



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**CUANTIFICACIÓN FÍSICA Y MONETARIA DEL ALMACENAMIENTO Y
FIJACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DEL BOSQUE, EN LA
REGIÓN IZTA-POPO, ESTADO DE MÉXICO.**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de

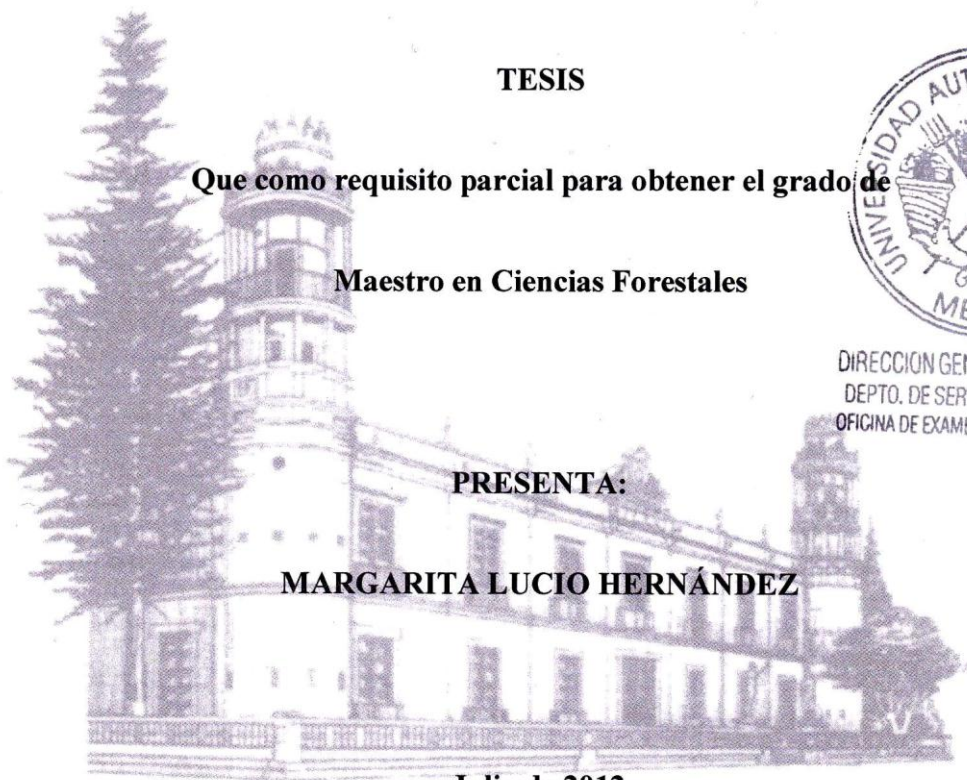
Maestro en Ciencias Forestales



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

MARGARITA LUCIO HERNÁNDEZ



Julio de 2012

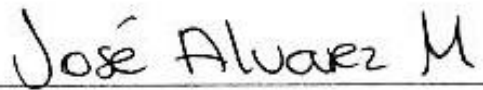


Tesis realizada por **Margarita Lucio Hernández** bajo la dirección del Comité Asesor indicado y aprobada por el mismo para obtener el grado de Maestro en Ciencias Forestales.

CODIRECTOR:
M.C. Ernesto Marcelo Zepeda Bautista

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ernesto ZB', written over a horizontal line.

CODIRECTOR.
Dr. José Guadalupe Álvarez Moctezuma

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'José Álvarez M', written over a horizontal line.

ASESOR:
Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alejandro', written over a horizontal line.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi maestro en la vida...

A mi madre Marcela Hernández Acosta y a mi padre Román Lucio Mendoza, con admiración y respeto.

A mis hermanos: Leydi Janeth y José Javier, por su compañerismo y apoyo.

A mis sobrinos: Misael, Cristian, Suri Javier y Oscar Farid, expresándoles el gran amor que les tengo.

A Luis Mario García con mucho cariño, gracias por la comprensión y el apoyo brindado.

A mis amigos: Edgar y Alicia Armas, Dante González, Alejandra Colon, Gabriela Vargas, Graciela Martínez, Cuauhtémoc Hernández, Luis Verdin, Salvador Fuentes, Marcos A. Ramírez, Israel López, Julio Medrano, Cesar Barrera, Aneline Martínez, Mareza Rivera, Liliana Terrazas, Iliana y Marcela Pastrana, María Luisa González, José A. Alcantara, Alma Delia Ortiz, Ruth Torres, Maricarmen Díaz, Jeamy Rico, Valeria Madrigal, María del Carmen Hernández, Sabino Morgado, Adair Zepeda, Alejandro Ayala, Manuel López, Bossuet Gaston, Adair Camacho, Rigoberto Hernández, Octavio Fuentes, Javier Ríos, Adriana Mendoza, Idalia Zaragoza, Paula Sánchez, Ernesto Carlos.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo Forestal para la Administración Ambiental S.C. por toda la información facilitada para poder llevar a cabo este trabajo, en especial al M.C. Isidro Lazcano Hernández por su interés en la realización del presente.

A Protectora de Bosques del Estado de México, en particular al Ing. Gilberto Galeote Rivera, Jefe de la Unidad de Conservación de Suelos Forestales, por la información proporcionada para enriquecer los resultados.

Al M.C. Marcelo Zepeda Bautista por su amable atención, apoyo y dirección en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Carlos Cántora González por su disposición en contribuir con este proyecto, brindándome su valiosa asesoría.

Al Dr. Alejandro I. Monterroso Rivas por el apoyo en mi formación académica y sus consejos para mi desempeño profesional.

Al Dr. Hugo Ramírez Maldonado por la atención y asesoría.

DATOS BIOGRÁFICOS

Margarita Lucio Hernández nació en el Distrito Federal, México el 26 de diciembre de 1983. Hija de Román Lucio Mendoza y Marcela Hernández Acosta, la menor de sus hermanos: José Javier y Leydi Janeth.

Cursó la primera enseñanza (1987-1989) en el Jardín de Niños Ramón Manterola del municipio de Villa de Tezontepec, Hidalgo, lugar al que se trasladó su familia después de su nacimiento. En 1995 concluyó su primaria en la escuela Miguel Hidalgo y realizó sus estudios de secundaria (1995-1998) en la escuela Sor Juana Inés de la Cruz, ambas ubicadas en el municipio de San Salvador, Hidalgo. Posteriormente ingresa a la Preparatoria Agrícola (1998-2001) de la Universidad Autónoma Chapingo, institución donde concluye sus estudios profesionales en el Departamento de Suelos y obtiene el título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables en enero de 2006 con la presentación de la tesis titulada “Estimación de balances de humedad para la Cuenca Amajac bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático”.

En enero de 2010 ingresa al programa de posgrado Maestría en Ciencias en “Ciencias Forestales” inscrita a la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, concluyendo con todos los requisitos para obtener el grado en Julio de 2012.

Dentro de sus actividades profesionales relevantes se encuentra su estancia profesional en la Granja Orgánica White House en Hereford, Inglaterra. En el ámbito laboral se ha desempeñado en el área de servicios ambientales hidrológicos, de biodiversidad y captura de carbono, así como en proyectos relacionados con monitoreo de calidad del agua, sistemas de información geográfica, impacto ambiental y ecoturismo.

RESUMEN

CUANTIFICACIÓN FÍSICA Y MONETARIA DEL ALMACENAMIENTO Y FIJACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DEL BOSQUE, EN LA REGIÓN IZTA-POPO, ESTADO DE MÉXICO.

Los bosques actúan como sumideros y reservorios de CO₂. El objetivo del presente trabajo fue determinar la línea base del carbono almacenado en la biomasa aérea, y tasa promedio de fijación de CO_{2eq}, así como su valor monetario, en la Región Izta-Popo, Estado de México. Se utilizaron datos de inventario forestal y se calcularon los volúmenes unitarios para la estimación de existencias reales totales, posteriormente se hizo la conversión a carbono de acuerdo con la gravedad específica de la madera de cada especie, el factor de expansión de biomasa y asumiendo un contenido de carbono de 0.5. El potencial de fijación de carbono se estimó en Núcleos Agrarios bajo aprovechamiento maderable, considerando las posibilidades de corta autorizadas y los incrementos corrientes anuales. Se valoró monetariamente el

carbono almacenado y la fijación promedio anual de CO_{2eq}. Como resultado se obtuvo un promedio de 22.64 tC/ha para toda el área forestal. Del total de carbono almacenado las especies *A. religiosa* y *P. hartwegii* constituyen el 69.62 %. En el bosque de oyamel el carbono almacenado se presenta en un rango de 36.29 a 74.35 tC/ha y en el bosque de coníferas de 28.29 a 66.39 tC/ha. En todos los casos se observó una tendencia creciente en la acumulación de carbono durante el ciclo de corta para *Abies* y *Pinus*, con tasas de fijación de 2.60 a 6.37 y de 0.58 a 3.23 tC/ha/año, respectivamente. Se concluye que el manejo forestal instrumentado en la zona de estudio influye positivamente en el incremento de carbono en la biomasa aérea, por lo que se puede considerar como un manejo sustentable y favorable para la fijación de CO_{2eq}.

Palabras clave: *A. religiosa*, carbono, manejo sustentable, biomasa aérea, *Pinus spp.*

SUMMARY

QUANTIFICATION PHYSICS AND MONETARY OF CARBON STORAGE AND FIXING IN THE FOREST, IN THE IZTA-POPO REGION, ESTADO DE MÉXICO

The forests act as sinks and reservoirs of CO₂. The objective of the present work was to determine the base line of the carbon stored in the aboveground biomass, and the average rate of fixation of CO_{2eq}, as well as their monetary value, in the Izta-Popo Region, Estado de México, México. Data of a forest inventory was used and unit volumes were calculated for estimating total real stocks, subsequently the conversion to carbon was made according to the specific gravity of the each wood species, the biomass expansion factor and assuming a carbon content of 0.5. The potential carbon fixation was estimated in Núcleos Agrarios with forest management and wood utilization, considering the possibilities allowed and current annual increases. The carbon stored and the annual

average fixation of CO_{2eq}, were evaluated monetarily. The result was an average of 22.64 tC/ha for the entire forest area. From the total carbon stored, *A. religiosa* and *P. hartwegii* accumulated the 69.62 %. In the fir forest the carbon is present in a range of 36.29 to 74.35 tC/ha and in the coniferous forest from 28.29 to 66.39 tC/ha. In all cases was observed an increasing tendency for the carbon accumulation during the cutting cycle for *Abies* and *Pinus*, with fixation rates of 2.60 to 6.37 and from 0.58 to 3.23 tC/ha/year, respectively. It is concluded that the forest management implemented in the study area had positive influences on carbon increase in the aboveground biomass, therefore it may be considered as sustainable management and favorable for CO_{2eq} fixation.

Keywords: *A. religiosa*, carbon, sustainable management, biomass airs, *Pinus spp.*

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO GENERAL	2
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
4.1. Cambio climático	3
4.2. El efecto invernadero	4
4.3. Reducción de emisiones por deforestación y degradación (REDD) en México.	5
4.4. Medición, reporte, verificación y monitoreo.....	6
4.5. Metodologías para definir la línea base de almacenamiento y fijación de carbono en bosques.	8
4.6. Valores de línea base para algunos tipos de bosque en el mundo.....	10
5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	12
5.1. Localización	12
5.2. Fisiografía	12
5.3. Geología	13
5.4. Edafología	16
5.5. Hidrología	19
5.6. Clima.....	20
5.7. Uso del suelo y vegetación.....	22
5.8. Flora	23
5.9. Fauna.....	25
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
6.1. Datos de inventario forestal	26
6.2. Descripción de la metodología de los inventarios.....	28
6.2.1. Inventario en Núcleos Agrarios con PMFM	28
6.2.2. Inventario Forestal del Estado de México 2010.....	29
6.3. Estimación de volúmenes unitarios.....	29

6.3.1.	Ecuaciones de volúmenes del SEDEMEX.....	30
6.3.2.	Coeficiente mórfico.....	31
6.4.	Cálculo de las existencias reales totales.....	31
6.5.	Cálculo del almacenamiento de carbono.....	33
6.5.1.	Gravedad específica de la madera.....	33
6.5.2.	Factor de expansión de biomasa	34
6.5.3.	Contenido de carbono	35
6.6.	Cálculo del potencial de fijación de carbono	35
6.7.	Valoración monetaria del carbono almacenado	36
6.8.	Valoración del potencial de fijación de carbono.....	36
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
7.1.	Existencias reales totales.....	37
7.2.	Existencias reales totales por municipio	41
7.3.	Carbono almacenado en la biomasa aérea	43
7.4.	Producción primaria neta de carbono y tasa de fijación de CO _{2eq}	46
7.5.	Valoración monetaria.....	50
7.5.1.	Carbono almacenado.....	50
7.5.2.	Fijación de CO _{2eq}	51
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	54

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de rocas presentes en el área de estudio.	13
Cuadro 2. Grupos de suelos presentes en la zona de estudio	16
Cuadro 3. Superficie forestal por Núcleo Agrario.	26
Cuadro 4. Coeficientes asociados a las variables dasométricas por especie.....	30
Cuadro 5. Densidad básica de la madera de las especies de interés.	33
Cuadro 6. Superficie total y forestal.	37
Cuadro 7. Superficie forestal y forestal comercial por Núcleo Agrario.	37
Cuadro 8. Existencias reales totales en la superficie forestal total	38
Cuadro 9. Existencias reales totales por Núcleo Agrario.....	40
Cuadro 10. Existencias reales totales (m ³ /ha) por Municipio.	41
Cuadro 11. Carbono almacenado en la biomasa aérea por especie para la superficie forestal total.....	43
Cuadro 12. Incrementos de carbono y tasa de fijación de CO _{2eq} para pinos.....	47
Cuadro 13. Incrementos de carbono y tasa de fijación de CO _{2eq} para <i>A. religiosa</i>	50
Cuadro 14. Valor monetario del carbono almacenado para pinos	51
Cuadro 15. Valor monetario del carbono almacenado para oyamel	51
Cuadro 16. Valoración monetaria de fijación de CO _{2eq} para pinos	52
Cuadro 17. Valoración monetaria de fijación de CO _{2eq} para oyamel	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	12
Figura 2. Tipo de rocas en el área de estudio.....	14
Figura 3. Grupos de suelo presentes en el área de estudio.....	17
Figura 4. Subcuencas y tipos de corrientes del área de estudio.	20
Figura 5. Tipos de climas presentes en el área de estudio.	21
Figura 6. Uso de suelo y vegetación.	23
Figura 7. Núcleos Agrarios en el área de estudio.....	27
Figura 8. Forma de las unidades de muestreo en el Inventario Forestal del Estado de México 2010.	29
Figura 9. Proporción de las existencias reales totales por especie.....	39
Figura 10. Proporción de las existencias reales totales por Núcleo Agrario.....	40
Figura 11. Existencias reales totales (m ³ /ha) por municipio	42
Figura 12. Distribución por especie del carbono almacenado.	44
Figura 13. Toneladas de carbono almacenado por hectárea en la superficie forestal de los Núcleos Agrarios.....	44
Figura 14. Distribución del contenido de carbono total en el ciclo de corta para pinos. .	46
Figura 15. Distribución del contenido de carbono total en el ciclo de corta para <i>A. religiosa</i>	49

ABREVIATURAS USADAS

CBA	carbono en la biomasa aérea
CCMSS	Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C.
CICC	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático
CNA	Comisión Nacional del Agua
CO ₂	dióxido de carbono
CO _{2eq}	dióxido de carbono equivalente
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
ERT	existencias reales totales
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FEB	factor de expansión de biomasa
GCCIP	Global Climate Change Information Programme
GEI	gases de efecto invernadero
ha	hectárea
IFEM	Inventario Forestal del Estado de México
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INF	Inventario Nacional Forestal
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
IUSS	Unión Internacional de Ciencias del Suelo
m ³	metros cúbicos
msnm	metros sobre el nivel del mar
Mg ha ⁻¹ C	megagramo de carbono por hectárea
MRVM	medición, reporte verificación y monitoreo
ONU	Organización de Naciones Unidas
PMFM	Programa de Manejo Forestal Maderable
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PROBOSQUE	Protección de Bosques del Estado de México
REDD	Reducción de emisiones por deforestación y degradación
SEDEMEX	Segundo Estudio Dasonómico del Estado de México
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
t	tonelada
tC	tonelada de carbono

1. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI), emitido a la atmósfera por actividades antropogénicas principalmente, contribuyendo al fenómeno de cambio climático. Los bosques actúan como sumideros y reservorios de CO₂. La deforestación y degradación de los bosques es una de las principales fuentes de emisiones de GEI.

La creciente preocupación por el cambio climático ha originado acciones a nivel mundial para la mitigación de emisiones de GEI. En este preámbulo, en el año 2008, durante la XIII sesión de la conferencia de las partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) en Bali, Indonesia, se dio a conocer el fondo cooperativo para el carbono de los bosques, el cual ayuda a los países en vías de desarrollo en sus esfuerzos para reducir las emisiones causadas por la deforestación y la degradación de los bosques, dándole valor a los bosques en pie (PNUMA, 2007).

A diferencia de las actividades de aforestación y de reforestación, las cuales causan cambios anuales pequeños en las reservas de carbono en el largo plazo, frenar la deforestación causa cambios significativos en las reservas de carbono en el corto plazo. Una de las medidas para contrarrestar tal degradación en los bosques corresponde directamente al manejo forestal sustentable pero que genere ingresos económicos a los dueños de los bosques para evitar que opten por el cambio de uso de suelo.

En el informe de evaluación 2007 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), se sostiene que el peso de las emisiones de GEI asociadas al uso del suelo forestal es de 17.4 %, superior a todo lo emitido por el sector del transporte y ocupa el tercer lugar mundial, después de los sectores de energía e industria (SEMARNAT, 2010).

En México las emisiones por cambio de uso de suelo y silvicultura representan el 14% del total de emisiones de GEI, ocupando el tercer lugar después de las emisiones por transporte y generación de energía eléctrica (SEMARNAT, 2007).

Por ello es fundamental la generación de un esquema que logre revertir las causas de la deforestación y la degradación de los bosques para garantizar su conservación en el largo plazo.

El objetivo central de esta investigación fue determinar la línea base del carbono almacenado en la biomasa aérea, y tasa promedio de fijación de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, así como su valor monetario, en la Región Izta-Popo, Estado de México.

La línea base generada en el presente trabajo representa la primera aproximación para incursionar en proyectos de pago por servicios ambientales por captura de carbono, beneficiando directamente a los dueños de los bosques del área de estudio.

2. OBJETIVO GENERAL

- Determinar la línea base del carbono almacenado en la biomasa aérea de los bosques, y tasa promedio de fijación de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, en unidades físicas y monetarias, en la Región Izta-Popo, Estado de México.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular las existencias reales totales para 10 especies forestales y un grupo de latifoliadas, mediante dos métodos de estimación de volumen.
- Explorar las bondades de utilizar datos del inventario nacional forestal y los inventarios para elaboración de programas de manejo forestal maderables, en las estimaciones de carbono.
- Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea y la tasa de fijación de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ de los bosques de interés.

- Cuantificar el valor monetario del carbono almacenado en la región Izta-Popo, Estado de México.
- Cuantificar el valor monetario de la tasa de fijación de CO_{2eq} en seis Núcleos Agrarios bajo aprovechamiento maderable.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Cambio climático

Se entiende por cambio global en el medio ambiente, a aquellas alteraciones en los sistemas naturales, físicos o biológicos; cuyos impactos no son y no pueden ser localizados, sino que afectan al conjunto de la tierra (PNUMA, 2000).

Según Ludevid (1998), el clima cambia de manera natural y continua desde hace miles de millones de años, como resultado de las interacciones entre la radiación solar y los diferentes componentes de la geosfera y de la biósfera. Sin embargo, en la actualidad, la emisión de los denominados GEI resultado de las actividades humanas está cambiando la dirección del clima natural a un cambio climático antropogénico.

Este cambio climático antropogénico se atribuye, directa o indirectamente, a las actividades humanas que alteran la composición global atmosférica, agregada a la variabilidad climática natural observada en periodos comparables de tiempo (IPCC, 1992).

De acuerdo al IPCC (2001), una duplicación de los gases de invernadero incrementaría la temperatura media terrestre entre 1 y 3.5°C. Aunque no parezca mucho, es equivalente a volver a la última glaciación pero en la dirección inversa. Por otro lado, el aumento de temperatura sería el más rápido en los últimos 100 000 años, haciendo difícil que los ecosistemas del mundo y muchas de las especies vegetales y animales que albergan se adapten.

El principal cambio en la atmósfera, que continúa, es en el balance de gases que la forman. Es especialmente notorio en gases invernadero claves, como el CO_2 , el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Estos gases naturales son menos de una décima de un 1 % del total de gases de la atmósfera, pero son vitales pues actúan como una "frazada" alrededor de la Tierra. Sin esta capa la temperatura mundial sería 30°C más baja (Ludevid, 1998).

4.2. El efecto invernadero

A largo plazo la tierra debe liberar al espacio la misma cantidad de energía que absorbe del sol. Parte de esta energía es reflejada por la superficie terrestre y la atmósfera. Sin embargo, la mayor parte pasa directamente a través de la atmósfera para calentar la superficie de la tierra y esta se desprende de dicha energía enviándola nuevamente al espacio en forma de radiación infrarroja, de onda larga (PNUMA, 1999).

La razón en la discrepancia de la temperatura, es que la atmósfera es casi transparente a la radiación de onda corta, pero absorbe la mayor parte de la radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre. Varios componentes atmosféricos, tales como el vapor de agua y el CO_2 , tienen frecuencias moleculares vibratorias en el rango espectral de la radiación terrestre emitida. Estos gases de invernadero absorben y remiten la radiación de onda larga, devolviéndola a la superficie terrestre, causando el aumento de temperatura, fenómeno denominado: efecto invernadero (GCCIP, 1997).

La tierra se calienta al absorber parte de la radiación solar que llega a ella, mientras la otra parte es reflejada al espacio por las nubes. Al calentarse, la superficie del planeta emite radiación de onda larga (infrarroja) hacia el espacio; una parte de ella logra atravesar la atmósfera, mientras que la otra es absorbida y remitida en todas direcciones por las nubes y los gases contenidos de manera natural en la troposfera, como el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3). Gracias a ellos es posible que la temperatura promedio del planeta sea de 15°C . Sin este efecto atmosférico de invernadero y a la distancia de la tierra al sol, que es de 150 millones de kilómetros, la temperatura de la tierra sería de -18°C (Gay, 2000).

Al aumentar la capacidad de la atmósfera para absorber la radiación infrarroja, nuestras emisiones de gases de efecto invernadero alteran la forma en que el clima mantiene el equilibrio entre la energía incidente y la irradiada (PNUMA, 1999).

El principal gas involucrado en el efecto invernadero es el CO₂, ya que sus concentraciones se incrementan año con año. Sus fuentes naturales principales son la respiración, la descomposición de materia orgánica y los incendios forestales naturales. Las fuentes antropogénicas son provenientes principalmente de la quema de combustibles fósiles y, en menor medida, el cambio en el uso del suelo, (principalmente deforestación), la producción de cemento y la combustión de biomasa (IPCC, 2001).

La concentración actual de CO₂ en la atmósfera es de aproximadamente 370 partes por millón (ppm), lo que representa un aumento de más del 30 por ciento desde 1750. Aunque el CO₂ cuenta por más del 60 por ciento del efecto invernadero adicional acumulado desde la industrialización, las concentraciones de otros gases de efecto invernadero también han aumentado (IPCC, 2001).

4.3. Reducción de emisiones por deforestación y degradación (REDD) en México.

Dentro de los proyectos de secuestro de carbono se encuentran las estrategias REDD y REDD+, que además de reducir las emisiones por evitar la deforestación y la degradación forestal, contribuyen a la conservación, manejo sostenible de los bosques y mejoramiento de las existencias de carbono forestal. Estas estrategias fomentan una remuneración económica a los proyectos y propietarios de los terrenos que demuestren mantener e incrementar la biomasa por unidad de superficie.

El planteamiento básico detrás de REDD es que aquellos países dispuestos y en posibilidad de reducir emisiones por evitar la deforestación y degradación de sus bosques, deben ser compensados financieramente por dichas acciones (CCMSS, 2009).

La deforestación y degradación de los bosques es una de las principales fuentes de emisiones de GEI. La deforestación a nivel mundial, principalmente debido a la conversión del suelo forestal a tierras agrícolas y de pastoreo, continúa llevándose a cabo con tasas alarmantes de aproximadamente 13 millones de hectáreas por año (en el período de 1990-2005). Esto genera la liberación del carbono, originalmente almacenado en los árboles, en forma de emisiones de CO₂.

En México se estima que la pérdida y degradación de los bosques, así como su conversión a otros usos de suelo, contribuyen con aproximadamente 14 % de las emisiones de GEI totales (SEMARNAT, 2007). Por lo tanto, es necesario crear instrumentos de política pública nacional que integren los esfuerzos realizados por las instituciones de gobierno y las organizaciones de la sociedad civil para enfrentar el problema de una manera más eficiente.

Un organismo clave dentro de las políticas públicas de México es la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), que fue creada para coordinar las acciones de las dependencias de la administración pública federal en materia de cambio climático.

En agosto de 2009, la CICC publicó el Programa Especial de Cambio Climático, en el cual se presentan metas cuantificables de mitigación y adaptación para hacer frente a este fenómeno. La segunda medida más importante, en cuanto a su potencial de mitigación, se encuentra dentro del sector forestal, poniendo en claro los beneficios de alinear esfuerzos para reducir la deforestación y la degradación de los bosques; instrumentar esquemas de manejo sustentable, y promover la conservación de la biodiversidad y el aumento de las reservas forestales de carbono.

4.4. Medición, reporte, verificación y monitoreo.

El programa ONU-REDD pretende fortalecer la capacidad nacional durante varias etapas de desarrollo y de instrumentación de REDD+ con un enfoque temático en seis áreas de trabajo. Una de las cuales se refiere a la medición, reporte, verificación y monitoreo (MRVM) y se considera como un tema fundamental en los procesos de planeación, ya que solo así se podrá lograr una reducción sostenible y con plazos

definidos de las emisiones de GEI relacionados con los bosques, así como otros objetivos de REDD+ (SEMARNAT, 2010).

El reto principal de monitoreo de REDD+ consiste en cómo contabilizar la cantidad de carbono forestal, incluyendo las fluctuaciones en un periodo de tiempo determinado; tal reto se aborda en los estándares de notificación sobre GEI y en las directrices del IPCC. No obstante, el MRVM para REDD+ abarca mucho más que sólo el carbono. Las directrices metodológicas de la CMNUCC hacen un llamado a los países para que hagan uso de las directrices recientemente emitidas por el IPCC como base para estimar las emisiones de GEI; también, se insta al uso combinado de teleobservación e inventarios de carbono forestal realizados en tierra para la obtención de las estimaciones.

Para ello será necesario prever el desarrollo de capacidades, directrices, asistencia técnica, análisis científicos, intercambio de experiencias e integración de diferentes metodologías para lograr un sistema de MRVM oportuno y rentable.

De forma específica el Programa ONU-REDD busca desarrollar las siguientes actividades para el MRVM.

- Generar datos transparentes, consistentes, precisos y confiables.
- Generar información que abarque tanto el carbono forestal como las salvaguardas ambientales y sociales.
- Detectar cambios (datos de actividad / factores de emisiones).
- Combinar enfoques de teleobservación y de inventarios en tierra.
- Acceder a información gratuita, frecuente, relevante y de fácil obtención. Específicamente incrementar el acceso de los países a información proveniente de la teleobservación, software y estándares.
- Crear sistemas de monitoreo que generen estimaciones propensas a revisión.

4.5. Metodologías para definir la línea base de almacenamiento y fijación de carbono en bosques.

Figueroa et al. (2005) registraron en su trabajo de comparación de la concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación en la Sierra Norte de Oaxaca, que la concentración promedio de carbono en los troncos de los árboles, específicamente en bosque mesófilo y bosque de encino, fue del 49.6 %, con un rango de variación de 47.3 % a 51.3 %. Estas estimaciones las obtuvo mediante derribo de arbolado y análisis en el laboratorio de las rodajas extraídas.

Lazcano (2006), desarrolló un sistema de modelos de totalidad de rodal para estimar la captura de carbono en bosques naturales de *Abies religiosa*, *Pinus patula*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus ayacahuite* en Chignahuapan, Puebla. Para ello generó ecuaciones para estimar el índice de sitio, área basal por hectárea, volumen total por hectárea, altura por categoría diamétrica y estimaciones de sobrevivencia para hacer las proyecciones de secuestro de carbono a través del tiempo y a nivel de clase diamétrica mediante el uso combinado de ecuaciones. Obtuvo que la especie con mayor valor de carbono secuestrado fue *Pinus patula*, 146.17 tC/ha, y la de menor fue *Pinus ayacahuite*, 53.46 tC/ha. Para *P. ayacahuite*, *P. patula* y *A. religiosa*, las edades a las que alcanzaron su mayor productividad de secuestro de carbono, fueron semejantes, a edades relativamente jóvenes, mientras que para *P. pseudostrobus* se encontró a edad mayor a 31 años.

Espejel (2007), realizó estimaciones de carbono en el área forestal de la Comunidad Lobos y Pescaderos de Tepehuanes, Durango, utilizando ecuaciones alométricas. Para esto primero hizo un inventario sistemático en donde se obtuvieron existencias reales totales de: 1679 m³ para Pino, 219 m³ para encino, 42 m³ para otras confieras y 16 m³ para otras latifoliadas; obteniendo que el contenido de carbono correspondiente para cada género fue para *Pinus* de 11 644.92 t; encinos 6 254.98 t; otras confieras 446.08 t y otras latifoliadas 265.40 t. Así como, que la especie predominante almacena en promedio 0.5 t en un año.

Gómez (2008) estableció una metodología para medir los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo en selva baja caducifolia y bosque de encino en la Sierra de Huautla, Morelos, ambas con tres edades de la vegetación, aproximadamente 10, 20 y 40 años. Estimó el carbono en la parte aérea, a partir del peso seco de los componentes, multiplicando por el contenido de carbono de cada componente. La biomasa de especies leñosas con diámetro a la altura del pecho > 2.5 cm se estimó mediante ecuaciones alométricas generadas *ex profeso* por el autor. De esta manera encontró la mayor cantidad de carbono en el bosque de encino y dentro de éste la más alta fue en la edad de 40 años ($147.6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ C}$); la menor fue en la selva baja caducifolia con el valor más bajo para la edad de 10 años ($11.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ C}$). En todos los casos de bosque de encino el mayor volumen de carbono se encontró en el estrato arbóreo y para las condiciones de selva baja caducifolia en el suelo.

García y Sánchez (2009), estimaron el contenido de carbono de la parte aérea del estrato arbóreo de ocho especies maderables a lo largo de un ciclo de corta comprendido entre los años 2007-2016, en base a la proyección volumétrica realizada a partir de datos reportados en el inventario forestal del Ejido Tlalmanalco, Estado de México. El análisis de resultados para las 2 656.5 has bajo aprovechamiento, mostró un incremento final de 8 630 tC sobre 136 126 tC iniciales, siendo *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii* las especies con mayores aportaciones finales con 2 848 tC y 4 680 tC, respectivamente, señalando que la densidad de la madera fue la variable determinante en el cálculo, ya que entre más densa la cantidad de carbono será mayor.

Jiménez (2010), estimó la biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl. en el Parque Nacional Izta-Popo mediante el uso de ecuaciones alométricas. Para ello realizó un muestreo destructivo de 29 árboles y por medio de secado, bajo condiciones de invernadero y estufa, obtuvo su contenido de carbono por el método de combustión seca. El porcentaje de biomasa aérea respecto al peso húmedo que contuvieron los árboles fue de 57.95 %; el 48.55 % de la biomasa fue carbono. La biomasa se distribuyó en su mayoría en el fuste de los árboles y correspondió al 65.31 %, en las ramas al 23.79 % y en el follaje al 10.89 %. Así mismo el contenido de carbono respecto a la biomasa se distribuyó: 64.91 % fuste, 24.19 % ramas y 10.90 % follaje.

Tinoco et al. (2010) determinaron la cantidad de carbono en la biomasa aérea de las comunidades vegetales de la cuenca del Río Platanar, Chiapas. Para ello delimitaron unidades de integración territorial en las cuales se establecieron parcelas de muestreo de 400 m², en donde se realizó un inventario florístico y se calculó el índice de valor de importancia de cada especie. Para las especies más representativas buscaron ecuaciones alométricas para estimar su contenido de materia seca y su contenido de carbono al aplicar el factor 0.5. Los autores reportan que en la comunidad con selva alta perennifolia y con vegetación secundaria, fue en donde se encontró la mayor cantidad de carbono con 99.7 MgC ha⁻¹.

4.6. Valores de línea base para algunos tipos de bosque en el mundo.

Moiseev y Filipchuck (2003) realizaron un balance de carbono en los bosques boreales de Rusia, mediante el cálculo de la producción neta de carbono en el bosque menos la suma de las emisiones de carbono por: aclareos y aprovechamiento final, incendios forestales, descomposición por plagas y enfermedades, pérdida de madera en sitios de corte y la combustión de madera utilizada por la población rural. Como resultado obtuvieron que el incremento neto de carbono en el bosque mezclado de coníferas y templado caducifolio es de 1.08 tC/ha/año.

Gasparri y Manghi (2004) realizaron estimaciones preliminares de contenido de carbono en los Bosques Nativos de la Argentina, procesando los datos dasométricos del Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos llevado a cabo entre 1998 y 2002. Para las estimaciones de volumen aplicaron ecuaciones específicas para cada especie generadas *ex profeso* por varios autores, el cálculo de biomasa lo hicieron con el producto de volumen total y densidad de la madera promedio de cada unidad de muestreo, asumieron un contenido de carbono del 50 % en la biomasa. En el Parque Chequeño se presentó el menor contenido de carbono con 49.40 tC/ha llegando hasta 270.10 tC/ha en los Bosques Andino Patagónicos, con un promedio nacional de 72.16 tC/ha.

Montero et al. (2005) estimaron la producción de biomasa y fijación de CO₂ para las 32 principales especies forestales de los bosques de España. La metodología consistió en el derribo, desramado y pesado de la biomasa en campo y determinación de la materia seca en laboratorio para un total de 1 508 árboles, ajustando modelos alométricos. Los resultados mostraron que los bosques españoles fijan actualmente alrededor del 19 % de las emisiones totales de CO₂ producidas en España, por lo cual consideran que tienen un papel trascendental en el ciclo del carbono. Así mismo mencionan que estos bosques tienen almacenado más de 2.58 millones de toneladas de CO₂, constituyendo un reservorio de gran importancia.

Smith et al. (2008) estimaron la producción primaria neta de carbono en el bosque boreal de Suecia, mediante modelos de simulación que incluyen una descripción detallada de la estructura forestal y procesos biogeoquímicos, en combinación con dos métodos alternativos utilizando datos de imágenes de satélite. Como resultado obtuvieron que la producción primaria neta de carbono va de 2.2 a 4.1 tC/ha/año y que el método que resulto tener mayor aproximación al análisis de inventario forestal es el que utiliza la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación, derivando un modelo de eficacia que indica la cantidad de radiación entrante que los árboles emplean para fijar el carbono.

Hunt et al. (2010) hicieron estimaciones del carbono almacenado en bosques de coníferas, de un rango de edad de 10 a 53 años, al Norte de Ontario, Canadá. Para ello realizaron un inventario forestal, el contenido de carbono para las dos principales especies bajo estudio (*Pinus banksiana* Lamb. y *Picea mariana*) lo determinaron en laboratorio con el equipo Leco CR-12, la biomasa fue estimada por ecuaciones alométricas. Como resultado obtuvieron que el contenido de carbono en el suelo forestal osciló entre 13 a 46 tC/ha y en la biomasa arbórea fue de 11 a 74 tC/ha en bosques bajo aprovechamiento maderable y de 0 a 11 tC/ha en bosques sin aprovechamiento. La producción primaria neta expresada como carbono se encontró en un rango de 0.8 a 3.5 tC/ha/año.

5. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

5.1. Localización

La zona de estudio se ubica en las coordenadas extremas $19^{\circ}20'35''$ y $18^{\circ}56'27''$ de latitud Norte y $98^{\circ}48'45''$ y $98^{\circ}37'35''$ de longitud Oeste. La superficie total es de 46 356.45 ha y el 98 % de ésta se encuentra dentro del Estado de México en los municipios de Amecameca, Atlautla, Chalco, Ecatzingo, Ixtapaluca y Tlalmanalco. El resto cubre pequeñas porciones de los estados de Puebla y Morelos.

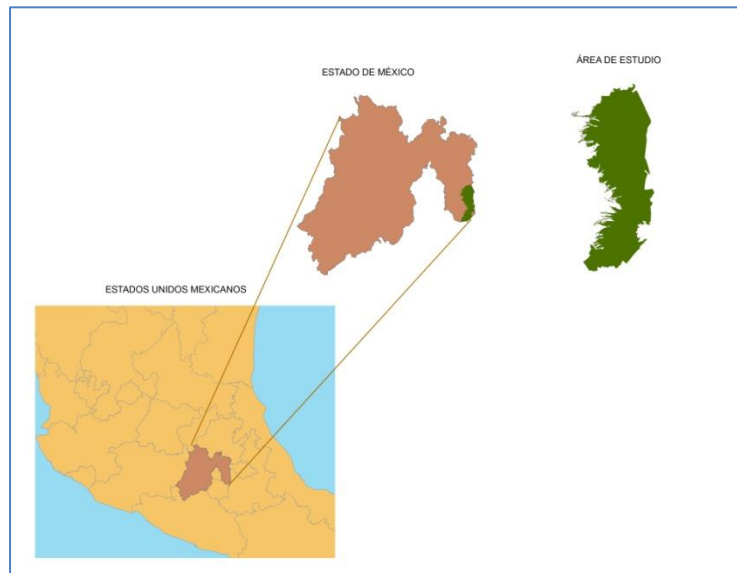


Figura 1. Localización del área de estudio.

5.2. Fisiografía

De acuerdo con INEGI (2002a) la zona de estudio se localiza en la provincia fisiográfica X, denominada Eje Neovolcánico. Específicamente dentro de la subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac (INEGI, 2002b).

El sistema de topoformas que predomina es el que corresponde a la Sierra Volcánica con estratovolcanes y en la parte inferior una llanura aluvial con lomerío (INEGI, 2002c). Cabe destacar que se encuentra dentro de lo que se denomina La Sierra Nevada, que forma parte del Eje Volcánico Transversal, el cual es un macizo montañoso de alrededor de 100 km que va de Norte a Sur, separando las cuencas de México y Puebla. Las lavas de la Sierra Nevada se derivan de un mismo centro eruptivo, situado probablemente en la cima actual del Iztaccíhuatl; el drenaje está bien desarrollado y recorre barrancos profundos (CONANP, 2010).

5.3. Geología

De acuerdo con INEGI (2002d) las rocas presentes en la zona de estudio están representadas por ígneas extrusivas y sedimentarias, siendo las primeras las que ocupan la mayor superficie con un 84 % aproximadamente. De las ígneas extrusivas las Andesitas, Toba ácida y Basalto son las principales por la superficie en que se encuentran. En el Cuadro 1 se pueden observar los tipos de rocas que se encuentran presentes en el área de estudio.

Cuadro 1. Tipos de rocas presentes en el área de estudio.

Tipo de roca	Clave	Superficie por tipo de roca (ha)	% respecto al total
Aluvial	Q(al)	389.03	0.84
Basalto	Q(B)	2178.49	4.70
Basalto-Toba básica	Q(B-Tb)	4161.09	8.98
Toba básica	Q(Tb)	6415.70	13.84
Toba básica-Brecha volcánica básica	Q(Tb-Bvb)	123.26	0.27
Andesita	Ts(A)	26026.49	56.14
Brecha sedimentaria	Ts(bs)	6975.87	15.05
Toba intermedia	Ts(Ti)	86.51	0.19

Tipo de roca	Clave	Superficie por tipo de roca (ha)	% respecto al total
	Total	46356.45	100.00

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2002d)

La distribución espacial de los tipos de rocas se muestra en la Figura 2, donde se puede apreciar la presencia de Basalto en la parte más alta, la distribución que tiene la Andesita, al Sur el Basalto-Toba básica y en una franja con menor altitud la Brecha sedimentaria.

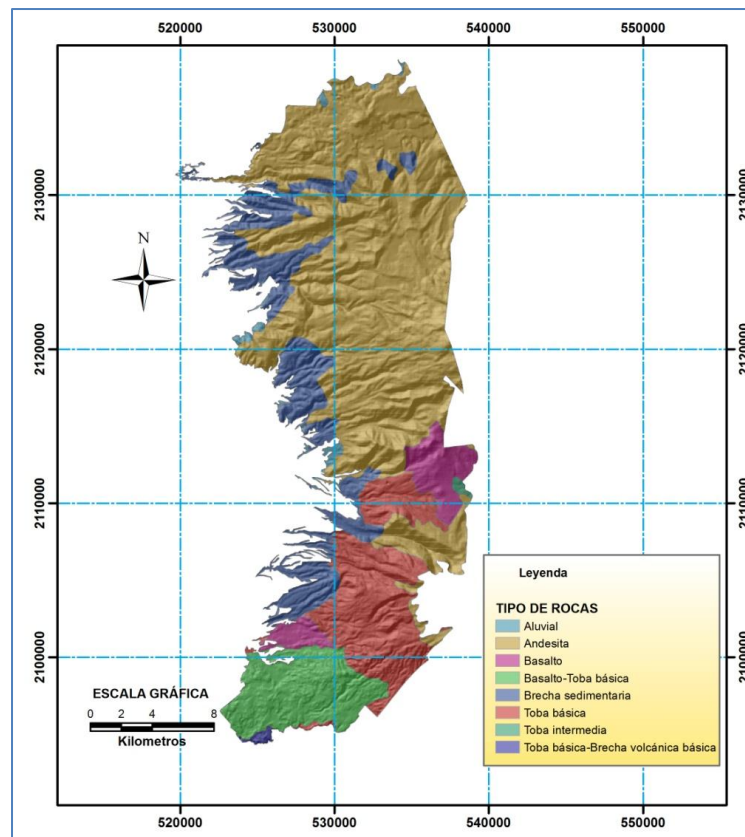


Figura 2. Tipo de rocas en el área de estudio.

Respecto a las eras en que se desarrolló la geología característica de la región se describen los principales aspectos de acuerdo a la CONANP (2012).

El Terciario es la base del relieve actual como producto de la actividad volcánica y el flujo de lavas. La sierra representa una unidad que alcanzó su forma y desarrollo actuales debido a la múltiple sobreposición de sistemas volcánicos sucesivos, en los que coexisten los flujos de erupciones andesíticas arrojadas por los grandes conos, y que se caracterizaron por su explosividad y la efusión abundante de lavas basálticas emitidas por los volcanes pequeños. Por esto, los depósitos de material clástico andesítico se intercalan en algunas regiones con los malpaíses basálticos.

El Cuaternario (dos millones de años a la fecha), se caracterizó por movimientos tectónicos producidos por la fractura Clarión, lo que aunado a un clima lluvioso y al desarrollo de glaciares, dio origen a un proceso de erosión muy acentuado en las partes elevadas y a una gradación de depósitos aluviales, lacustres y fluviales en las partes bajas, que se conocen como formación Clástica Aluvial del Cuaternario. Con estos cambios generales, el relieve se vio afectado debido a la erosión causada por los escurrimientos superficiales que cavaron profundos barrancos, así como por los movimientos tectónicos que crearon fracturas por las que surgieron infinidad de volcanes y flujos de lava que lograron acumulaciones de 2 000 metros y aun de mayor espesor.

Durante el Cuaternario, los primeros movimientos de la fractura Clarión dieron origen al Iztaccíhuatl y el Ventorrillo, hoy en día el Popocatepetl, los cuales están formados por lavas de andesita porfírica de piroxena. Los derrames superiores de estos edificios consisten de una andesita de coloración rosácea de hornablenda. El espesor y la disposición estructural de los derrames son variables, de acuerdo con la topografía sobre la que se asentaron. Los derrames dacíticos y riódacíticos constituyen la unidad del Popocatepetl, pero su base está cubierta por abanicos aluviales que en su parte Sur muestran un espesor considerable.

5.4. Edafología

De acuerdo con la clasificación de Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2007) se presentan los grupos de suelos Andosol y Regosol como los que ocupan la mayor superficie. En el Cuadro 2 se puede observar la superficie de cada grupo de suelo.

Cuadro 2. Grupos de suelos presentes en la zona de estudio

Grupo principal	Clave	Superficie (ha)	Superficie por grupo de suelo (ha)	Porcentaje respecto al total (%)
ANDOSOL	ANhudyh+UMhu+RGdy/2	3,134.79	35,762.99	77.15
	ANhuusk+LPdyli/2R	1,453.29		
	ANhuu/2	167.08		
	ANha/2R	91.07		
	ANha/2	4.46		
	ANmosk+ANum/2R	1,14.43		
	ANumsk+ANDy+LPdyli/2R	4,904.42		
	ANhuu+RGdy+LPdyli/2	25,893.43		
ARENOSOL	AReu+FLeusk/1r	0.79	1,863.55	4.02
	ARdy+LPdyli/1	679.62		
	ARdy+CMdy/1r	152.46		
	AReu+CMeu/1r	1,030.68		
FLUVISOL	FLdylen/1	238.23	238.23	0.51
LEPTOSOL	LPeuli+ANmo/2	716.71	2,236.15	4.82
	LPdyli+ARdy/1	1,475.30		
	LPdyli+ARdy/1	44.14		
PHAEZOEM	PHpdp+DUeu/2	82.28	82.28	0.18
REGOSOL	RGeusk+LPeuli+ANvi/1R	4,679.82	4,679.82	10.10
UMBRISOL	UMhu+LVdyhuu/2r	269.77	1,492.89	3.22
	UMhuar+ANum+RGdy/1	1,223.12		
Total		46,356.45	46,356.45	100.00

Fuente: Elaboración propia con datos de IUSS (2007).

En la Figura 3 se muestra la distribución de los tipos de suelo y se distingue que el Andosol cubre la mayor parte de la superficie, la presencia de Regosol en la parte Sur, así como Leptosol y Arenosol en la zona de menor y mayor altitud.

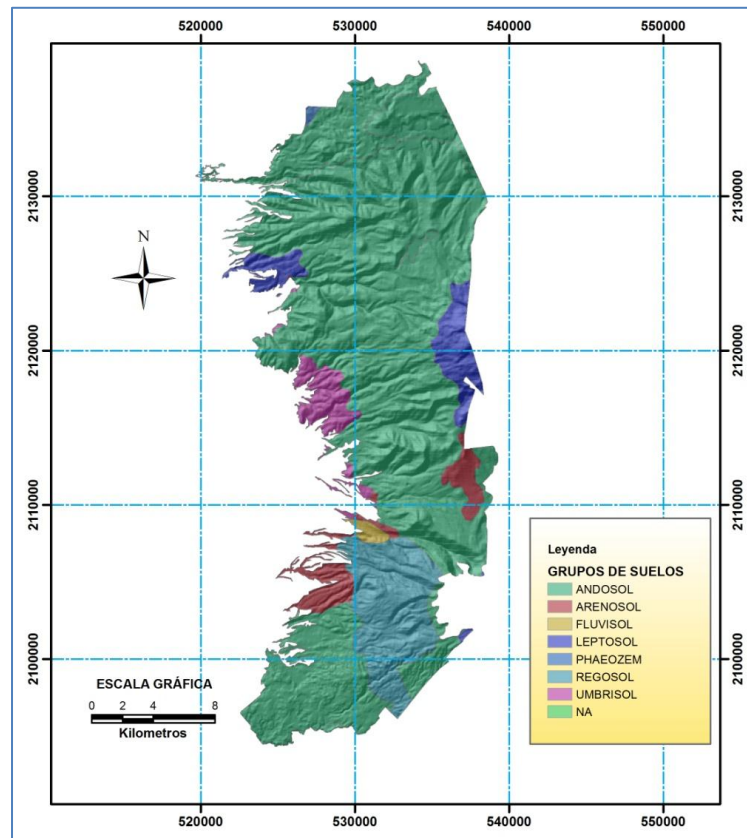


Figura 3. Grupos de suelo presentes en el área de estudio.

A continuación se describe cada uno de los grupos de suelos presentes en el área de estudio conforme a IUSS (2007).

Andosol. Los Andosoles son suelos que se desarrollan en eyecciones o vidrios volcánicos, típicamente son suelos negros de paisajes volcánicos, de ambientes ondulados a montañosos. Este grupo de suelos presenta una textura media y es el que cubre la mayor extensión siendo el 77.15 % del total de la superficie. Abarca totalmente la porción Norte y central de la zona de estudio y una franja de la zona Sur.

Phaeozem. Los Phaeozems son parecidos a Chernozems y Kastanozems pero están más intensamente lixiviados. Consecuentemente, tienen horizonte superficial oscuro, rico en humus que, en comparación con Chernozems y Kastanozems, son menos ricos en bases. Los Phaeozems pueden o no tener carbonatos secundarios pero tienen alta saturación con bases en el metro superior del suelo. Este grupo de suelos presenta una textura media y representa el 0.18 % de la superficie total. Se ubican principalmente en las zonas de las laderas en la parte bajas de la zona de estudio.

Fluvisol. Los Fluvisoles acomodan suelos azonales genéticamente jóvenes, en depósitos aluviales. Perfiles con evidencia de estratificación; débil diferenciación de horizontes pero puede haber presente un horizonte superficial diferente. Los rasgos *redoximórficos* son comunes, en particular en la parte inferior del perfil. Este grupo de suelos presenta una textura gruesa, representa una minoría con respecto a su superficie siendo del 0.51 % del total de la superficie.

Leptosol. Son suelos someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos. El material parental está constituido de materiales no consolidados con menos de 20 % (en volumen) de tierra fina. Este grupo de suelos presenta una textura de media a gruesa y una superficie con respecto al total de 4.82 %.

Regosol. Los Regosoles forman un grupo remanente taxonómico que contiene todos los suelos que no pudieron acomodarse en alguno de los otros GSR. En la práctica, los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte *mólico* o *úmbrico*, no son tan someros ni ricos en gravas (*Leptosoles*), arenosos (*Arenosoles*) o con materiales *flúvicos* (*Fluvisoles*). Este grupo de suelos presenta una textura gruesa y es el que abarca solo el 10.10 % de la superficie con respecto al total. Está ubicado entre el grupo de suelo de los Andosoles.

Umbrisol. Los Umbrisoles acomodan suelos en los cuales se ha acumulado materia orgánica dentro del suelo superficial mineral (en la mayoría de los casos con baja saturación con bases) hasta el punto en que afecta significativamente el comportamiento y la utilización del suelo. Abarca 3.22 % con respecto al total de la superficie.

Arenosol. Los Arenosoles comprenden suelos arenosos, incluyendo suelos desarrollados en arenas residuales después de la meteorización *in situ* de sedimentos o rocas ricos en cuarzo, y suelos desarrollados en arenas recién depositadas tales como dunas en desiertos y tierras de playas. La característica que todos los Arenosoles tienen en común es su textura gruesa, que explica su alta permeabilidad generalmente y baja capacidad de almacenar agua y nutrientes. Este grupo de suelos abarca el 4.02 % del total de la superficie. Existe una pequeña porción que se ubica cerca del volcán Popocatepetl.

5.5. Hidrología

Según la clasificación de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1998) la zona de estudio está ubicada en dos regiones hidrológicas, la 18 del Balsas (RH-18) que ocupa el 43.51 % de la superficie y la 26 del Panuco (RH-26) con el 56.49 % del total.

En la porción de la RH-18 que se ubica en el Sur de la zona de estudio las corrientes tienen una dirección de Este a Oeste y son efluentes del río Amacuzac, mientras que la pequeña franja que abarca en el Norte tiene una dirección de Oeste a Este y van a dar al río Atoyac. Para el caso de la RH-26, las corrientes principales presentan una dirección de Este a Oeste todas tributarias del río Moctezuma. Existen corrientes tanto intermitentes como perennes, algunas de estas corrientes son originadas por el deshielo de los glaciares (Figura 4).

Los manantiales son abundantes por debajo de los 4 000 msnm, por lo que en menor altitud los cauces adquieren mayor velocidad y volumen. Debajo de los 3 500 msnm las aguas ejercen una fuerte erosión en el terreno ya que su caudal es la suma de los deshielos y las precipitaciones. Entre los 2 500 msnm y los 2 300 msnm los arroyos depositan todos los azolves arrastrados a lo largo de su trayectoria, formando abanicos aluviales (CONANP, 2012).

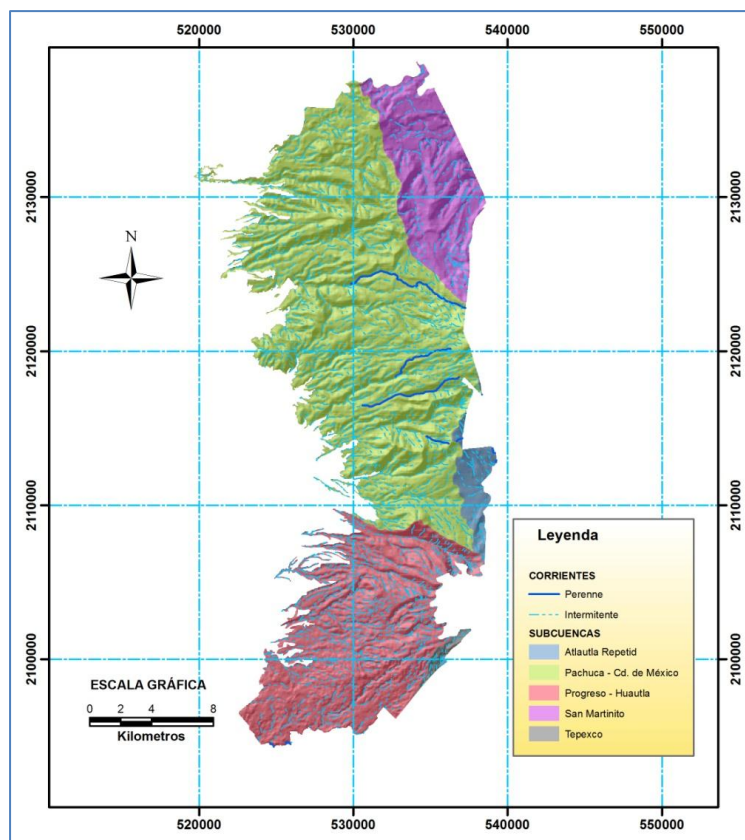


Figura 4. Subcuencas y tipos de corrientes del área de estudio.

5.6. Clima

Dada su ubicación geográfica y la topografía, la zona de estudio presenta unidades climáticas que van de templado subhúmedo hasta frío, pasando por semifrío, subhúmedo (INEGI, 2002e).

En la parte más alta de la cuenca se presenta el clima E (T) H y correspondiendo a la altitud la temperatura media anual entre -2 y 5 °C, la temperatura del mes más caliente entre 0 y 6.5 °C. Esta unidad climática abarca una superficie de 2.73 % del total. Se ubica en la parte que corresponde a la mayor elevación cerca del volcán Ixtaccíhuatl. La distribución de los tipos de climas se muestra en la Figura 5.

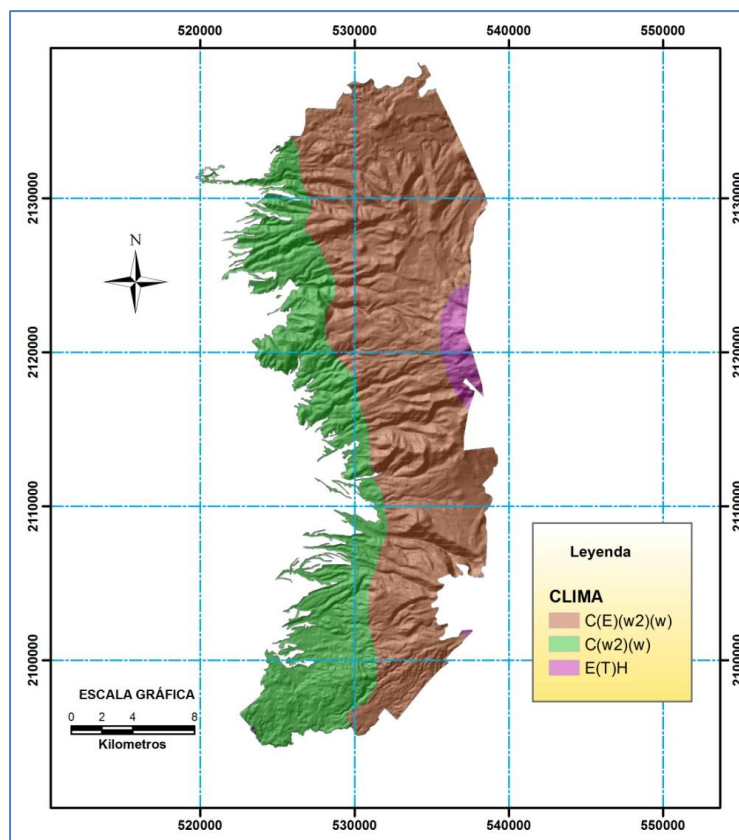


Figura 5. Tipos de climas presentes en el área de estudio.

En una franja al centro del área de estudio de Norte a Sur el clima es semifrío húmedo con lluvias de verano C (E) (w2)(w). La temperatura media anual es de 7.7 °C, siendo el mes más frío enero, con una temperatura de 6.4 °C y el más cálido abril con temperaturas medias de 9.2 °C; la precipitación media anual es de 1 186 mm, con el mes más seco en febrero, presentando una precipitación de 13 mm y el mes más húmedo, septiembre con 203 mm. La relación precipitación-temperatura es de 154 y el porcentaje de lluvia invernal de 4.8. Esta unidad climática abarca la mayor parte de la superficie en la zona con 64.70 % del total.

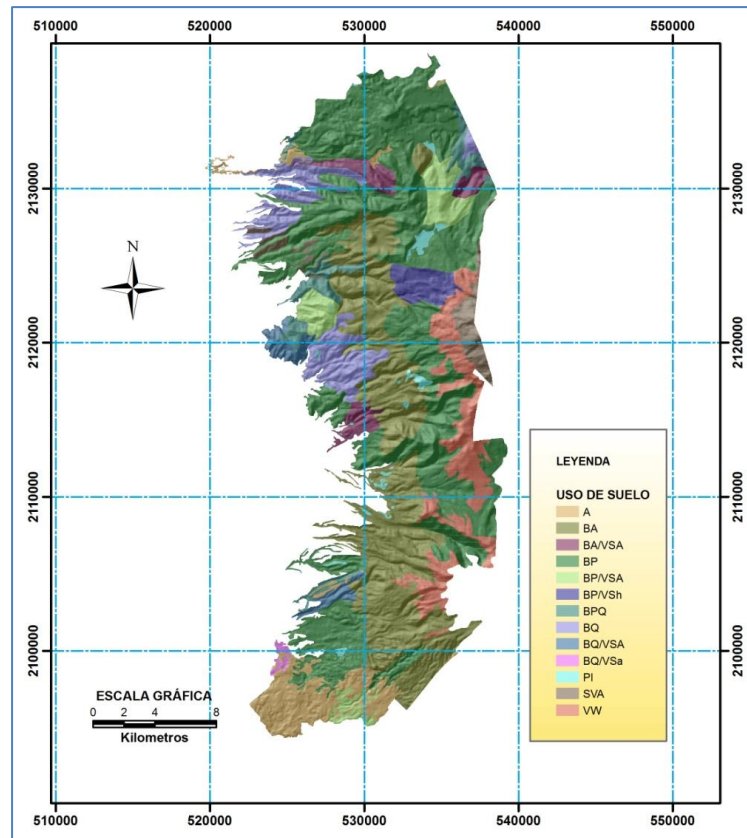
En la zona mas baja está el clima templado subhúmedo el más húmedo de los subhúmedos C (w2) (w), con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes más frio entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22 °C.

La precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm; las lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2 % del total anual. La superficie en que está presente corresponde al 32.54 % del total de la zona de estudio.

5.7. Uso del suelo y vegetación

De acuerdo con la información reportada por PROBOSQUE (2010) los bosques representan la mayor superficie de la zona de estudio. Dentro de las comunidades vegetales que se encuentran está el Bosque de Pino con 20 684.30 ha, lo que equivale al 44.62 % del total de la superficie y presenta dos variantes que ocupan solo una pequeña porción de esta comunidad vegetal; Bosque de Pino con vegetación secundaria arbórea y Bosque de Pino con vegetación secundaria herbácea. El tipo de bosque que le sigue, de acuerdo a la superficie que cubre, es el Bosque de Oyamel con 12 561.13 ha lo que corresponde al 27.09 % de la superficie total, igualmente solo una mínima parte es Bosque de Oyamel con vegetación secundaria arbórea (Figura 6).

Otras comunidades vegetales son el Bosque de Encino con 3 913.7 ha (8.44 %), Pradera de Alta Montaña 3 467.09 ha (7.47 %) y el Bosque de Encino-Pino con 1386.15 ha (2.99 %). También existe la presencia de Pastizal Inducido en 295.4 ha lo que equivale a 0.63 % del total de la superficie.



A: Agricultura, BA: Bosque de oyamel, BA/VSA: Bosque de oyamel con vegetación secundaria arbórea, BP: Bosque de pino, BP/VSA: Bosque de pino con vegetación secundaria arbórea, BP/VSh: Bosque de pino con vegetación secundaria herbácea, BPQ: Bosque de pino encino, BQ: Bosque de encino, BQ/VSA: Bosque de encino con vegetación secundaria arbórea, BQ/VSa: Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva, PI: Pastizal inducido, SVA: Sin vegetación aparente, VW: Pradera de alta montaña.

Figura 6. Uso de suelo y vegetación.

5.8. Flora

La Región Izta-Popo es una zona considerada como el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. La distribución de la vegetación atiende a la altitud, de modo que pueden distinguirse tres pisos fundamentales de vegetación. Los bosques de coníferas son la vegetación dominante, seguidas por la pradera de alta montaña o pastizal alpino y vegetación herbácea, de no más de 50 cm de altura, que colinda con las nieves perpetuas (CONANP, 2012).

Hasta los 3 100 m de altitud se encuentran asociaciones dominadas por *P. montezumae*, forman un dosel de 20 a 30 m sobre el nivel del suelo, frecuentemente asociado con especies de los géneros *Quercus*, *Abies*, *Arbutus*, *Alnus*, *Salix* y *Buddleia* en la zona del Popocatepetl. Se establecen asociaciones vegetales de transición entre *Pinus ayacahuite* y *Abies religiosa*.

En esta zona de ecotono también es frecuente la asociación de *Pinus montezumae* con *Pinus hartwegii*. En estos bosques el dosel no es muy cerrado, lo que permite el establecimiento y desarrollo de diversas especies arbóreas, arbustivas y herbáceas. Entre los géneros mejor representados están: *Pinus*, *Senecio*, *Muhlenbergia*, *Agrostis*, *Lupinus* y *Festuca* (CONANP, 2012).

En las partes más elevadas y abruptas, hacia los 3 600 msnm, se establece el bosque de *P. hartwegii* tolerante a las temperaturas bajas, frecuentes nevadas y probablemente uno de los pinos más adaptados a los incendios superficiales. En las partes bajas de su área de distribución forma rodales abiertos con árboles entre 15 y 20 m de altura, asociados con zacatonal denso y leguminosas como *Lupinus spp.*, pero hacia las partes más elevadas (4 000 msnm), con frecuencia constituye un bosque achaparrado (de 5 a 8 m de alto), más bien abierto, aunque algunos individuos aislados pueden encontrarse en los 4 200 msnm, que es el límite altitudinal arbóreo en México (CONANP, 2012).

Los bosques de oyamel tienen un rango altitudinal entre 2 400 a 3 500 msnm. El dosel suele estar entre los 20 y 40 m sobre el nivel del suelo. Los suelos son típicamente profundos, bien drenados pero húmedos todo el año. Las asociaciones de bosques de encino son todavía más complejas que las del pino y se entremezclan con otros tipos de vegetación. De 2 400 a 3 100 msnm se encuentra la asociación de *Q. laurina* con *Q. crassifolia*, *Q. rugosa*, *Abies religiosa*, *Arbutus spp.*, *Juniperus spp.*, y *Pinus spp.* (CONANP, 2012).

Los zacates del Parque Nacional Izta-Popo se consideran en buen estado; hay una combinación de zacatonales primigenios y zacatonales secundarios como consecuencia de la introducción de zacatales destinados a la ganadería, los cuales han resultado buenos para la engorda del ganado a los 4 000 msnm. El pastizal alpino se establece entre los 4 000 y los 4 500 msnm (CONANP, 2012).

Los pastizales subalpinos se caracterizan por la presencia de gramíneas amacolladas que oscilan entre 60 y 120 cm de altura y se localizan en altitudes de 2 700 a 4 300 m. Los pastizales de *Calamagrostis tolucensis* y *Festuca tolucensis* se distribuyen en altitudes de 3 500 a 3 600 m. Ocupan especialmente los valles en el interior de los conos de volcanes donde existen suelos profundos con drenaje deficiente. Los zacatonales de *Muhlenbergia macroura* y *M. quadridentata* se establecen sobre laderas y valles, dentro del rango altitudinal que va de 3 200 a 3 500 m de altitud. *Festuca amplissima* y *Stipa ichu* son la especies dominantes en los zacatonales de altitudes que van de 2 500 a 3 300 m, principalmente en claros de bosques de oyamel y de pino (CONANP, 2012).

5.9. Fauna

De acuerdo con la CONANP (2012) entre los mamíferos más representativos de la región están, los roedores los cuales, incluyen tuzas, ardillas y ratones; le sigue el orden de los carnívoros, como gato montés, zorros, zorrillos, coyotes y mapaches, entre otros; los quirópteros (murciélagos) ocupan el tercer lugar; con menos especies se encuentran los insectívoros (musarañas), y finalmente los lagomorfos (conejos).

Dentro de los reptiles se tienen registradas dos especies de víboras de cascabel *Crotalus triseriatus* y *Sistrurus ravus*, esta última endémica y protegida. También se distribuyen especies como el alicante del Popocatepetl (*Barisia imbricata*), endémica y protegida; lagartijas como *Sceloporus aeneus*, *S. mucronatus* y *S. grammicus*, protegida; víboras como *Thamnophis scalaris*, especie endémica y amenazada; la culebra cola larga *Thamnophis eques* también se encuentra amenazada (CONANP, 2012).

Mientras que los anfibios están representados por el tlaconete leproso o salamandra (*Pseudoeurycea leprosa*) es una especie amenazada y endémica; el tlaconete regordete (*Pseudoeurycea cephalica*) está amenazado; la salamandra pie plano (*Chiropterotriton chiropterus*) es una especie endémica y protegida; el ajolote (*Ambistoma altamirani*) es endémico, mientras que la rana plegada (*Hyla plicata*) es una especie amenazada y endémica. Algunas aves que se encuentran en la región son gavilancillo, aguilillas, correcaminos, codorniz, lechuza, búho, cuervo, ceniztonle, jilguero, calandria, gorrión, azulejo, tórtola, coquito, chillón, tigrillo, primavera, carpintero, colibrí, chochoyota, seseto, cardenal, cacaxtle o chara, tordo y mulato (CONANP, 2012).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Datos de inventario forestal

La información necesaria para la realización del presente trabajo se integró con datos proporcionados por el Grupo Forestal para la Administración Ambiental S.C. a partir del inventario forestal realizado en seis Núcleos Agrarios para elaboración de su programa de manejo forestal, para aprovechamientos maderables (Cuadro 3).

Cuadro 3. Superficie forestal por Núcleo Agrario.

Núcleo agrario	Municipio	Superficie total (ha)	Superficie forestal (ha)	Superficie del muestreo	Año de inventario
Amecameca	Amecameca	3,407.71	3,323.81	3,323.81	2007
Ecatzingo	Ecatzingo	3,610.54	1,402.76	1,402.76	2010
*Ozumba	Atlautla	990.20	978.04	978.04	2010
San Martín Cuautlalpan	Chalco	3,833.69	3,572.49	3,572.49	2007
Tecomaxusco	Ecatzingo	571.33	328.83	328.83	2010
Tlalmanalco	Tlalmanalco	10,052.45	8,205.04	5,262.45	2007
Total		22,465.91	17,810.98	14,868.38	

*La cabecera municipal es Ozumba, sin embargo su zona forestal se ubica dentro del municipio de Atlautla.

Los bosques de estos Núcleos Agrarios son representativos de la región bajo estudio, ya que se distribuyen en toda la zona, al Sur se localiza Ecatzingo y Tecomaxusco, al centro Amecameca y Ozumba y en la parte Norte Tlalmanalco y San Martín Cuautlalpan (Figura 7).

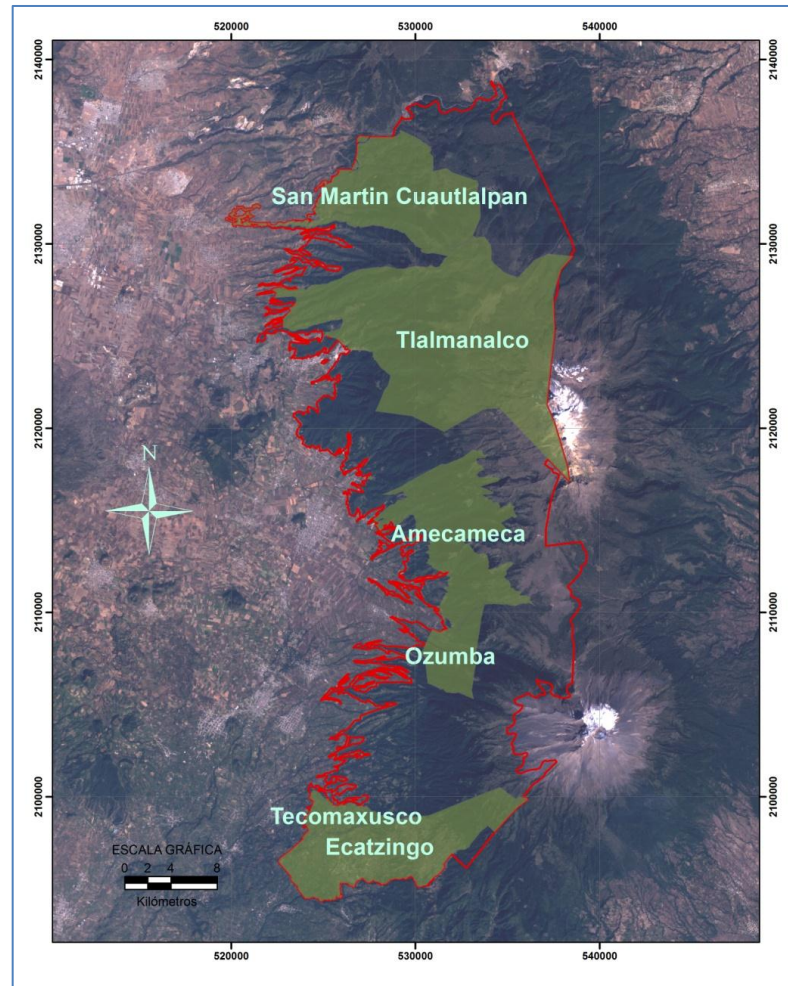


Figura 7. Núcleos Agrarios en el área de estudio.

Con la finalidad de realizar un estudio regional se complementaron los datos de las áreas faltantes con información facilitada por Protectora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE) conforme al Inventario Forestal del Estado de México 2010 (IFEM), parte del Inventario Nacional Forestal del mismo año .

Los datos de interés que se obtuvieron de los datos de inventarios forestales fueron: nombre de la especie, diámetro normal, altura, edad y tiempo de paso.

Antes de proceder con el manejo de datos para realizar los cálculos respectivos, se construyeron gráficas de área basal, altura y diámetro, así como un análisis de índice de esbeltez, con la finalidad de identificar puntos aberrantes, es decir valores extremos respecto al resto de los valores observados, los cuales fueron analizados para determinar si lo que representaban se podía considerar real en cuanto a las características morfométricas de un árbol. Esto debido a que algunas veces estos puntos anómalos obedecen a errores cometidos en la obtención o el registro de los datos.

6.2. Descripción de la metodología de los inventarios.

6.2.1. Inventario en Núcleos Agrarios con PMFM

En todos los Núcleos Agrarios se llevo a cabo un diseño de muestreo sistemático, con sitios de dimensiones fijas, de forma circular, de 1 000 m². La equidistancia entre sitio fue de 150 m, excepto para el caso de Tecomaxusco en donde los sitios estuvieron cada 125 m.

Se consideró la delimitación por rodales, esto tomando en cuenta las líneas de muestreo preferentemente con un rumbo Oeste franco. Cabe mencionar que la continuidad de algunas líneas, y por lo tanto la equidistancia entre algunos sitios se vio alterada ya que existen rodales en los cuales no se levantaron sitios de muestreo debido a que no presentan vegetación arbórea o arbustiva, por lo que se continuó con el siguiente rodal.

La intensidad de muestreo fue variable en cada Núcleo Agrario y va desde 2.05 % para el caso de Tlalmanalco hasta 6.11 % para Tecomaxusco.

6.2.2. Inventario Forestal del Estado de México 2010

El muestreo realizado en el Inventario Forestal del Estado de México se hizo por conglomerados, con apego a los criterios considerados en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Cada conglomerado quedó integrado por cuatro unidades de muestreo secundarios o sitios, con un arreglo geométrico en forma de “Y invertida”, de forma circular para el caso de bosques, con una superficie de una hectárea (PROBOSQUE, 2010)

La distribución de las cuatro unidades secundarias es a una equidistancia del centro a centro, equivalente a 45.14 m respetando el siguiente arreglo (Figura 8).

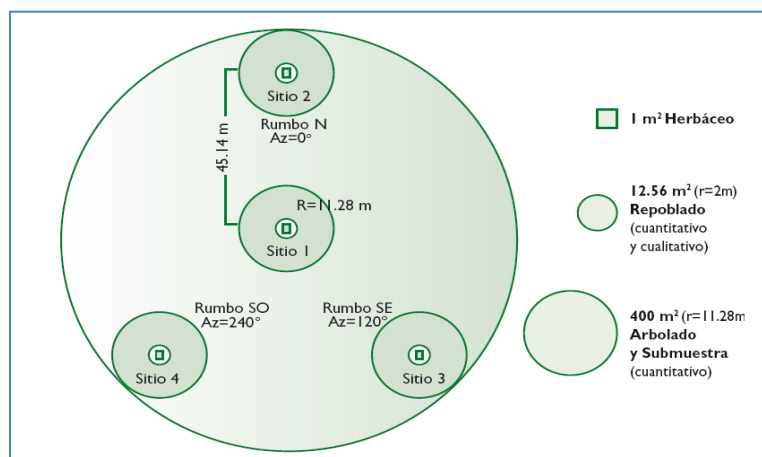


Figura 8. Forma de las unidades de muestreo en el Inventario Forestal del Estado de México 2010.

6.3. Estimación de volúmenes unitarios

El cálculo de volúmenes unitarios se hizo mediante dos métodos, aplicando las ecuaciones de volumen generadas durante el Segundo Estudio Dasonómico del Estado de México (SEDEMEX, 1985-1990) y usando un coeficiente mórfico para el caso de las especies del genero *Pinus*. Esto se hizo con fines de comparación, ya que el resto del análisis se realizó con los resultados obtenidos de las ecuaciones del SEDEMEX, decisión basada en que estas mismas se utilizaron en el procesamiento de la mayoría de los PMFM y en el Inventario Forestal del Estado de México 2010.

6.3.1. Ecuaciones de volúmenes del SEDEMEX

Estas ecuaciones concentran a las principales especies de los bosques del Estado de México de acuerdo a su hábito de crecimiento y morfología.

El modelo general de la ecuación es:

$$Vf = e^{C1} * d^{C2} * h^{C3}$$

Donde

Vf: Volumen del fuste con corteza

e: constante neperiana o base de los logaritmos

d: diámetro normal en cm

h: altura total en m

C1, C2 y C3 = Coeficientes asociados a las variables dasométricas de cada especie.

Cuadro 4. Coeficientes asociados a las variables dasométricas por especie.

Especie	Coeficientes		
	C1	C2	C3
<i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. montezumae</i> , <i>P. ayacahuite</i> , <i>P. patula</i>	-9.7753	2.04668	0.81083
<i>P. leiophylla</i> , <i>P. hartwegii</i> ,	-10.024	2.06319	0.86404
<i>A. religiosa</i>	-9.718	1.78606	1.08051
<i>Cupressus spp.</i>	-9.5382	1.74008	1.04811
<i>Quercus spp.</i>	-9.3433	2.49335	0.15563
Otras latifoliadas	-9.3156	2.38434	0.16699

El volumen resultante se multiplica por un factor de 1.30 para incluir el ramaje del arbolado y obtener el volumen total árbol.

6.3.2. Coeficiente mórfico

El coeficiente mórfico es un indicador numérico de la forma de los fustes de los árboles, entendiéndose como tal a la relación existente entre el volumen real de un fuste y el volumen de un cuerpo geométrico convencional que puede ser el cilindro, el paraboloide apolónico, el cono, etc., de la misma base que el área basal del árbol y de su misma altura (Romahn y Ramírez, 2006).

El valor de estos coeficientes mórficos, generalmente es menor que la unidad. Para este caso se aplicó un coeficiente mórfico de 0.75 para todas las especies de pinos.

El volumen se calculó multiplicando el volumen del cilindro de la misma longitud que el fuste y de base igual a la de la sección del fuste a 1.30 m, por el coeficiente mórfico.

$$VR = VC * CM$$

Donde

VR: volumen real

VC: volumen del cilindro de la misma longitud del fuste

CM: coeficiente mórfico

El volumen resultante se multiplicó por un factor de 1.3 para obtener finalmente el VTA.

6.4. Cálculo de las existencias reales totales

Una vez obtenidos los volúmenes unitarios se procedió al cálculo de las existencias reales totales de la siguiente manera:

- Volumen total ($\hat{t}_{ij}$) de la especie i en el sitio j , para el predio k , donde $i = 1, 2, \dots, r_j$; $j = 1, 2, \dots, u_k$ y $k = 1, 2, \dots, 6$.

- Volumen promedio de la especie i para el predio k

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{u_k} y_{ij}}{u_k}, \text{ para } k = 1, 2, \dots, 6$$

donde

y_{ij} = Volumen total de la especie i en el sitio j

u_k = Numero de sitios en el predio k

- Estimador del volumen total de la especie i para el predio k

$$\hat{T}_i = N_k * \bar{y}_i$$

donde

N_k = Número total de sitios para el predio k

- Cálculo del estimador de la varianza de $\hat{T}_i$ para el predio k

$$\widehat{Var}(\hat{T}_i) = N_k^2 \frac{S_k^2}{u_k} \left(1 - \left(\frac{u_k}{N_k} \right) \right)$$

Se asumió un muestreo sistemático y una aproximación a la varianza estimada del estimador $\hat{T}_i$.

6.5. Cálculo del almacenamiento de carbono

Masera et al. (2000) proponen un procedimiento, para el cálculo del carbono contenido en la vegetación, utilizando datos de inventarios forestales, usando la expresión:

$$C_{BA} = V * WD * FEB * CC$$

donde

C_{BA} : Carbono contenido en la biomasa aérea.

V: Volumen de la madera.

WD: Gravedad específica de la madera.

FEB: Factor de Expansión de Biomasa.

CC: Contenido de Carbono

6.5.1. Gravedad específica de la madera

La variable gravedad específica de la madera utilizada, corresponde a datos reportados por diferentes autores para las especies de interés, tal como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Densidad básica de la madera de las especies de interés.

Nº	Nombre de la especie	Densidad básica (g/cm ³)
1	<i>P. montezumae</i> ¹	0.44
2	<i>P. pseudostrobus</i> ²	0.54
3	<i>P. teocote</i>	0.46
4	<i>P. leiophylla</i> ²	0.46
5	<i>P. ayacahuite</i> ³	0.36
6	<i>P. hartwegii</i> ⁴	0.49
7	<i>P. patula</i> ²	0.50

Nº	Nombre de la especie	Densidad básica (g/cm ³)
8	<i>Abies religiosa</i> ²	0.38
9	<i>Quercus</i>	0.66
10	<i>Cupressus</i>	0.45
11	<i>Otras latifoliadas</i>	0.50

Fuente: ¹(Zamora et al., 2007), ²(Fuentes, 1998), ³(GOCHE et al., 2000), ⁴(Rojas y Villers, 2005).

6.5.2. Factor de expansión de biomasa

El factor de expansión de biomasa (FEB) es el cociente de la biomasa aérea total y la biomasa del fuste. Para su estimación se utiliza el peso seco de ramas, hojas y fuste, el cálculo de los factores se realiza con la formula.

$$FEB = (Bf + Br + Bh) / Bf$$

Donde

Bf: Biomasa del fuste

Br: Biomasa de ramas

Bh: Biomasa de hojas

Para la estimación de factores de expansión de biomasa por especie es necesario el derribo de árboles con métodos destructivos, lentos y costosos. Es por ello que para la presente investigación se utilizó un FEB de 1.4 generalizado para todas las especies, excepto para *Alnus spp.* y *Quercus spp.* que fue de 1.5. Esto se hizo en base a los resultados de Dominguez et al. (2009) quien obtuvo un FEB en promedio de 1.37 para *P. pseudostrobus*, 1.39 para *P. teocote* y 1.51 para *Quercus sp.*

6.5.3. Contenido de carbono

Para transformar la biomasa a contenido de carbono se multiplica por el factor de 0.5; este factor corresponde a la fracción de carbono promedio en la biomasa seca de la madera de acuerdo con Gayoso et al. (2002), Díaz et al. (2005), Figueroa et al. (2005) e IPCC (2007).

6.6. Cálculo del potencial de fijación de carbono

El potencial de fijación de carbono se calculó utilizando los datos de los PMFM correspondientes a ERT y la posibilidad volumétrica anual autorizada, durante el ciclo de corta, para el bosque de pino y bosque de oyamel, usando la siguiente expresión.

$$ERT_{\text{año } x} = ERT_{R \text{ año } x} + (ICA * N)$$

donde:

$ERT_{\text{año } x}$ = ERT (m^3) para el año de intervención x

$ERT_{R \text{ año } x}$ = ERT residual (m^3) para el año de intervención x

ICA = Incremento Corriente Anual en volumen ($m^3/ha/año$)

Se refiere al incremento extrapolado para el total de la superficie y se expresa en volumen (m^3).

N = Diferencia entre el año de intervención (año x) y el año de inicio del ciclo de corta.

Con la proyección de las ERT se hizo la transformación a carbono siguiendo la metodología señalada en el apartado 6.5, para obtener la tasa de fijación de carbono.

Para conocer la tasa de fijación de CO_2 equivalente (CO_{2eq}) se hizo la transformación asumiendo que una tonelada de carbono equivale a 3.67 toneladas de CO_2 .

6.7. Valoración monetaria del carbono almacenado

La valoración monetaria del carbono que actualmente se encuentra almacenado en la biomasa aérea de los bosques de interés se determinó con base en un escenario en el que los dueños del bosque realizaran un aprovechamiento del 100 % y la cantidad mínima que recibieran por ello fuese al precio promedio que actualmente tienen los productos maderables “secundarios” en la zona (\$450.00/m³).

A partir de este escenario se estableció el precio por tonelada de carbono almacenada, como la cantidad mínima que los dueños de los bosques deberían recibir por seguir manteniendo la masa forestal intacta.

6.8. Valoración del potencial de fijación de carbono

Esta valoración está inmersa en proyectos de captura de carbono, que contemplan el enriquecimiento de bosques naturales y el manejo de productos, que permitan obtener una adicionalidad de carbono.

La valoración monetaria se hizo de acuerdo con los resultados del potencial de captura de CO_{2eq}. El precio que se empleó fue en base al valor de certificados de reducción de emisiones, que para el caso de México es de US\$10.00/tC (FAO, 2004).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Existencias reales totales

Con fines de ilustrar mejor los resultados de ERT en el Cuadro 6 y 7 se muestran datos respecto a la superficie forestal total y por Núcleo Agrario.

Cuadro 6. Superficie total y forestal.

Tipo	Superficie (ha)
Superficie total	46,356.45
Superficie forestal	38,545.30

Cuadro 7. Superficie forestal y forestal comercial por Núcleo Agrario.

Núcleo Agrario	Municipio	Superficie total (ha)	Superficie con uso de suelo diferente al forestal (ha)	Superficie forestal (ha)	Superficie forestal comercial (ha)
Amecameca	Amecameca	3,407.71	83.90	3,323.81	2,123.21
Ecatzingo	Ecatzingo	3,610.54	2,207.78	1,402.76	563.67
Ozumba	Atlautla	990.20	12.15	978.04	347.20
San Martín Cuautlalpan	Chalco	3,833.69	261.20	3,572.49	2,058.609
Tecomaxusco	Ecatzingo	571.33	242.50	328.83	121.62
Tlalmanalco	Tlalmanalco	10,052.45	1,847.41	8,205.04	2,656.54
TOTAL		22,465.91	4,654.94	17,810.98	7,870.85

Fuente: Elaboración propia con datos de los PMFM.

De acuerdo con las estimaciones volumétricas, se obtuvieron las ERT de las especies de interés, para la superficie total forestal, con resultados que muestran una discrepancia sustancial entre los valores de las ERT obtenidas con cada uno de los métodos de

estimación de volumen, siendo 63.29 % mayor el volumen calculado con el coeficiente mórfico, respecto a la aplicación de las ecuaciones generadas por el SEDEMEX (Cuadro 8). Esta discrepancia es solo un indicador de la necesidad de contar con ecuaciones de volúmenes adecuadas a nivel de especie y para cada región en particular.

Cuadro 8. Existencias reales totales en la superficie forestal total

No.	Especies	Ecuaciones SEDEMEX VTA (m ³)	Coeficiente mórfico VTA (m ³)
1	<i>P. montezumae</i>	338,297.29	532,372.82
2	<i>P. pseudostrobus</i>	160,287.22	255,743.27
3	<i>P. teocote</i>	15,981.55	25,296.56
4	<i>P. leiophylla</i>	61,666.34	97,672.91
5	<i>P. ayacahuite</i>	23,566.49	37,386.95
6	<i>P. hartwegii</i>	912,584.98	1,451,715.80
7	<i>P. patula</i>	27,106.52	43,226.22
8	<i>A. religiosa</i>	2,027,702.77	3,670,099.54
9	<i>Quercus spp.</i>	80,818.48	80,818.48
10	<i>Cupressus</i>	142,812.03	142,812.03
11	Hojosas	232,729.67	232,729.67
Total		4,023,553.34	6,569,874.26

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por PROBOSQUE y el Grupo Forestal para la Administración Ambiental S.C.

Las especies más representativas de las ERT de todas las especies son *A. religiosa* y *P. hartwegii* con el 53.13 % y 22.39 % respectivamente. La especie *P. montezumae* representa el 8.26 % del total y el resto de las especies de pino suman el 7.08 %, proporción similar al que en conjunto tienen el *Quercus spp.*, el *Cupressus spp.* y las latifoliadas con el 9.14 % (Figura 9).

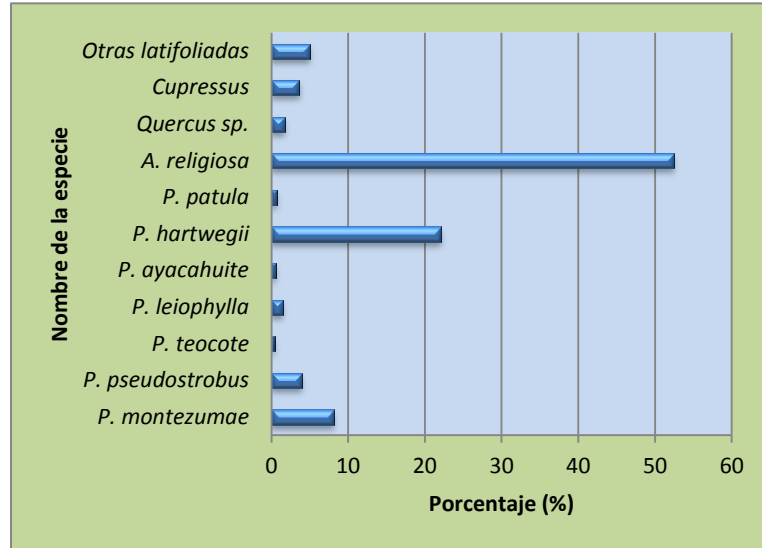


Figura 9. Proporción de las existencias reales totales por especie.

El 73 % de las ERT se distribuye en los seis Núcleos Agrarios con PMFM y cabe mencionar que la superficie forestal que conforman es representativa para la Región Forestal III del Estado de México integrada por 26 municipios, ya que su territorio corresponde al 38.36 % del total de ésta Región.

De estos Núcleos Agrarios, sobresale el volumen de Tlalmanalco, San Martín Cuautlalpan y Amecameca con el 32.19 %, 21.79 % y 20.31 % del total respectivamente. En menor proporción están las ERT de Ozumba (11.86 %) y Ecatzingo (10.91 %), siendo Tecomaxusco el de menor volumen con el 2.93 % (Cuadro 9). La proporción que tiene cada Núcleo Agrario respecto a las ERT se muestra en la Figura 10.

Cuadro 9. Existencias reales totales por Núcleo Agrario

No.	Núcleo Agrario	Superficie Forestal (ha)	Ecuaciones SEDEMEX VTA (m³)	Coefficiente mórfo VTA(m³)
1	Amecameca	3,323.808	583,898.54	1,008,104.57
2	Ecatzingo	1,402.759	328,893.44	516,690.43
3	Ozumba	978.045	353,428.37	568,402.61
4	San Martín Cuautlalpan	3,572.493	674,908.24	1,002,128.63
5	Tecomaxusco	328.827	92,194.63	132,778.70
6	Tlalmanalco	*8,205.045	933,202.65	1,584,616.61
	Total	17,810.98	2,966,525.87	4,812,721.56

*La estimación es solo para una superficie de 5,262.45 ha que se alcanza a cubrir con los datos del inventario para la elaboración del PMFM.

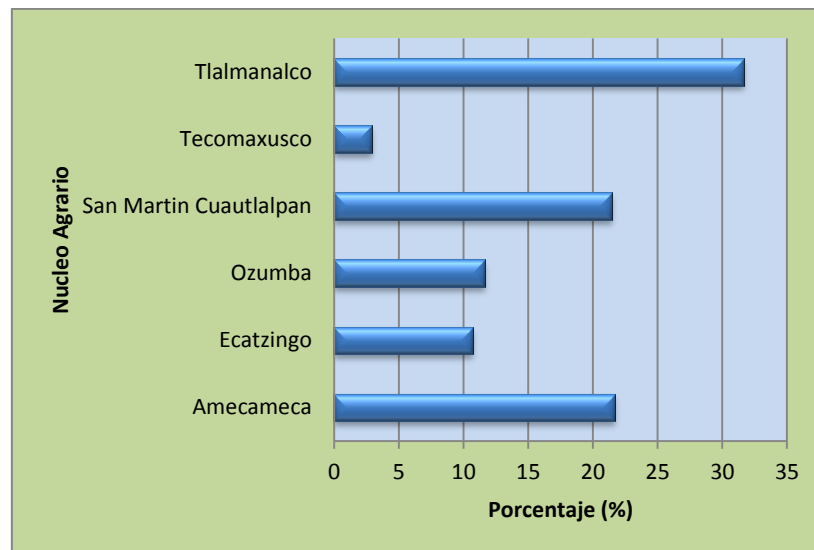


Figura 10. Proporción de las existencias reales totales por Núcleo Agrario.

7.2. Existencias reales totales por municipio

Los resultados de ERT por municipio son discrepantes en comparación con los que reporta PROBOSQUE (2010), aunque no se muestra un comportamiento general en cuanto a las diferencias, ya que ello depende de las especies.

La especie con mayor volumen por hectárea es *A. religiosa*, con promedios de 119.81 m³/ha en Chalco hasta 247.63 m³/ha en el Municipio de Atlautla. Estos valores superan el reporte del IFEM ya que el rango es de 69.91 a 122.84 m³/ha (Cuadro 10).

Cuadro 10. Existencias reales totales (m³/ha) por Municipio.

Municipios	Estimación con datos de inventarios para PMFM y complementados con el IFEM 2010					Reporte del IFEM 2010				
	Pino 1	Pino 2	Oyamel	Encino	Latifoliadas	Pino 1	Pino 2	Oyamel	Encino	Latifoliadas
Amecameca	33.48	69.27	121.76	7.79	7.97	14.63	40.52	69.91	32.49	31.79
Ecatzingo	60.82	105.78	160.72	39.55	7.97	47.77	63.73	88.36	27.80	37.22
Atlautla	26.34	54.10	247.63	1.70	3.07	57.61	84.21	122.84	37.18	73.32
Chalco	75.92	55.32	119.81	3.63	39.57	8.38	74.45	84.70	25.58	15.07
Tlalmanalco	38.02	103.73	166.45	7.07	29.45	6.04	83.65	77.60	43.42	30.55

Pino 1: *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. ayacahuite* y *P. patula*.

Pino 2: *P. leiophylla* y *P. hartwegii*.

En todos los Municipios las ERT de *A. religiosa* resultaron ser mayor respecto a las que reporta el IFEM, lo mismo ocurre con las diferentes especies de pinos en los municipios de Amecameca, Ecatzingo y Tlalmanalco. El comportamiento difiere para el caso de encino, ya que en cuatro municipios las estimaciones están por debajo de los datos del IFEM. Respecto a otras latifoliadas, únicamente en el municipio de Chalco las ERT son 62 % superiores (Figura 11).

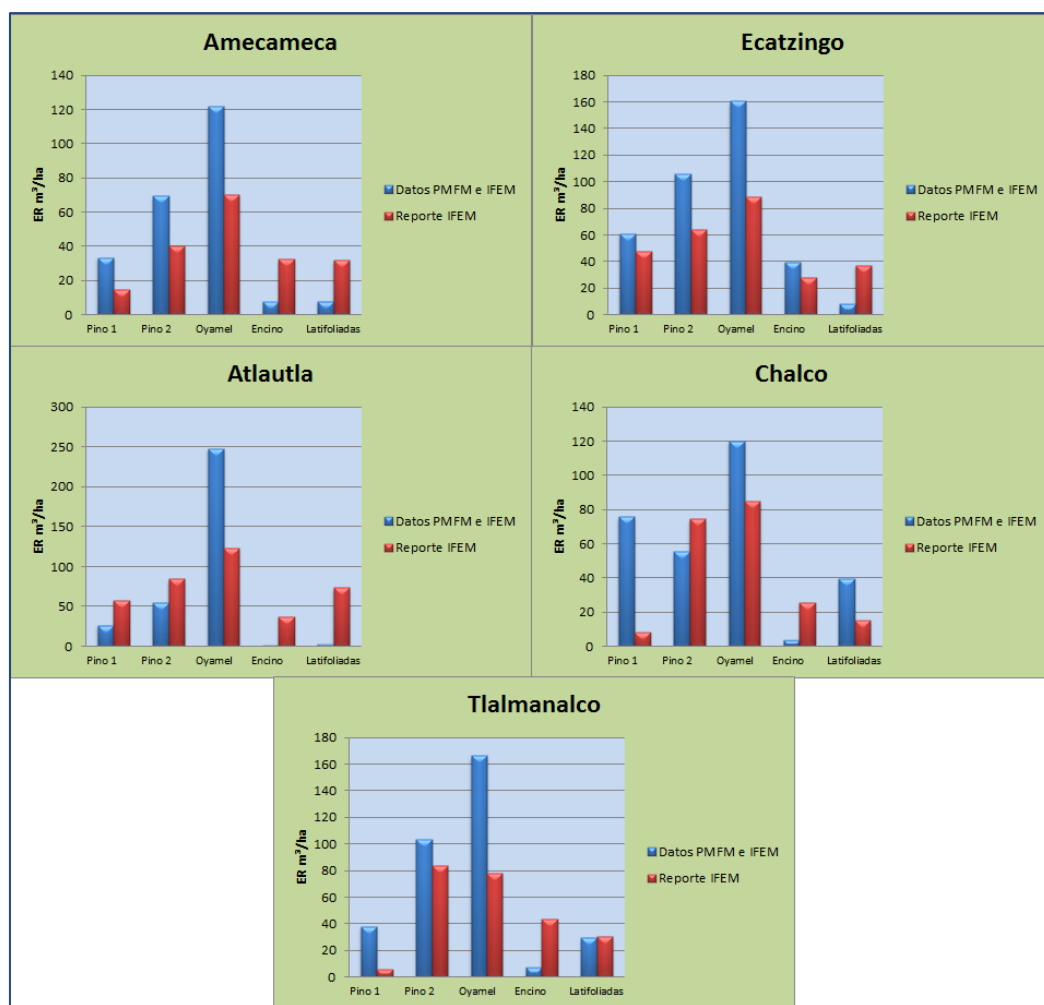


Figura 11. Existencias reales totales (m³/ha) por municipio

Respecto a estas discrepancias es conveniente hacer hincapié en cuanto a las diferencias en la proporción de muestreo de cada inventario y el patrón de distribución de la muestra en el terreno, tomando en cuenta que el realizado con fines de la elaboración de los PMFM es considerablemente mayor en comparación al que se llevo a cabo para el IFEM, dados sus objetivos correspondientes.

Además del enfoque de los inventarios, ya que para fines del PMFM existe un interés prioritario en las especies con valor comercial maderable por lo que no se cuantifican todas las especies de latifoliadas y por el contrario en el IFEM se reportan para el área de estudio un mayor número de estas especies.

7.3. Carbono almacenado en la biomasa aérea

La superficie forestal dentro de la zona de estudio es de 38 545.30 ha y de acuerdo con los resultados obtenidos, el contenido total de carbono en la biomasa aérea (CBA) corresponde a 872 750.36 tC, es decir que en promedio existen 22.64 tC/ha.

Del total de CBA el 69.62 % se compone por las especies forestales *A. religiosa* y *P. hartwegii*. El contenido total de carbono almacenado para cada una de las especies se muestra en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Carbono almacenado en la biomasa aérea por especie para la superficie forestal total.

No.	Nombre de la especie	Carbono almacenado en la biomasa aérea (tC)
1	<i>P. montezumae</i>	74,425.40
2	<i>P. pseudostrobus</i>	43,277.55
3	<i>P. teocote</i>	3,675.76
4	<i>P. leiophylla</i>	14,183.26
5	<i>P. ayacahuite</i>	4,241.97
6	<i>P. hartwegii</i>	222,311.76
7	<i>P. patula</i>	6,776.63
8	<i>A. religiosa</i>	385,263.53
9	<i>Quercus spp.</i>	26,670.10
10	<i>Cupressus</i>	32,132.71
11	Otras latifoliadas	59,791.70
Total		872,750.36

La especie *P. montezumae* contribuye con el 8.53 % del carbono total, el grupo de latifoliadas con el 6.58 % y en porcentaje similar están en conjunto *Quercus spp.* y *Cupressus spp.* (Figura 12).

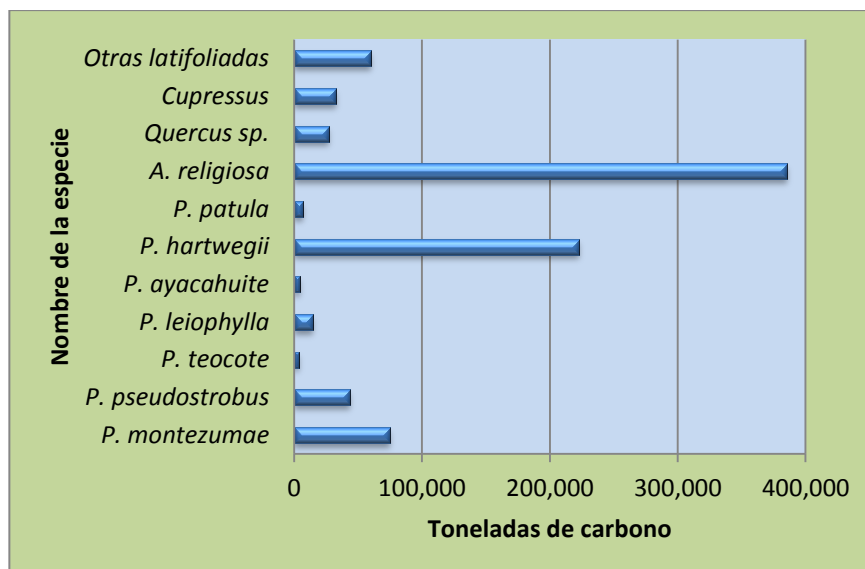


Figura 12. Distribución por especie del carbono almacenado.

La aptitud de fijación de carbono varía dependiendo del tipo de bosque y su condición, lo cual se puede representar conforme a las estimaciones de densidad de carbono en cada uno de los Núcleos Agrarios (Figura 13).

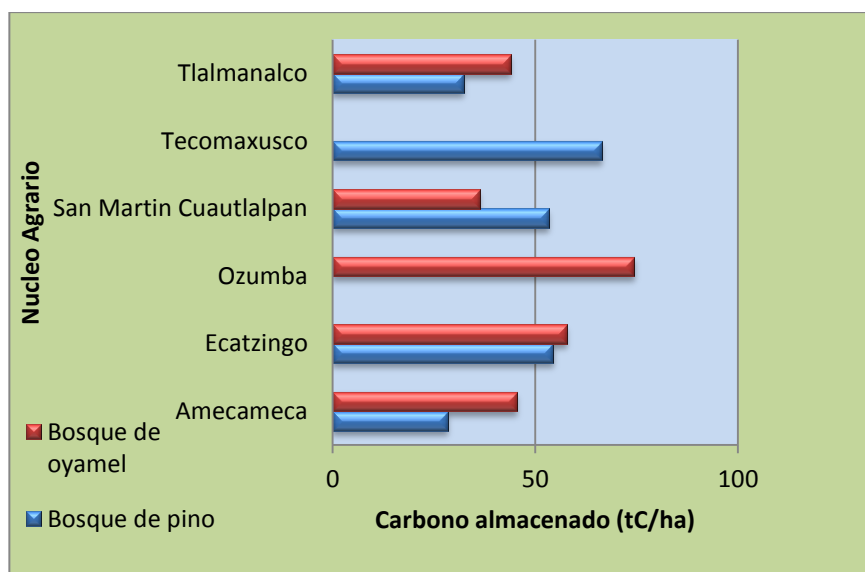


Figura 13. Toneladas de carbono almacenado por hectárea en la superficie forestal de los Núcleos Agrarios.

El bosque de oyamel resultó tener el valor mas alto de carbono almacenado, en un rango de 36.29 tC/ha para el caso de San Martín Cuautlapan hasta 74.35 tC/ha en Ozumba. Amecameca y Tlalmanalco tienen similares condiciones con 45.34 y 43.87 tC/ha y en un nivel intermedio se encuentra San Pedro Ecatzingo con 57.78 tC/ha. El máximo contenido de carbono es comparable con la media nacional de los Bosques Andino Patagónicos de la Argentina que de acuerdo con Gasparri y Manghi (2004) es de 72.16 tC/ha, sin embargo estos bosques alcanzan hasta 270.10 tC/ha.

Respecto al bosque de pino la densidad de carbono fue de 28.29 tC/ha para Amecameca llegando hasta 66.39 tC/ha en Tecomaxusco. El resultado es similar para San Martín Cuautlapan y Ecatzingo con 53.23 y 54.37 tC/ha respectivamente. Esto es comparable con los resultados que mencionan Hunt et al. (2010), de 11 a 74 tC/ha para bosques de coníferas al Norte de Ontario, Canadá.

En el caso del Ejido Tlalmanalco la estimación fue de 32.26 tC/ha, mostrándose mayor respecto al que reportan García y Sánchez (2009) para el mismo Ejido, con 20.87 tC/ha en promedio para el bosque de pino.

Aunque el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de los bosques depende de todos los factores biofísicos de cada sitio en particular, estos resultados se pueden comparar con los obtenidos por FAO (2000) en donde se refiere que los bosques secundarios muestran niveles de almacenamiento de carbono de 50 a 60 tC/ha.

Por otra parte estas estimaciones resultan ser considerablemente menores respecto a las estimaciones de Tapia (2006) en el Ejido de San Pedro Jacuaro, Ciudad Hidalgo Michoacan donde reporta en promedio de 103.1 a 129.1 tC/ha en bosques de coníferas con las especies: *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, *P. michoacana*, *P. hartwegii* y *Abies religiosa*, así como bosques de encino, cabe señalar que estos bosques se encuentra en un clima templado subhúmedo con una precipitación de 1200 a 1500 mm/a.

7.4. Producción primaria neta de carbono y tasa de fijación de CO_{2eq}

El aprovechamiento maderable en los Núcleos Agrarios genera una variación del contenido de carbono durante el ciclo de corta. De manera general se aprecia un aumento al comparar el contenido de carbono al inicio y al final (Figura 14). Este incremento responde al hecho de que el índice de aprovechamiento es menor que el incremento corriente anual en volumen, acumulado para el periodo.

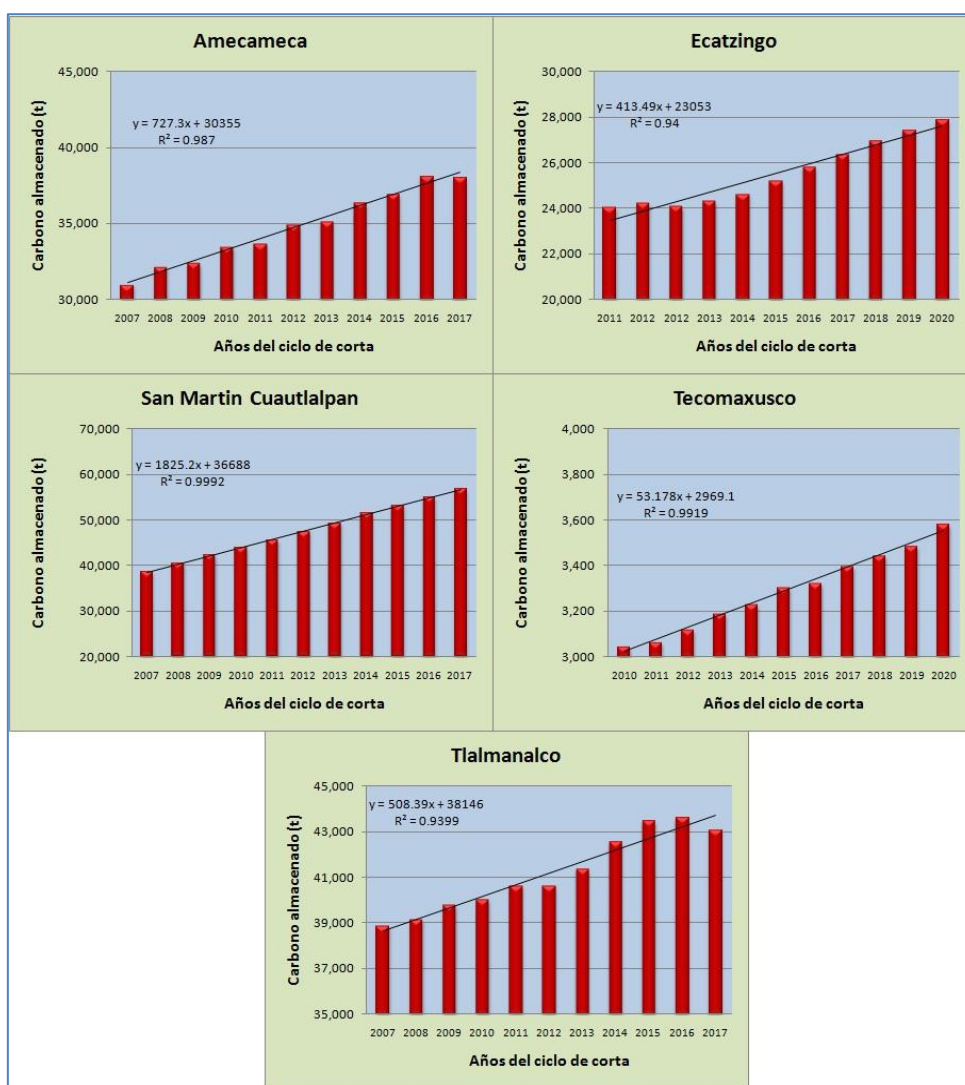


Figura 14. Distribución del contenido de carbono total en el ciclo de corta para pinos.

En el bosque de pino la tendencia creciente se acentúa en el Ejido San Martín Cuautlalpan, pues se presenta un incremento promedio de 1 815.28 tC, con una producción primaria neta (PPN) de 0.88 tC/ha/año, a penas por debajo de lo que reporta Moiseev y Filipchuck (2003) para los bosques boreales de Rusia con 1.08 tC/ha/año.

En los Bienes Comunales Ecatzingo se da un incremento total de 7.8 tC/ha al terminar el ciclo de corta, es decir una PPN de 0.78 tC/ha/año, la tendencia de crecimiento es más pronunciada a partir del cuarto año, ya que posterior a eso el aprovechamiento de madera disminuye y la tasa de acumulación continúa.

En el caso de Amecameca y Tlalmanalco el índice de corta es mayor respecto a los demás Núcleos Agrarios, por lo que la PPN se reduce a 0.33 y 0.16 tC/ha/año respectivamente, a pesar de ello el incremento total de contenido de carbono es en conjunto de 11 222.35 tC.

El potencial de fijación de CO_{2eq} para las especies de pinos oscila entre 0.58 y 3.23 tCO_{2eq} /ha/año lo que genera 12 350.11 tCO_{2eq} /año para toda la superficie constituida por los Núcleos Agrarios con PMFM. Esta cantidad de CO_{2eq} resulta ser suficiente para buscar la apertura de pago por servicios ambientales en la región, pues en México se tiene la experiencia de la venta de bonos de carbono en el mercado voluntario para 10 comunidades del Estado de Oaxaca que en el año 2010 vendieron 16,665.00 tCO_{2eq}, como resultado de reforestaciones (SAO, 2012).

Cuadro 12. Incrementos de carbono y tasa de fijación de CO_{2eq} para pinos

Núcleo Agrario	Superficie (ha)	Ciclo de corta	Carbono almacenado (tC)	Carbono almacenado (tC/ha)	Incremento de CBA en el ciclo de corta		Incremento promedio de CBA (PPN) tC/ha/año	Potencial de fijación de CO _{2eq} tC/ha/año
					Total tC	Corriente tC/año		
Amecameca	2,123.21	2007	30,981.10	14.59	7,020.00	702.00	0.33	1.21
		2017	38,001.09	17.90				
Ecatzingo	486.20	2011	24,057.13	49.48	3,801.95	380.20	0.78	2.87

Núcleo Agrario	Superficie (ha)	Ciclo de corta	Carbono almacenado (tC)	Carbono almacenado (tC/ha)	Incremento de CBA en el ciclo de corta		Incremento promedio de CBA (PPN) tC/ha/año	Potencial de fijación de CO _{2eq} tC/ha/año
					Total tC	Corriente tC/año		
		2020	27,859.08	57.30				
San Martín Cuautlalpan	2,058.61	2007	38,625.22	18.76	18,118.26	1,815.28	0.88	3.23
		2017	56,777.98	27.58				
Tecomaxusco	86.71	2010	3,042.84	35.09	539.55	53.95	0.62	2.28
		2020	3,582.39	41.31				
Tlalmanalco	2,656.54	2007	38,874.62	14.63	4,202.35	420.24	0.16	0.58
		2017	43,076.98	16.22				

Estos datos evidencian aprovechamientos maderables sustentables, con tendencias de crecimiento de carbono atmosférico secuestrado, promovido por el cultivo de los bosques.

La especie *A. religiosa* tiene mayores incrementos de carbono respecto al genero *Pinus*, debido a que el incremento corriente anual es mayor y su índice de corta es menor. En todos los casos se genera un cambio positivo en el contenido de carbono al finalizar el ciclo de 10 años (Figura 15).

Para el Ejido San Martín Cuautlalpan el incremento total del ciclo de corta corresponde a 35 770.65 tC con una PPN de 1.73 tC/ha/año. También sobresale el incremento de Tlalmanalco con 18 825.22 tC y PPN de 0.70 tC/ha/año. Con un incremento similar se encuentra Amecameca con 16 555.67 tC y 0.78 tC/ha/año.

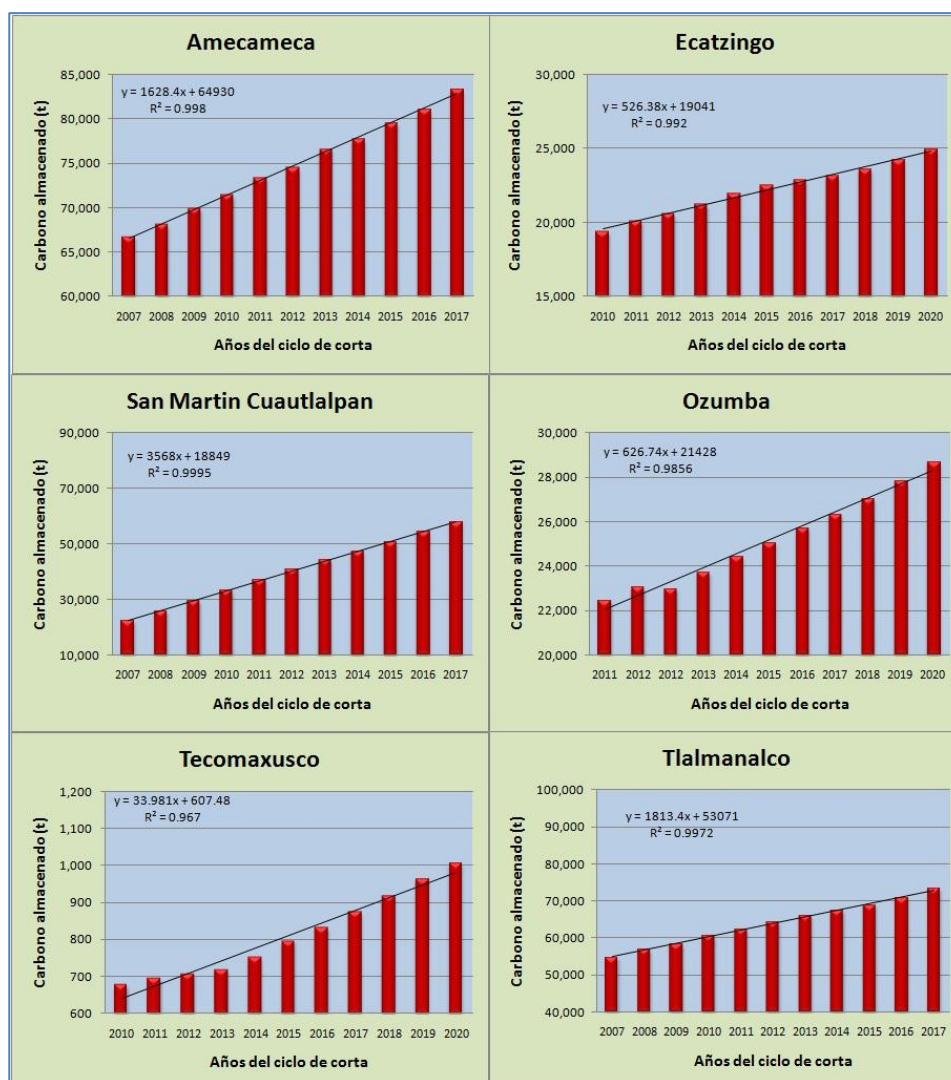


Figura 15. Distribución del contenido de carbono total en el ciclo de corta para *A. religiosa*.

Conforme a los incrementos en el carbono almacenado, en el Cuadro 13 se muestra la tasa de fijación de CO_2eq en cada Núcleo Agrario. El potencial de fijación está en un rango de 2.60 a 6.37 $\text{tCO}_2\text{eq/ha/año}$, esto origina un total de 30 516.16 tCO_2eq en promedio por año. Esta tasa de fijación es mayor respecto a la reportada por Tapia (2006) de 1.54 $\text{tCO}_2\text{eq/ha/año}$ para 1,842 hectáreas de bosque de coníferas en San Pedro Jacuaro, Ciudad Hidalgo, Michoacan.

Cuadro 13. Incrementos de carbono y tasa de fijación de CO_{2eq} para *A. religiosa*

Núcleo Agrario	Superficie (ha)	Ciclo de corta	Carbono almacenado (tC)	Carbono almacenado (tC/ha)	Incremento de CBA en el ciclo de corta		Incremento promedio de CBA (PPN) tC/ha/año	Potencial de fijación de CO _{2eq} tC/ha/año
					Total tC	Corriente tC/año		
Amecameca	2,123.21	2007	66,708.52	31.42	16,555.67	1,655.57	0.78	2.68
		2017	83,264.19	39.22				
Ecatzingo	410.02	2010	19,363.18	47.22	5,508.13	550.81	1.34	4.93
		2020	24,871.31	60.66				
Ozumba	863.06	2011	22,419.04	25.98	6,237.59	623.76	0.72	2.65
		2020	28,656.62	33.2				
San Martín Cuautlalpan	2,058.61	2007	22,242.49	10.8	35,770.65	3,577.07	1.73	6.37
		2017	58,013.14	28.18				
Tecomaxusco	23.17	2010	676.57	29.2	328.57	32.86	1.41	5.20
		2020	1,005.14	43.38				
Tlalmanalco	2,656.54	2007	54,625.94	20.56	18,825.22	1,882.52	0.70	2.60
		2017	73,451.16	27.65				

7.5. Valoración monetaria

7.5.1. Carbono almacenado

Considerando un valor de US\$ 34.77 como el precio de 1 m³ de productos secundarios, se obtuvo la cantidad mínima que los dueños del bosque recibirían en caso de un aprovechamiento del 100 %. El valor resultante para pinos va de US\$ 2 070.17 hasta US\$ 6 882.83/ha en el caso de pinos y de US\$ 1 977.58 hasta US\$ 8 643.63/ha para oyamel.

El valor mínimo por tonelada de carbono varía para cada Núcleo Agrario, pero en promedio para pinos resulta ser de US\$ 143.25/tC y de US\$ 183.05/tC para oyamel (Cuadro 14 y 15).

Cuadro 14. Valor monetario del carbono almacenado para pinos

Núcleo Agrario	Superficie (ha)	CBA (tC)	CBA (tC/ha)	Valor del bosque como productos secundarios *US\$/ha	Valor del carbono almacenado US\$/tC
Amecameca	2123.21	30981.10	14.59	2071.17	141.94
Ecatzingo	486.20	24057.13	49.48	6882.83	139.10
San Martín Cuautlalpan	2058.61	38855.22	18.87	2853.82	151.20
Tecomaxusco	86.71	3042.84	35.09	4881.27	139.10
Tlalmanalco	2656.54	38874.62	14.63	2120.40	144.90

*Equivalencia al 5 de julio de 2012 US\$1.00=\$12.94

Cuadro 15. Valor monetario del carbono almacenado para oyamel

Núcleo Agrario	Superficie (ha)	CBA (tC)	CBA (tC/ha)	Valor del bosque como productos secundarios US\$/ha	Valor del carbono almacenado US\$/tC
Amecameca	2123.21	66708.52	31.42	5750.60	183.02
Ecatzingo	410.02	19363.18	47.22	8643.63	183.05
Ozumba	863.06	22419.04	25.98	4754.45	183.00
San Martín Cuautlalpan	2058.61	22242.49	10.80	1977.58	183.11
Tecomaxusco	23.17	676.57	29.20	5344.56	183.03
Tlalmanalco	2656.54	54625.94	20.56	3763.63	183.06

7.5.2. Fijación de CO_{2eq}

En el servicio ambiental de fijación de carbono se valora la acción de remover partículas de CO₂ que se encuentran actualmente en la atmosfera. El valor monetario de fijación de CO_{2eq} va depender de la tasa de fijación de cada sitio y de acuerdo con ello la estimación por hectárea varia de US\$ 5.80 hasta US\$ 32.27 para las especies de pinos. En oyamel lo mínimo es US\$ 25.98 y alcanza hasta los US\$ 63.71 por hectárea (Cuadro 16 y 17).

Para la superficie total con PMFM se estima en promedio una fijación anual de 42 866.27 toneladas de CO_{2eq} tan solo para las especies del genero *Pinus* y la especie *A. religiosa*, con un valor de US\$ 428 662.72, tomando un precio de US\$ 10.00 por tonelada de CO_{2eq} conforme a la referencia de FAO (2004) para el caso de México.

Cuadro 16. Valoración monetaria de fijación de CO_{2eq} para pinos

Núcleo Agrario	Superficie (ha)	Incremento promedio de CBA tC/año	Potencial de fijación de CO _{2eq} tC/año	Potencial de fijación de CO _{2eq} tC/ha/año	*Valor en términos de mitigación de CO ₂ US\$/ha	Valor total en términos de mitigación de CO ₂ US\$
Amecameca	2,123.21	702.00	2,574.00	1.21	12.12	25,739.99
Ecatzingo	486.20	380.20	1,394.05	2.87	28.67	13,940.49
San Martín Cuautlalpan	2,058.61	1,811.83	6,643.36	3.23	32.27	66,433.63
Tecomaxusco	86.71	53.95	197.83	2.28	22.81	1,978.34
Tlalmanalco	2,656.54	420.24	1,540.86	0.58	5.80	15,408.63

Cuadro 17. Valoración monetaria de fijación de CO_{2eq} para oyamel

Núcleo Agrario	Superficie (ha)	Incremento promedio de CBA tC/año	Potencial de fijación de CO _{2eq} tC/año	Potencial de fijación de CO _{2eq} tC/ha/año	*Valor en términos de mitigación de CO ₂ US\$/ha	Valor total en términos de mitigación de CO ₂ US\$
Amecameca	2,123.21	1,655.57	6,070.42	2.86	28.59	60,704.23
Ecatzingo	410.02	550.81	2,019.64	4.93	49.26	20,196.37
Ozumba	863.06	623.76	2,287.12	2.65	26.50	22,871.20
San Martín Cuautlalpan	2,058.61	3,577.07	13,115.92	6.37	63.71	131,159.23
Tecomaxusco	23.17	32.86	120.49	5.20	52.00	1,204.87
Tlalmanalco	2,656.54	1,882.52	6,902.57	2.60	25.98	69,025.73

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se observa una discrepancia significativa entre los resultados de las ERT conforme a las estimaciones volumétricas de los dos métodos aplicados, por lo que se recomienda revisar las ecuaciones de volumen aplicadas en los PMFM y el Inventario Forestal del Estado de México 2010, esto mediante la calibración de las mismas y en caso de ser necesario generar otras para cada especie en la región.

La proporción de muestreo y el patrón de distribución de la muestra en el terreno al realizar los inventarios forestales, son factores que afectan la confiabilidad en las estimaciones de carbono, por lo que los datos de inventario con fines de elaboración de PMFM son más recomendados para dichas estimaciones en comparación con los del Inventario Nacional Forestal. Sin embargo se sugiere que en los inventarios forestales para la elaboración de PMFM se cuantifiquen mejor las especies de latifoliadas.

Se concluye que la estimación de almacenamiento y fijación de carbono en la biomasa aérea de los bosques se puede hacer utilizando datos de inventarios forestales, contribuyendo con el reto principal de monitoreo de REDD+, que consiste en cómo contabilizar la cantidad de carbono forestal, incluyendo las fluctuaciones en un periodo de tiempo determinado. No obstante, a las estimaciones de carbono atmosférico reportadas en el presente estudio habrá que adicionar carbono en raíces y en el suelo, para una estimación de carbono total en el bosque.

Para la determinación de la línea base de almacenamiento y fijación de carbono se requiere de información base desarrollada *ex profeso*: ecuaciones de volumen para las especies a estudiar, gravedad específica de la madera por especie y factores de expansión de biomasa.

Los resultados muestran que el manejo forestal instrumentado en la zona de estudio influye positivamente en el incremento de carbono en la biomasa aérea para los géneros *Abies* y *Pinus*. El balance entre los incrementos y el aprovechamiento resulta ser positivo, por lo que se puede considerar como un manejo sustentable y favorable para la fijación de CO_{2eq}.

9. BIBLIOGRAFÍA

CONANP. 2010. Dirección del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Disponible en <http://iztapopo.conanp.gob.mx/>. Consultada el 15/06/2011.

CNA. 1998. Cuencas hidrológicas. Escala 1:250,000. México.

CCMSS. 2009. “Retos y oportunidades del sector forestal ante el cambio climático”. Disponible en: www.ccmss.org.mx/modulos/biblioteca_consultar.php?folio=253. Consultado el 11/03/2011.

Díaz-Franco 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. México. 13 (1):25-34.

Domínguez-Cabrera, G., O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, R. Rodríguez-Laguna y J.A. Díaz-Balderas. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del Sur de Nuevo León. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 15 (1): 59-64.

Espejel D., S. 2007. La captura de carbono como servicio ambiental en la Comunidad Lobos y Pescaderos. Tesis de licenciatura. Ing. Forestal, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. 109 p.

FAO. 2000. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2000; evaluación de los productos forestales no madereros en América Central. Documento de trabajo 22. Roma, Italia.

FAO. 2004. Estudio de las tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Roma, Italia.

Figuerola-Navarro, C., J. D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Martínez, M. Acosta Mireles. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. Terra Latinoamericana 23: 57-64.

Fuentes S., M. 1998. Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol. IV (1):221-229.

García A., V. y Sánchez L., D. L. 2009. Estimación de carbono contenido en el bosque bajo manejo forestal del Ejido Tlalmanalco, Estado de México. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 133 p.

Gasparri, I. y E. Manghi. 2004. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las Regiones Forestales Argentinas. Dirección de Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal. Argentina. 26 pp.

Gay G. C. 2000. México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático. UNAM. Programa universitario del medio ambiente. UNAM-México.

Gayoso J., J. Guerra y D. Alarcón D. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Proyecto FONDEE Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 157p.

Goche-Télles, J.R., M. Fuentes-Salinas, A. M. Borja-De la Rosa y H. Ramírez-Maldonado. Variación de las propiedades físicas de la madera en un árbol de *Abies religiosa* y de *Pinus ayacahuite* var. *Veitchii*. Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 6(1):83-92

Gómez D., J.D. 2008. Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la Reserva de la Biosfera “Sierra de Huautla”, Morelos, México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México.

Hunt S. L., A. M. Gordon, D.M. Morris. 2010. Carbon stocks in managed conifer forests in northern Ontario, Canada. *Silva Fennica* 44(4): 563-582.

IPCC. 1992. El cambio climático global y el creciente desafío del mar. Cambridge, Reino Unido.

IPCC. 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel.

IPCC. 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. Pachauri, R. K., y A. Reisinger (eds). Ginebra, Suiza. 104 p.

INEGI. 2002a. Datos de Valor Agregado. Fisiografía. Provincias fisiográficas. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1'000,000. Serie I. Aguascalientes, México.

INEGI. 2002b. Datos de Valor Agregado. Fisiografía. Subprovincias fisiográficas. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1'000,000. Serie I. Aguascalientes, México.

INEGI. 2002c. Datos de Valor Agregado. Fisiografía. Sistema de Topoformas. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1'000,000. Serie I. Aguascalientes, México.

INEGI. 2002d. Datos de Valor Agregado. Geología. Minas y Otras Ubicaciones Geológicas. Conjunto de Datos Vectoriales Geológicos. Continuo Nacional. Escala 1:1'000,000. Aguascalientes, México.

IUSS. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

Jiménez C., C. R. 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. Texcoco, Estado de México.

Lazcano H., I. 2006. Estimación de secuestro de carbono para cuatro coníferas de la región de Chignahuapan, Puebla. Tesis Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 200 p.

Ludevid A., M. 1998. El cambio global en el medio ambiente. Ed. alfa omega. México. D.F.

Masera O., De Jong B. y Ricalde I. 2000. Consolidación de la oficina mexicana para la mitigación de gases de efecto invernadero. Instituto de Ecología Universidad Nacional Autónoma de México-ECOSUR. 197p.

Moiseev, N. B. and Filipchuk, A. N. Carbon balance in the Russian Forests. Proceedings of the XII World Forestry Congress, (21-28 de septiembre de 2003). Québec, Canadá: FAO. 0151-B1.

Montero, G., R. Ruiz-Peinado y M. Muñoz. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Revista de Investigaciones Agrarias (España). N° 13 1st ed. Madrid, España: Monografías INIA, 2005. 270 p. Forestales. n° 13.

PNUMA. 1999. Para comprender el cambio climático: guía elemental de la convención marco de las Naciones Unidas y el Protocolo de Kioto. Chatelaine Suiza.

PNUMA. 2008. Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 13° periodo de sesiones, celebrado en Bali del 3 al 15 de diciembre de 2007. FCCC/CP/200776/Add.1. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/2007/cop13/spa/06a01s.pdf>. Consultado el 15/11/2011.

PROBOSQUE. 2010. Inventario Forestal del Estado de México 2010.

Rojas-García, F. y L. Villers-Ruiz. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lind., del Volcán La Malinche. Madera y Bosques. 11 (1): 63-71.

Romahn D., C. F. y Ramírez M., H. 2006. Dendrometría. 2da Edición digital corregida y aumentada. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, Estado de México. 309 p.

SEMARNAT. 2010. Visión de México sobre REDD+; hacia una estrategia Nacional. LibroForestMRobles-Elvira-esp.indd. Jalisco, México.

SEMARNAT. 2007. *Coordinación del Programa de Cambio Climático*. II. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero México. Instituto Nacional de Ecología.

SAO. 2010. Mercado Voluntario. Disponible en: http://sao.org.mx/?page_id=51. Consultado el 9/03/2012.

Smith, B., W. Knorr, J.L. Widlowski, B. Pinty, N. Gobron. 2008. Combining remote sensing data with process modeling to monitor boreal conifer forest carbon balances. *For Ecol. Manag.* 255, 3985-3994

Tapia M., M. E. 2006. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el Ejido de San Pedro Jacuaro, Michoacán, México. Tesis de Maestría. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. 70 p.

Tinoco R., J.A. 2010. Ordenamiento agroforestal y evaluación de servicios ambientales: Estrategias para la mitigación y adaptación al cambio climático en el Sureste mexicano. Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 140 p.

Zamora-Campos, E. M., O. G. Vázquez-Cuecuecha, A. Pérez-Ahuatzi, R. Cano-Flores, A. Aparicio-Rentería y E. Fernández-Pedrasa. 2007. Variación natural de la densidad de la madera en *Pinus montezumae* Lamb., en tres altitudes del Parque nacional La Malinche, Tlaxcala, México. *Foresta Veracruzana*. 9 (002): 33-37.