, los individuos en las primeras etapas, todavía no presentan un crecimiento secundario notable, mientras que en las subsecuentes categorías diamétricas, el crecimiento secundario es mayor (Kozlowski y Pallardy, 1997). Por lo que a mayor diámetro el contenido de carbono tiende a aumentar por la acumulación de compuestos orgánicos durante su crecimiento producto de la fotosíntesis y a la lignificación de la madera del tronco (Raghavendra, 1998).

8.3. Estimación de la captura potencial de carbono del bosque *A. religiosa* y *P. hartwegii*

En este estudio *A. religiosa* presentó un mayor valor en el ICA que *P. hartwegii*; cabe señalar que los valores asignados al incremento corriente anual, se obtuvieron de la monografía de la especie, completándose con otros estudios de caso, por tanto, es importante mencionar que, para una estimación más fina, es preciso obtener el valor del ICA a partir de estudios epidométricos de la población local existente, pues este valor puede diferir debido a que las condiciones del lugar y la edad del arbolado, influyen en el crecimiento de cada especie (Espinoza, 2005), la desventaja es que dicho estudio sería más costoso.

El bosque de *A. religiosa* presentó una captura potencial de carbono mayor que los demás tipos de vegetación muestreadas, con 78.97 MgC/año, la presencia de individuos jóvenes en el área, hace que tengan un incremento en la captura (o fijación) de carbono, a consecuencia del crecimiento que tendrán posteriormente, al contrario de los individuos adultos en los que la captura de carbono llega a un límite y a partir de éste, se estabiliza (Lazcano *et al.*, 2006). En cuanto al bosque de *P. hartwegii*, éste obtuvo una captura potencial de 60.23 MgC/año, mucho menor que *A. religiosa*, esto puede deberse principalmente a los factores ambientales del sitio donde se desarrollen como son: factores climáticos, edáficos, topográficos y de competencia, lo que genera las diferentes tasas de crecimiento que tiene cada especie (Husch *et al.*, 1993). Los bosques de *P. hartwegii* se sitúan bajo condiciones extremas con bajas temperaturas, heladas y desecación, por lo que su crecimiento se puede ver reducido en temporadas cortas (Hoch y Korner, 2003).

Al comparar los resultados del promedio del contenido de carbono de este estudio con estudios realizados en otros bosques de *A. religiosa* y *P. hartwegii* del país, se observaron variaciones en el contenido de carbono (Cuadro 8):

Cuadro 8. Contenido de carbono (MgC/ha) de diferentes bosques de *Abies religiosa* y *P. hartwegii* en México

	Sitios	Bosque de <i>A. religiosa</i>	Bosque de <i>P. hartwegii</i>
Galeana (2008)*	Cuenca del río Magdalena, D.F.	162.91	47.3
Ordóñez (2008)	Michoacán	169.7	-
Franco (2009)	PNNT	163.62	95.1
Este estudio	PNNT	156.23	82.28

*Bosque cerrado

Las estimaciones para el bosque de *A. religiosa* varían entre este estudio y los mencionados (de 4 a 8 MgC), ya que estos se encuentran por arriba de los 160 MgC/ha y en el presente trabajo fue de 156 MgC/ha, la mayor diferencia la tuvo el estudio de Ordóñez (2008) debido a que la zona bajo estudio es un bosque maduro bajo manejo forestal un punto a favor en cuanto a las ganancias de carbono. En el caso del bosque de *P. hartwegii*, el estudio de Galeana tuvo variaciones de casi el doble del carbono almacenado con este estudio (82.28 MgC/ha), esto puede deberse a: 1) la densidad del arbolado cerrado sugiere otra categoría en su clasificación –bosque abierto y bosque cerrado-, 2) intensidad de muestreo, 3) clases diamétricas presentes y 4) dominantes y edad del sitio.

En resumen, se puede decir que aparte de la metodología y la intensidad de muestreo utilizado, las diferencias en los resultados dependen de varios factores que influyen en la captura y almacenamiento del carbono en la vegetación, tales como: el estado de conservación en el que se encuentre el bosque y la calidad de sitio, las variaciones también se deben a la edad del arbolado, el crecimiento diferencial que tiene cada individuo que genera los distintos valores de biomasa, los incrementos en el almacén de carbono, y la estructura de la vegetación como

son: a) la densidad del arbolado y b) su composición (Torres y Guevara, 2002; Galeana, 2008).

La importancia de los resultados obtenidos, radica en la cantidad de CO₂ que, estos tipos de ecosistemas pueden capturar (secuestrar) de la atmósfera. En este estudio los bosques de *Abies religiosa* son los que obtuvieron valores altos en el contenido y captura de carbono y, por ende en la del CO₂. Además, la mayor superficie forestal del parque (más de 16,000 ha, Franco *et al.*, 2006a) la ocupa este bosque, lo que aumenta la capacidad para brindar este y otros servicios ambientales como son la captación de agua, la conservación y/o mantenimiento de la biodiversidad y la belleza escénica.

Por otro lado, los bosques de *P. hartwegii* del PNNT enfrentan el problema de la disminución de gran parte de su cobertura vegetal en los últimos años (Franco, 2006b), lo que ha provocado, la incorporación del carbono almacenado hacia la atmósfera y la pérdida del potencial de esa superficie para secuestrar el carbono, por lo que es prioritario, formular e implementar estrategias de reforestación de las zonas más dañadas y el manejo de las que aún están preservadas.

Los estudios realizados en el país, concernientes al contenido y el potencial de captura aún son pocos (Ordoñez, 1999 y 2008; Jaramillo *et al.*, 2003; Frago, 2003; Zamora, 2003; Tapia, 2006; Galeana, 2008;). Lo primero que se debe obtener son líneas base, que generen conocimiento a escala local y/o regional sobre la capacidad que tienen los bosques como sumideros de carbono en los diferentes almacenes del ecosistema. En este estudio solo se estimó el carbono en la vegetación, como línea base, lo cual puede dar pie para realizar análisis más detallados ya sea con parcelas de monitoreo permanente que lleven a conocer los flujos de carbono y su dinámica. Teniendo las bases para conocer la cantidad de carbono que los bosques de *A. religiosa* y *P. hartwegii* pueden secuestrar y almacenar en el PNNT, se pueden originar futuros proyectos referentes al pago de servicios ambientales de carbono, que puedan ser una alternativa viable para la población local (Vargas y Yáñez, 2004).

IX. CONCLUSIONES

- Los bosques de *Abies religiosa* compuestos en su mayoría por individuos maduros contienen en su biomasa aérea 4,999 MgC.
- El bosque de *A. religiosa-P. hartwegii* obtuvo el mayor promedio en el contenido de carbono con 188 MgC/ha. Para el bosque de *A. religiosa* el promedio fue de 156 MgC/ha.
- El promedio del contenido de carbono para el bosque de *P. hartwegii* fue de 82.23 MgC/ha, lo que representa menos de la mitad de lo obtenido para el bosque de *A. religiosa-P. hartwegii* y casi la mitad de lo registrado en el bosque de *A. religiosa*.
- Existe una correlación significativa entre el diámetro normal y el contenido de carbono para las especies estudiadas, aplicando las ecuaciones $y = 1.855E^{-004} * x^{2.206}$ para *A. religiosa* y $y = 4.097E^{-005} * x^{2.564}$ para *P. hartwegii*.
- El bosque de *A. religiosa* presenta grandes capacidades para absorber el CO₂ de la atmósfera por tener una captura potencial de carbono alta (78 MgC/año) a comparación de las demás comunidades vegetales, como por ejemplo el bosque de *P. hartwegii* el cual tiene un potencial de captura de 60.23 MgC al año.
- Con la finalidad de conocer y comprender mejor los flujos de carbono en estos ecosistemas es necesaria la estimación de los demás almacenes de carbono para tener estudios más completos.
- El parque nacional Nevado de Toluca representa una fuente de servicios ecosistémicos para la población local y regional, por las masas forestales que se distribuyen en el área, principalmente el de la captura de carbono, por lo que este tipo de estudios puede ayudar a definir estrategias de manejo integral forestal como una opción para la mitigación del cambio climático, mejorar los proyectos de pago por servicios ambientales e incentivar el desarrollo sustentable en sus habitantes, con el fin de mantener y conservar los ecosistemas naturales del país.

X. REFERENCIAS

- Aguilar, V. 2007. Diagnóstico del Parque Nacional Nevado de Toluca con base en unidades de paisaje. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. UNAM. México. 81 p.
- Alcamo, J., N. Ash, C. D. Butler, J. Baird, D. Capistrano, S. Carpenter, J. C. Castilla, R. Chambers, K. Chopra, A. Cropper y G. Daily. 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Millennium Ecosystem Assessment. Estados Unidos de América. pp 49-70.
- Almeida-Leñero, L. L., J. G. Cleef y A. González-Trápaga. 2004. Plant communities of the zacatonal alpino area of the Popocatepetl and Nevado de Toluca volcanoes in Central Mexico. *Phytocoenologia*, 34(1):91-134.
- Alvis, J. F. 2009. Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayan. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad del Cauca, Colombia. 7(1):115-122.
- Ahrens, C. D. 2001. Essentials of Meteorology: An invitation to the Atmosphere. 3a edición. Thomson. U.S.A. p. 35.
- Avendaño, H., D. M.; Acosta M., M.; Carrillo A., F. y Etchevers B., D. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*. México. 32 (3):233-238.
- Ayala, R. A. 2001. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo, División de Ciencias Forestales. 70 p.
- Boden, T.A., G. Marland, y R.J. Andres. 2009. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001. Disponible: <http://cdiac.ornl.gov/>. (8 de febrero de 2010).

-
- Brown, S., A. J. R. Gillespie, and A. E. Lugo, 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35:881-902.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO. Roma. Forestry paper 134:55.
- Caballero, M., S. Lozano y B. Ortega. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Rev. Digital Universitaria* 8(10): 1-12. Disponible: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>. (22 de noviembre de 2009).
- Caemmerer, S. y W. P. Quick. 2000. Rubisco: physiology in vivo. En: Leegood R., T. D. Sharkley y S. von Caemmerer (Comp.) *Photosynthesis: physiology and metabolism*. Kluwer Academic Publisher. U.S.A. pp 85-107.
- Carlson, M., J. Wells and D. Roberts. 2009. The Carbon the World Forgot: Conserving the Capacity of Canada's Boreal Forest Region to Mitigate and Adapt to Climate Change. Boreal Songbird Initiative and Canadian Boreal Initiative, Seattle, WA, and Ottawa. pp 7-8.
- CONABIO, 1998. La diversidad biológica de México: Estudio de país, 1998. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 293 p. (Edición digital: CONABIO).
- CONABIO. 2006. Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 71 pp.
- CONABIO. 2008. La diversidad biológica forestal en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/institucion/cooperacion_internacional/doctos/dbf_mexico.html. (18 de enero 2010).

CONANP. 2009. Parques Nacionales. Comisión Nacional de las Áreas Naturales Protegidas. México. Disponible: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/parques_nacionales.php. (5 de febrero de 2010).

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). 1992. Naciones Unidas. p 3.

Corvalán, V., P. y J. Hernández, P. 2006. Estructura de rodal. Cátedra de dasimetría. Depto. de Recursos Forestales. Universidad de Chile. 6 p.

Dávalos, S., R., M. I. Rodríguez y E. Martínez. 2008. Almacenamiento de carbono. *En: Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz*. R. Manson, V. Hernández O, S. Gallina y K. Mehlreter (Comp.). Instituto Nacional de Ecología, SENANART. 330 p.

Department of Sustainability and Environment (DSE). 2005. Victoria's state of the forests report. Australia. pp 111-113.

Díaz, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y 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). p 25-34. México.

Douce, R. y H. W. Heldt. 2000. Photorespiration. *En: Photosynthesis: physiology and metabolism*. Leegood R., T. D. Sharkley y S. von Caemmerer (Comp.) Kluwer Academic Publisher. U.S.A. pp 115-131.

Espinoza, M. 2005. Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, D.F. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. 75 p.

FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. *Informes sobre recursos mundiales de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. pp 1-2.

-
- Foley, J. A. and N. Ramankutty. 2004. A primer on the terrestrial carbon cycle: what we don't know but should. *En: Field. C. B. and M. R. Raupach (Comp.).The global carbon cycle: integrating humans, climate, and the natural world.* Island Press.The Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). USA. pp 279-281
- Fonseca, G., W., F. Alice, G. y J. M. Rey, B. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *BOSQUE* 30(1): 36-47. Costa Rica.
- Fragoso L., P. I. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea de las especies maderables del predio Cerro Grande municipio de Tancítaro Michoacán, México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". Michoacán, México. 66 p.
- Franco, M. S. 2009. Estimación de la captura de carbono en zonas forestales. El caso del Parque Nacional Nevado de Toluca. Editorial Instituto Literario. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Edo. de México. 136 p.
- Franco, M., S., H. H. Regil G., C. González E. y G. Nava, B. 2006a. Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM.* 61:38-57.
- Franco, M. S., H.H. Regil-García y J.A.B.-Ordóñez Díaz. 2006b. Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques* 12(1):17-28. México.
- Fregoso, A., A. Velázquez, G. Bocco y G. Cortéz, 2001. El enfoque de paisaje en el manejo forestal de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México.* 46:58-77.

-
- Galeana, P. M. 2008. Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valoración económica, en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Tesis de licenciatura. Geografía, Facultad de Filosofía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 74 p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 246 p.
- García del Valle, L. 1999. Evaluación forestal del Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 85 p.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Garduño, V.H., y Espíndola, J.M., 2002. Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central Mexico. Boulder, Colorado, Geological Society of America. 26 p. U.S.A.
- González-Trápaga, M.A. 1986. Descripción y aspectos fitogeográficos de la vegetación alpina del Nevado de Toluca, Estado de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. 77 p.
- Granados S. D., G. F. López y M. A. Hernández. 2007. Ecología y silvicultura en bosques templados. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 13(1): 67-83. México.
- Hoch, G. y C. Korner. 2003. The carbon charging of pines at the climatic treeline: a global comparison. Oecologia. 135:10-21.
- Husch B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. Memorias del simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. pp 9.
- Husch, B., Miller, C. and Beers, T. 1993. Forest Mensuration. Krieger Publishing Company, Third Edition Malabar, Florida. pp. 193-194.

Instituto Nacional de Ecología (INE). 2008. Inventario nacional de gases efecto invernadero 2006. México. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/cpcc-lineas/929-inem-1990-2006>. (20 de enero de 2011).

INE-SEMANART. 2009. México cuarta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. 1era edición. México. pp. 61-103.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. Recursos Naturales: semblanza curricular. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/renalgeo/recursos_naturales.asp?c=952. (18 de febrero de 2010).

IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T.,Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 p.

IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 104 p.

Jandl, R. 2001. Medición de tendencias en el tiempo del almacenamiento de carbono del suelo. Memorias del simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. pp 3.

-
- Jaramillo V., J. 2004. El ciclo global del carbono. *En*: J. Martínez y A. Fernández B. (Comp.). El cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, SEMANART. México. pp 77-84.
- Jaramillo, V. J., J. B. Kauffman; L. R. Rodríguez; D. L. Cummings y L. J. Ellingson. 2003. Biomass, carbon and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes. *Ecosystems*. 6: 609-629.
- Jiménez, C. C. 2010. Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl., en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 55 p.
- Kozlowski, T. T. y S. G. Pallardy. 1997. Growth control in woody plants. Academic Press. E.U.A. 643 p.
- Kump, Lee. 2009. The carbon cycle from fossil fuels. American Association of Petroleum Geologists (AAPG) anual convention, Denver Colorado. 25 p.
- Lazcano, I., E. M. Zepeda B. 2006. Estimación de secuestro de carbono para cuatro coníferas en la región de Chignahuapan, Puebla. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 28 p.
- Le Quéré, C. y N. Metz. 2004. Natural processes regulating the ocean uptake of CO₂. *En*: Field. C. B. and M. R. Raupach (Comp.). The global carbon cycle: integrating humans, climate, and the natural world. Island Press. The Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). USA. pp 243-245.
- Lorimer, G. H. 1976. Evidence for the existence of discrete activator and substrate sites for CO₂ on Ribulose-1,5 bisphosphate carboxilase. *Journal of Biological Chemistry* 254(13): 5599-5601. U.S.A.

-
- Macías, J. L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. LVII (3): 379-424.
- Magaña, V. 1994. El pronóstico del tiempo para los próximos días, meses, años. Ciencias N°35. pp 15-22.
- Matthews, E., R. Payne, M. Rohweder y S. Murray. 2000. Pilot analysis of global ecosystems. WRI Publications. USA. pp 55-59.
- Mitchell, J. F. 1989. The green house effect and climate change. American Geophysical Union. Reviews of Geophysics 27:115-139. U.S.A.
- Mohanakumar, K. 2008. Stratosphere-troposphere interactions: an introduction. Springer science. Estados Unidos de América. pp 1-53.
- Musálem, S. A. y M. A. Solís. 2000. Monografía de *Pinus hartwegii*, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Centro, Secretaria de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. 74 p.
- Nieto, C., M. A. Musalem y J. C Boyás. 2003. Efecto de la vegetación asociada al sotobosque sobre el crecimiento y desarrollo inicial de *Abies religiosa* (HBK) Schltdl. Ciencia Forestal en México. 28 (94):7-22. México
- Ordóñez, J. A. B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Unidad de participación social, enlace y comunicación del Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. México. 72 p.
- Ordóñez, J. A. B. 2004. Índices de contenido y captura de carbono en áreas forestales. UNAM. México.
- Ordóñez, J. A. B. 2008. Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la región purépecha. Tesis de Doctorado en Ciencias Biomédicas. Instituto de Ecología, UNAM. México. 140 p.

-
- Ordoñez, J. A. B; de Jong, B. H. J., García-Oliva F., Aviña F. L., Pérez J. V., Guerrero G., Martínez R. y Maser, O. 2008. Carbon content in vegetation, litter and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*. Vol. 255. Issue 7.
- Ordóñez, J. A. B. y O. Maser. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*. 7(1):3-12. México.
- Pieter Tans, NOAA/ESRL. 2010. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Disponible: www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/. (20 de marzo de 2010).
- Pimienta de la Torre, D., G. Domínguez C., O. Aguirre C., F. J. Hernández y J. Jiménez P. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. México. *Madera y Bosques*. 13(1):35-46. México.
- Plass, G. N. 1956. The carbon dioxide theory of climate change. *Tellus* 8(2):140-154.
- Portis, A. R. 1995. The regulation of Rubisco by Rubisco activase. *Journal of experimental botany* 46: 1285-1291. Oxford, Inglaterra.
- Raghavendra, A. S. 1998. *Photosynthesis: A Comprehensive Treatise*. Cambridge University Press. Inglaterra. 394 p.
- Rojas, F. 2004. Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional La Malinche: Tlaxcala-Puebla. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. 68 p.
- Ruíz, L. J. y M. C. Fandiño O. 2009. Estado del bosque seco tropical e importancia relativa de su flora leñosa, islas de la Vieja Providencia y Santa Catalina, Colombia, Caribe suroccidental. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 33(126): 5-15.
- Russo, R. 2009. Guía práctica para la medición de carbono en la biomasa forestal. Universidad Earth, Unidad de carbono neutro, Costa Rica. Disponible:

<http://www.scribd.com/Guia-Practica-de-Medicion-de-Carbono-en-la-Biomasa-Forestal/d/29369907>. p 8. (9 de junio de 2010)

- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 505 p.
- Sánchez O., E. Vega; E. Peters y O. Moroy. 2003. Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Instituto Nacional de Ecología. México. 315 p.
- Sandoval-Basso, A. 1987. Actualización y análisis cartográfico sobre usos del suelo y vegetación del Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. 107 p.
- Seinfeld J. H. y S. N. Pandis. 2006. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2a. edición. Editorial Wiley-Interscience. Estados Unidos de América. pp. 6-8.
- SEMARNAT. 2003. Proceso de Montreal, aplicación de los criterios e indicadores para el manejo forestal sustentable. Criterio cinco. Informe de México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. p 130.
- Serrano, G. E. 2002. Contribución al conocimiento del México forestal. Revista de información y análisis. Núm. 22:7-14. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/Articulos/ambientales/forestal.pdf>. (18 de enero 2010).
- Snowdon, P., J. Raison, H. Keith, P. Ritson, P. Grierson, M. Adams, K. Montagu, H. Bi, W. Burrows and D. Eamus. 2002. Protocol for sampling tree and stand biomass. National Carbon Accounting System Technical Report No. 31. Australian greenhouse office. 65 p.
- Tapia, M. 2006. Estimación del contenido de carbono en la biomasa aérea en el Ejido de San Pedro Jacuaro, Michoacán, México. Facultad de Biología,

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Maestría en Conservación y Manejo de los Recursos Naturales.

The forest foundation. 2008. Forests and the carbon cycle. Sharing knowledge about forest, U.S.A. 46 p.

Torres R., J. M y A. Guevara. 2002. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. Gaceta ecológica. Instituto Nacional de Ecología. SEMANART. 63: 40-59. México.

United Nation Development Programm (UNDP)/GRID-ARENDA. 2011. Green house effect. Figuras. Disponible en: <http://maps.grida.no/go/graphic/greenhouse-effect>. (Mayo 3, 2010).

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2004. The first ten years. Climate Change Secretariat. Alemania.96 p.

UNFCCC. 2007. Climate change: impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries. Climate Change Secretariat 64 p.

Valdez, P., M. E. 2008. Diagnóstico integrado para el ordenamiento ecológico territorial del Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México. Tesis de Maestría en Geografía. UNAM. México. 169 p.

Valero, E. 2004. Los bosques como sumideros de carbono: una necesidad para cumplir con el Protocolo de Kyoto. Memorias del 1e Congreso Internacional de Energías Renovables. Universidad de Vigo. Grupo de investigación AF-4. 12 p. Vigo, España.

Vargas, M., F. 1997. Parques Nacionales de México. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México. pp 89-97.

Vargas, A. y S. A. Yáñez. 2004. La captura de carbono en bosques: ¿Una herramienta para la gestión ambiental? Gaceta Ecológica. Instituto Nacional de Ecología. 70:5-18. México.

-
- Vázquez, R., M. A. 1998. La utilización de las áreas naturales protegidas en México como una alternativa de desarrollo (estudio de caso: Parque Nacional Zoquiapan y Anexas). Tesis de licenciatura. UNAM. México.
- Velasco, E., F. Moreno y R. Rodríguez. 2002. Comparación de siete diseños de unidades de muestreo secundarias en inventarios forestales. *Ciencia Forestal en México* 27(92): 29-52. México.
- Vela, L., J. C. Boyas, A. Hernández, A. Mancera O. y A. Rodríguez. 1976. El Nevado de Toluca. *Ciencia Forestal* 1(4):53-61, México.
- Vidal, A., J. Y. Benítez, J. Rodríguez, R. Carlos y H. Gra. 2003. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea var. caribaea* en la E.F.I. La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Revista de Ciencias Forestales Quebracho* 11:60-66.
- Villalpando, O. 1968. Algunos aspectos ecológicos del Volcán Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. 36 p.
- Villers, L. y I. Trejo. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. *En: J. Martínez y A. Fernández B. (Comp.). El cambio climático: una visión desde México.* Instituto Nacional de Ecología, SEMANART. México. pp 239-254.
- Villers-Ruíz, L. y J. López-Blanco. 1995. Evaluación del uso agrícola y forestal del suelo en la cuenca del Río Temascaltepec, Nevado de Toluca, México. *Boletín de Investigaciones Geográficas.* 31:69-92.
- Villers, L., L. García del Valle y J. López. 1998. Evaluación de los bosques templados en México: una aplicación en el Nevado de Toluca. *Investigaciones geográficas, UNAM* 36:7-19. México.
- Wallace, J. M. y P. V. Hobbs. 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey.* 2a ed. Elsevier. E. U. A. 483 p.

WWF. 2007. La deforestación en México. Disponible en: http://www.wwf.org.mx/wwfmex/prog_bosques_deforestacion.php (26 febrero de 2010).

Zamora, C. J. C. 2003. "Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque templado del Ejido La Majada, Municipio de Periban, Michoacán, México". Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". Michoacán, México.

Zúñiga, S. 2006. Diagnóstico del estudio de la vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México. 65 p.