



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE SUELOS



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

CARBONO ALMACENADO EN LA ESTACIÓN
EXPERIMENTAL "MARIO ÁVILA"
50 AÑOS DESPUÉS DE SU REFORESTACIÓN

TESIS
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE



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

PRESENTA:

ALBA GISSELA FAJARDO ORTÍZ

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO

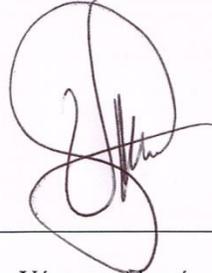
2013



CARBONO ALMACENADO EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL “MARIO AVILA” 50 AÑOS DESPUÉS DE SU REFORESTACIÓN

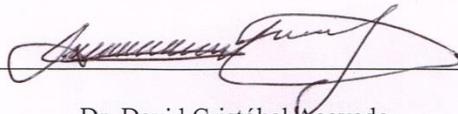
Tesis realizada por **Alba Gissela Fajardo Ortíz** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**



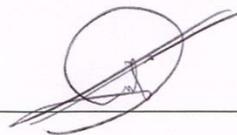
Director: _____

Dr. Antonio Vázquez Alarcón



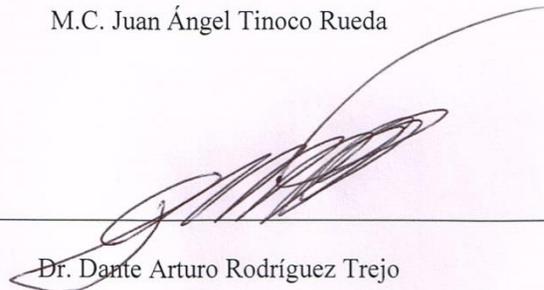
ASESOR: _____

Dr. David Cristóbal Acevedo



ASESOR: _____

M.C. Juan Ángel Tinoco Rueda



ASESOR: _____

Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen por la vida y por acompañarme en todo momento.

A todo el pueblo Mexicano porque gracias a ellos estoy cumpliendo un sueño.

A mis padres Dalia y Marcos, mis hermanos William, Pilar y Diego y mis sobrinos Valeria, Valentina, David y Ana Lucia, porque a pesar de la distancia me dan la fuerza para alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad de estudiar.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología CONACYT, por financiar mi educación.

Al Dr. Antonio Vázquez Alarcón, porque me brindó su apoyo en momentos difíciles y sus aportes profesionales contribuyeron enormemente a la construcción de este trabajo.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo, por su apoyo académico y logístico en estos años de estudio.

Al M. C. Juan Ángel Tinoco, por sus revisiones al trabajo las cuales me ayudaron a entender un área que no conocía.

Al Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo, por haberme permitido haber sido su alumna porque gracias a ello conocí su gran calidad humana y profesional.

A la Dra. María Edna Álvarez Sánchez, porque me llevo los mejores recuerdos y conocimientos de su clase y por su ayuda en los análisis de laboratorio de suelos.

Dr. Hugo Ramírez Maldonado, por su colaboración en el trabajo la cual me fue de gran ayuda.

Al Dr. Jorge D. Etchevers Barra y Dra. Claudia Hidalgo Moreno, por su confianza y por permitirme realizar el análisis de carbono en su laboratorio.

Al M.C. Edgar Arturo Sánchez Moreno subdirector de investigación de la DICIFO, por permitirnos desarrollar la investigación en la estación experimental, y prestarnos su apoyo.

Al Ing. Juan Ruperto Vergara Hernández encargado de la estación experimental, por su colaboración en la logística del trabajo de campo.

A la Bióloga Angélica Marín por su gran colaboración en el procesamiento y análisis de suelos

A la Ing. Kellys Nallith Salcedo Hurtado, porque sin su ayuda la historia habría sido diferente y por lo cual estoy inmensamente agradecida.

Al Ing. Ramón Hernández Correa, porque gracias a sus conocimientos forestales aportó en gran medida a este trabajo y por su puesto por su grandiosa compañía.

DATOS BIOGRÁFICOS

Alba Gissela Fajardo Ortíz nació en la ciudad de Bogotá D.C, hija de Marco Tulio Fajardo Beltrán y María Vidalia Ortíz Ariza y hermana de William Andrés, Dalia del Pilar y Diego Alejandro Fajardo Ortíz.

Gissela cursó sus estudios de primaria, bachillerato, preparatoria y licenciatura en la ciudad de Fusagasugá, Cundinamarca. Para obtener el grado de Ingeniera Agronómica de la Universidad de Cundinamarca, realizó su estancia y tesis profesional en el centro de investigación en palma de aceite CENIPALMA desde 2004 a 2005, realizando la determinación de la sintomatología de la enfermedad Marchitez Letal de la palma de aceite. Trabajo que fue expuesto en el congreso en la Asociación Colombiana de Fitopatología y Ciencias Afines-SACOLFI.

Como profesional continuó en el cultivo de palma de aceite en la empresa UNIPALMA S. A (2006) como ingeniero asistente, desarrollando trabajos de investigación en mejoramiento genético de esta planta. Gracias al apoyo de la empresa logró cursar en 2008 la especialización en Cultivos Perennes Industriales en la Universidad Nacional de Colombia.

Ese mismo año se vinculó con la empresa SAPUGA S. A, donde se encargó del departamento de sanidad vegetal, donde se enfrentó a varios retos dentro de ellos la conformación del comité de la sub-zona de Puerto Gaitán y su representación en el comité regional de la zona Oriental, gracias a la participación en este último participo en la unificación de criterios de la marchitez letal donde salió como resultado la publicación de la guía de bolsillo para el manejo de la Marchite Letal de la palma de aceite.

En 2011 inició sus estudios de posgrado en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México, al ser aceptada en el programa de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, los cuales culmina en el 2013.

CARBONO ALMACENADO EN LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL “MARIO AVILA” 50 AÑOS DESPUÉS DE SU REFORESTACIÓN

CARBON STOCK IN “MARIO AVILA” EXPERIMENTAL STATION AFTER 50 YEARS REVEGETATION

Alba Gissela Fajardo Ortiz¹, Antonio Vázquez Alarcón²

RESUMEN

En este trabajo se estimó la cantidad de carbono almacenado en la estación experimental “Mario Ávila” (EEMA), que se encuentra ubicado en el municipio de Texcoco. Cuenta con una extensión de 44 ha de las cuales 25 fueron reforestadas y 17 se establecieron como cortina rompe vientos en 1962. Las especies plantadas en el terreno fueron *Pinus montezumae*, *Pinus michoacana*, *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostris* F. v. M., *Eucalyptus resinifera* Sm., *Schinus molle* Lin. Para cumplir con el objetivo se realizó el inventario de carbono y se generó un modelo matemático para la biomasa arbórea. En el inventario se aplicó la metodología de Shclegel *et al.* (2001) donde analizó sotobosque, hojarasca y suelo. En la EEMA la vegetación se agrupó por densidad teniendo como resultado 6 áreas donde se distribuyeron 13 puntos de muestreo. El inventario arrojó que el árbol con mayor frecuencia fue *Eucalyptus* con un 96.31%, por esta razón se seleccionó para desarrollar su estimación de biomasa. Para hallar el contenido de carbono las muestras fueron analizadas en el equipo TOC 5050A. Para la ecuación alométrica se aplicó la metodología de Díaz-Franco *et al.* (2007), fueron seleccionados 10 árboles con características similares. Se encontró que el bosque en total almacena en promedio 76.87Mg C ha⁻¹, donde cada reservorio aporta: árboles 29,94%, hojarasca 2,73%, herbáceas 0,92% y suelo 66,41%. El modelo seleccionado fue el lineal con un coeficiente de determinación de 0.9894 y expresado con la ecuación $Y=8.4905x-37.471$, muestra una sobre estimación de 2.61%. El contenido de carbono en el árbol fue de 47.31%, analizando la proporción de carbono por componente se puede ver que de menor a mayor las hojas almacenan el 5.61%, las ramas el 0.75 y el fuste 83.65%.

Palabras clave: Eucalipto, ecuación alométrica, materia orgánica.

1. Tesista
2. Director

ABSTRACT

In this paper we estimated the amount of carbon stored in the experimental station "Mario Avila" (EEMA), which is located in the municipality of Texcoco. It has an area of 44 ha, of which 25 were reforested and 17 were established as windbreaks curtain in 1962. Species were planted in the ground *Pinus montezumae*, *Pinus Michoacan*, *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostris* F. v. M., *Eucalyptus resinifera* Sm., *Schinus molle* Lin. To meet the goal was made carbon inventory and generated a mathematical model for tree biomass. The inventory methodology applied Shclegel *et al.* (2001) where he analyzed understory, litter and soil. In EEMA grouped by the vegetation resulting density areas were distributed June 13 sampling points. Inventory found that most often the tree was an 96.31% *Eucalyptus*, was selected for this reason to develop its biomass estimation. To find the carbon content in the samples were analyzed TOC equipment 5050A. For allometric equation methodology was applied Díaz-Franco *et al.* (2007), 10 trees were selected with similar characteristics. It was found that the forest in total on average stores 76.87Mg C ha⁻¹, where each reservoir provides: trees 29.94%, 2.73% litter, herbaceous ground 0.92% and 66.41%. The model chosen was linear with a coefficient of determination of 0.9894 and expressed with the equation $y = 8.4905 x - 37471$, shows an overestimation of 2.61%. The carbon content in the tree was 47.31%, analyzing the carbon component proportion can be seen that lowest to highest stored sheets 5.61% branches on the shaft 0.75 and 83.65%.

Key words: Eucalyptus, allometric equation, organic matter.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo General	4
2.2 Objetivos Específicos.....	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1 Cambio climático	5
3.2 Dióxido de carbono	5
3.3 Ciclo del carbono	7
3.3.1 Ciclo del carbono en el suelo	9
3.3.2 La materia orgánica en el suelo.....	9
3.4 Efecto invernadero	11
3.5 Combustibles fósiles	13
3.6 Almacenamiento de carbono.....	14
3.7 Bosques y cambio climático.....	15
3.7.1 Captura de carbono por la vegetación.....	17
3.8 Mitigación	17
3.9 Ecuaciones alométricas	18
4. MATERIALES Y MÉTODOS	20
4.1 Localización	20
4.1.1 Suelos	21

4.1.2	Clima	22
4.1.3	Vegetación.....	22
4.2	Inventario de carbono almacenado en la EEMA.....	23
4.2.1	División de la EEMA en áreas	24
4.2.2	Selección de las áreas.....	24
4.3	Inventario de árboles	28
4.3.1	Medición de alturas	28
4.4	Medición del sotobosque.....	29
4.5	Muestreo del suelo	29
4.5.1	Análisis de las muestras de suelos	30
4.6	Determinación de carbono	30
4.7	Generación del modelo alométrico para la determinación de biomasa.....	32
4.7.1	Determinación de biomasa.....	34
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
5.1	Inventario de carbono.....	36
5.1.1	Biomasa aérea	36
5.1.2	Carbono aéreo	38
5.1.3	Sotobosque	40
5.1.4	Gramíneas y herbáceas.....	41
5.1.5	Hojarasca.....	42
5.1.6	Suelo.....	45

5.1.7 Carbono total del bosque.....	47
5.2 Evolución del suelo.....	49
5.3 Modelo matemático para la determinación de la biomasa.....	52
5.3.1 Modelo lineal.....	55
5.3.2 Modelo logarítmico.....	57
5.3.3 Modelo exponencial.....	59
5.4 Estimación de carbono.....	61
5.5 Comparación con otros modelos.....	62
6. CONCLUSIONES.....	67
7. LITERATURA CITADA.....	69

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Gases que predominan en la composición de la atmósfera terrestre seca, en porcentaje y en partes por millón por volumen (ppmv).....	6
Cuadro 2. Características de los principales gases de efecto invernadero, tomado de Goudie (1990).....	12
Cuadro 3. Promedio de los árboles encontrados en cada sub-zona.....	37
Cuadro 4. Individuos encontrados y porcentaje de participación en el inventario.	37
Cuadro 5. Diámetro a la altura del pecho (DAP) de las especies encontradas.	38
Cuadro 6. Altura de las especies encontradas.	38
Cuadro 7. Toneladas de carbono capturadas por los árboles.	39
Cuadro 8. Carbono almacenado en árboles en diferentes tipos de vegetación.	40
Cuadro 9. Biomasa y carbono almacenado en el componente gramíneas y herbáceas de las sub-zonas de la EEMA.	41
Cuadro 10. Contenido de carbono almacenado en herbáceas en diferentes tipos de vegetación.	42
Cuadro 11. Biomasa y carbono almacenado en el componente hojarasca de las sub-zonas de la EEMA.	43
Cuadro 12. Contenido de carbono almacenado diferentes tipos de vegetación.	44
Cuadro 13. Carbono orgánico del suelo total y en las dos profundidades muestreadas de las sub-zonas de la EEMA.....	46
Cuadro 14. Contenido de carbono orgánico del suelo almacenado en diferentes tipos de vegetación.	47
Cuadro 15. Carbono por reservorio y total (Mg C ha ⁻¹) de las sub-zonas de la EEMA.....	48
Cuadro 16. Características físicas y químicas de los suelos de la EEMA.	49
Cuadro 17. Características dasométricas de los árboles derribados para la generación del modelo.	52

Cuadro 18. Secciones de biomasa de cada componente del árbol en kilogramos.....	52
Cuadro 19. Índice de biomasa de los árboles para obtener el criterio de selección de los árboles, que consistió en el máximo y mínimo de los valores.	54
Cuadro 20. Árboles seleccionados para la construcción del modelo.	55
Cuadro 21. Categorías diamétricas de los árboles del inventario para introducir nuevos diámetros.....	55
Cuadro 22. Diámetros, biomasa calculada con el modelo lineal y en campo, y porcentaje de sobreestimación.....	56
Cuadro 23. Datos de diámetro, biomasa calculada por el primer modelo y en campo, logaritmo natural de DAP y la aplicación del modelo para todos los diámetros y porcentaje de sobreestimación.....	58
Cuadro 24. Datos de diámetro, biomasa calculada por el primer modelo y en campo y la aplicación del modelo para todos los diámetros y porcentaje de sobreestimación.	60
Cuadro 25. Porcentajes de carbono y desviación estándar para cada componente del árbol....	61
Cuadro 26. Resumen de los diferentes modelos encontrados con el coeficiente de determinación.....	62
Cuadro 27. Ecuaciones alométricas realizadas por diferentes autores para esta especie.	63
Cuadro 28. Resultados de los modelos incluyendo el de este trabajo.....	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo terrestre del carbono: el carbono del suelo y el carbono global disponible. Tomado de International Geosphere Biosphere Program (1998).	9
Figura 2. Localización de la estación experimental Mario Ávila.	21
Figura 3. Sub-zonas de la EEMA con la delimitación de áreas y puntos de muestreo.	25
Figura 4. Forma, ubicación y distribución de las parcelas para la toma de muestras y datos. Tomado de Shelegel <i>et al.</i> (2001).	26
Figura 5. (A) Equipo TOC 5050A, (B) peso de muestras; (C) crisol con muestra y (D) horno.	32
Figura 6. Metodología descrita por Díaz-Franco <i>et al.</i> (2007), para el fraccionamiento del árbol.	33
Figura 7. (A). Selección de árboles. (B). Toma del DAP. (C). Fraccionamiento del fuste. (D). Rodajas de fuste. (E) hojas, (F) ramas y (G) rodajas en micro túnel para secado.	35
Figura 8. Cambio de algunas propiedades del suelo en el periodo 1963-2012 en la EEMA. (A) pH, (B) % de MO, (C) nitrógeno total Nt %, (D) fósforo P (kg ha ⁻¹), (E) Da (g cm ⁻³).	51
Figura 9. Modelo lineal de biomasa y DAP de los diez árboles derribados.	54
Figura 10. Modelo lineal de los diámetros seleccionados con el índice de biomasa.	56
Figura 11. Modelo lineal con los DAP adicionales.	57
Figura 12. Modelo logarítmico con la ecuación inicial.	58
Figura 13. Modelo logarítmico aplicado a los datos del cuadro 23.	59
Figura 14. Gráfica inicial para determina los datos restantes del modelo.	60
Figura 15. Modelo exponencial con los todos los DAP.	61

1. INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono (CO₂) es considerado uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI) (Schneider, 1989; Houghton and Woodwell, 1989; Lashof and Ahuja, 1990) y su incremento de concentración en la atmósfera produce un aumento en la retención de la radiación emitida por la superficie terrestre, alterando el régimen térmico e induciendo el calentamiento global del planeta (Franco, 2009). Ese calentamiento influye en el sistema climático de la tierra y puede producir un cambio climático (Isaza *et al.*, 2007). Los efectos del cambio climático podrían tener serias implicaciones en el futuro para la agricultura, la forestaría y la pesca como resultado de alterar los ciclos biogeoquímicos y de la constante pérdida de la biodiversidad (Vitousek, 1994).

Para el año 2,000 se estimó que las emisiones mundiales de CO₂ fueron del orden de 23.5 Gt C causadas por el uso combustibles fósiles. Las principales regiones generadoras fueron: América del Norte, Europa y Asia meridional. Se prevé que para el año 2020 las cantidades oscilaran entre 29 y 44 Gt de CO₂ (de 8 a 12 Gt de C), y en el 2050 serán entre 23 y 84 Gt de CO₂ (de 6 a 23 Gt de C) (IPCC, 2005).

México produjo 643 millones de toneladas (Mt) de CO₂ en 2002. Aproximadamente 390 Mt CO₂ es decir, el 61% del total de las emisiones de carbono fueron generadas por la producción y consumo de energía a partir de combustibles fósiles, incluyendo las significativas emisiones producidas por las fugas (emisiones fugitivas, venteo y quema de gas) en la producción y transporte de petróleo y gas. Las restantes emisiones de carbono provinieron del cambio de uso del suelo y silvicultura (14%); residuos (10%); procesos industriales (8%); y agricultura y ganadería (7%) (Todd *et al.*, 2009).

Como se menciona el cambio de uso del suelo se encuentra como el segundo causante de las emisiones y dentro de este se nombra la deforestación donde anualmente se calcula que desaparecen 17 millones de hectáreas de bosque, lo que significa una liberación anual de cerca de 1.8 Gt de carbono; lo que representa el 20% de las emisiones antropogénicas totales (Montoya *et al.*, 1995; IPCC, 1996).

Una forma de almacenar y mantener el CO₂ que se está liberando, es por medio del proceso de la fotosíntesis gracias a la asimilación de dióxido de carbono atmosférico por parte de los árboles, por lo tanto es ideal incrementar los reservorios forestales, y se consigue restaurando las áreas degradadas por medio de plantaciones y/o regeneración natural (Montoya *et al.*, 1995).

Ordoñez y Masera (2001), consideran que para evaluar los procesos de captura-emisión se deben tomar en cuenta a cuatro reservorios de carbono (vegetación, materia en descomposición, suelos y productos forestales). El carbono en la vegetación es la suma del carbono contenido en la biomasa aérea (árboles, arbustos y hierbas) y el contenido de la biomasa de las raíces. El carbono en la materia orgánica en descomposición se refiere a la hojarasca y a otros materiales vegetales depositados en el suelo. El carbono del suelo es aquel que se ha venido acumulando en sus distintas capas como resultado del depósito de materiales orgánicos. El carbono de productos forestales es aquel que se encuentra almacenado en los bienes derivados de la explotación forestal (muebles, papel), y cuyo tiempo de vida dependerá del tiempo de vida del producto. El inventario total de carbono se expresa como la suma del carbono almacenado en los distintos reservorios (Franco, 2009).

Por esta razón es necesario continuar la evaluación del potencial de los bosques para almacenar carbono. Por lo tanto este trabajo se plantea como objetivo estimar el almacén de carbono en la estación experimental Mario Ávila (EEMA) a través del inventario y generación de un modelo matemático que permita estimar la biomasa del bosque y por lo tanto su capacidad de capturar carbono.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Estimar el almacén de carbono en la estación experimental Mario Ávila (EEMA) a través del inventario y generar un modelo matemático que permita cuantificar la biomasa del bosque y por lo tanto su capacidad de capturar carbono.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar la cantidad de carbono almacenado en árboles, sotobosque, hojarasca, materia muerta y suelo con base en la metodología de Schlegel *et al.* (2001) para cuantificar el almacén en los diferentes tipos de vegetación.

Generar un modelo matemático que permita estimar la biomasa de la principal especie arbórea presente en la estación experimental Mario Ávila (EEMA) y evaluar su capacidad de predicción al compararse con modelos publicados.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Cambio climático

La emisión masiva de gases de efecto invernadero (GEI) en el último siglo ha provocado el calentamiento del planeta afectando los procesos atmosféricos (IPCC, 2000).

El CO₂ es el gas que más contribuye al calentamiento global (Houghton and Woodwell, 1989; Schneider, 1989; Lashof and Ahuja, 1990; Ben *et al.*, 1995). Una forma de mitigar sus efectos es almacenarlo en la biomasa, previa captura mediante la fotosíntesis; y en el suelo, a través de la acumulación de materia orgánica (Ávila *et al.*, 2001).

3.2 Dióxido de carbono

El CO₂ es el gas invernadero más abundante en la atmósfera, su presencia en ella se debe a dos procesos, los naturales y los antrópicos. Como la vegetación contribuye de manera importante en la eliminación de CO₂ de la atmósfera, los procesos de deforestación reducen la eficacia del mecanismo y produce un incremento de su concentración. Como fruto de las actividades humanas, cada año ingresan a la atmósfera seis mil millones de toneladas de carbón, de estas tres cuartas partes se originan por la quema de combustibles fósiles y el resto se debe a la deforestación, a cambios en el uso de la tierra y a la producción de cemento (Isaza *et al.*, 2007).

Esta molécula dispara la acción del vapor del agua, debido a que el CO₂, absorbe la radiación, calienta la atmósfera un poco lo que incrementa la humedad produciendo un calentamiento adicional (Isaza *et al.*, 2007).

Además el CO₂ presenta una larga permanencia en la atmósfera ya que alrededor del 56% de todo el dióxido de carbono liberado por los humanos por el uso de combustibles fósiles, se encuentra presente, y que al parecer es el responsable directo o indirecto de gran parte del calentamiento global (Isaza *et al.*, 2007). Se considera que con el incremento de las emisiones de dióxido de carbono traerán como consecuencia la generación del cambio climático en la tierra, expresándose en un aumento de la temperatura que puede ir desde 1.2 °C hasta 5°C (Isaza *et al.*, 2007). La atmósfera está compuesta por gases (Cuadro1), donde principalmente la conforman en un 99.6%: nitrógeno, oxígeno y argón.

Cuadro1. Gases que predominan en la composición de la atmósfera terrestre seca, en porcentaje y en partes por millón por volumen (ppmv).

Gas	%	ppmv
Nitrógeno (N ₂)	78.08	780.84
Oxígeno (O ₂)	20.946	209.460
Argón (Ar)	0.9340	9.340
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.033	330
Neón (Ne)	1.82 x 10 ⁻³	18.2
Helio (He)	5.24 x 10 ⁻⁴	5.24
Metano (CH ₄)	1.745 x 10 ⁻⁴	1.745
Kriptón (Kr)	1.14 x 10 ⁻⁴	1.14
Hidrógeno (H ₂)	5.0 x 10 ⁻⁴	0.50
Vapor de agua	variable	Variable

Tomado de Isaza *et al.* (2007).

En la atmósfera están presentes los denominados gases de efecto invernadero, entre los que se destacan: H₂O (vapor de agua), CO₂ (dióxido de carbono), O₃ (ozono), CH₄

(metano), N_2O (óxido nitroso), N_2O (dióxido de nitrógeno), y los clorofluorocarbonos (CFC). Por las actividades humanas se ha cambiado la composición de la atmósfera terrestre, incrementando la presencia de gases invernadero (distintos al vapor de agua). Estos gases son poliatómicos, con un rico espectro vibracional y rotacional, capaces de absorber y emitir radiación en el espectro infrarrojo (centrado alrededor de los $10\ \mu\text{m}$). Su presencia en la atmósfera permite el intercambio continuo de energía entre la superficie de la tierra, la atmósfera y el espacio. Con el aumento del CO_2 en la atmósfera, el sistema aumenta la capacidad de emitir radiación de onda larga, lo que produce un enfriamiento de la atmósfera y a un calentamiento de la superficie terrestre. La superficie al calentarse emite de nuevo más radiación infrarroja a la atmósfera donde es absorbida fácilmente, teniendo como resultado mayor opacidad de la atmósfera al infrarrojo (IR) porque se incrementa la cantidad de gases de efecto invernadero, esta se hace más eficiente como radiador, por lo tanto se enfría (Isaza *et al.*, 2007).

3.3 Ciclo del carbono

Los organismos vivos para realizar sus funciones requieren de algunos nutrientes, ya que estos son elementos y moléculas pequeñas que constituyen todos los componentes básicos de la vida, existen macro y micro elementos, los primeros son requeridos en grandes cantidades, como por ejemplo el agua, oxígeno, nitrógeno, carbono, fosforo, azufre y calcio, y los micronutrientes son requeridos en menor proporción como el cinc, molibdeno, hierro, selenio y boro. En el caso de carbono, cabe resaltar que conforma el marco estructural de todas las moléculas orgánicas que son los componentes básicos de la vida. El carbono ingresa a los seres vivos cuando las

plantas, capturan de la atmosfera dióxido de carbono (CO_2) durante la fotosíntesis. Según Starr *et al.* (2004), también son llamadas productores primarios, por convertir la energía de la luz solar en energía química, la cual es usada para producir compuestos orgánicos a partir de materias primas inorgánicas. Además de las plantas existen otros consumidores de CO_2 que son las especies acuáticas, como algas y diatomeas, organismos que contribuyen con mayor cantidad de carbono que el almacenado en la atmosfera, los consumidores de CO_2 mencionados anteriormente regresan parte de carbono por medio de la respiración celular e incorporan el resto a su cuerpo. Estos organismos pueden ser consumidos por herbívoros que se apropian del carbono almacenado en sus tejidos y estos a su vez mueren y son descompuestos por organismos degradadores, que también generan respiración y que su presencia es abundante en la materia orgánica, regresan CO_2 a la atmosfera y a los océanos (Audesirk *et al.*, 2004).

Parte del ciclo del carbono tiene una etapa más lenta como lo es la producción de combustibles fósiles, ya que estos se forman a partir de los restos de las plantas y animales antiguos y constituyen la tercera reserva importante de carbono. Por efecto de temperaturas y presiones elevadas durante millones de años, las moléculas orgánicas se transformaron en petróleo, hulla o gas natural, por lo tanto cuando se quema combustible fósil se está liberando CO_2 a la atmosfera (Audesirk *et al.*, 2004). Este combustible fósil es un recurso no renovable y son la fuente preferida de energía de una gran proporción de la población que se encuentra por alrededor de los 6,200 millones de habitantes (Starr *et al.*, 2004).

3.3.1 Ciclo del carbono en el suelo

Para tener una mejor idea del papel del ciclo del carbono en el suelo, la Figura 1, muestra como este elemento presenta la mayor reserva en interacción con la atmósfera. En el suelo se estima un valor aproximado de 1,500 Pg C (1 Pg = 10^{15} g = Gt = 10^9 toneladas métricas) a un metro de profundidad mientras que a dos metros de profundidad, el valor estimado es de cerca de 2,456 Pg C. El carbono inorgánico representa cerca de 1,700 Pg C pero es capturado en formas más estables como el carbonato de calcio. La vegetación (650 Pg C) y la atmósfera (750 Pg C) almacenan considerablemente menos cantidades que los suelos. Los flujos entre el carbono orgánico del suelo o terrestre y la atmósfera son importantes y pueden ser positivos bajo la forma de captura o negativos como emisión de CO₂ (FAO, 2002).

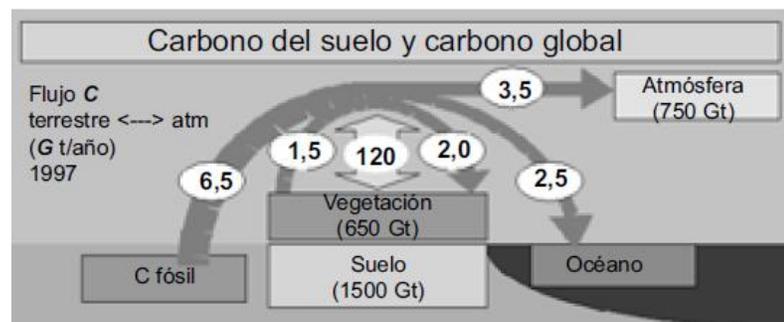


Figura 1. El ciclo terrestre del carbono: el carbono del suelo y el carbono global disponible. Tomado de International Geosphere Biosphere Program (1998).

3.3.2 La materia orgánica en el suelo

Los suelos contienen aproximadamente el doble de la cantidad de carbono que se encuentra en toda la vegetación del planeta. Por lo tanto, la materia orgánica del suelo (MOS) tiene un rol decisivo en el balance global del carbono, el cual es considerado el factor más influyente en el calentamiento global o efecto invernadero. Se origina a partir de los restos de las plantas, residuos de animales y excretas depositados sobre la

superficie, que luego son mezclados en forma variable con los componentes minerales (White, 2006).

La MOS es una fuente importante de nutrientes para las plantas. Cuando los microorganismos mineralizan la MOS, el CO₂ y nutrientes como el N, P, S y Ca son liberados. Además, la MOS incrementa la capacidad para absorber agua. También, mejora la estabilidad estructural del suelo, formando agregados con componentes minerales. Adicionalmente, estos contienen grupos funcionales como; reactivos carbonyl, carboxyl y grupos hydroxyl, que influyen la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC) (Zech *et al.*, 1997).

El contenido de la MOS puede ser afectada por varios factores (Wattel-Koekkoek, 2002) de los que nombran:

- El clima. La MOS aumenta con la precipitación y disminuye por el incremento de la temperatura.
- pH del suelo. En suelos ácidos la actividad microbiana disminuye, por lo tanto los contenidos de carbono se incrementan.
- Nivel de nutrientes. El fósforo y nitrógeno total del suelo muestran una correlación positiva con el carbono total almacenado.
- Disponibilidad de oxígeno. En un ambiente anaeróbico el carbono se acumula porque la mayor parte de los microorganismos necesitan oxígeno mientras descomponen la MOS.
- Cantidad y calidad de hojarasca. Componentes como los biopolímeros aromáticos y alifáticos son relativamente recalcitrantes con respecto a la

descomposición. La presencia de especies de plantas con altos contenidos de moléculas recalcitrantes pueden ocasionar un relativo alto contenido de MOS.

- Textura del suelo. En general, suelos con un alto contenido de arcilla presentan alto contenido de MOS. La arcilla puede ayudar a formar agregados en los que la MOS es protegida de la descomposición microbiana, debido a que ambos interaccionan químicamente para formar complejos estables.

3.4 Efecto invernadero

Isaza *et al.* (2007), nombran que el calentamiento de la tierra debido a actividades humanas se denomina como calentamiento global, este fenómeno es resultado de dos procesos:

1. Intensificación del efecto invernadero: con la revolución industrial en el siglo XVIII, las actividades humanas, que incluyen la industria, fábricas, vehículos, etc, han contribuido de manera dramática a incrementar la presencia de CO₂ y de otros gases en la atmósfera (Cuadro 2), provocando el efecto invernadero natural, generando el calentamiento global. Antes que se presentara esta revolución (que inicia en 1750), la economía dependía de la agricultura a pequeña escala y del comercio, pero con los avances tecnológicos trajo consigo la construcción de fábricas, la agricultura a gran escala que incrementaron la producción de gases invernadero como el dióxido de carbono y el metano.

2. Destrucción de la capa de ozono: la contaminación atmosférica originada en los aerosoles y otros contaminantes producidos en el proceso de industrialización afectan

destruictivamente la capa de ozono, que absorbe radiación ultravioleta proveniente del sol y crea condiciones adecuadas para la vida en la tierra.

El calentamiento global es un proceso gradual con graves consecuencias, como lo son: elevamiento de los niveles de los mares, daños en las cosechas, hambre, cambios en los regímenes de lluvia, cambios en las poblaciones de plantas y animales, efectos serios en la salud, y propagación de enfermedades infecciosas (Isaza *et al.*, 2007).

Cuadro 2. Características de los principales gases de efecto invernadero, tomado de Goudie (1990).

Gas	Fuentes antropogénicas	Concentración (ppb)*		Incremento anual de la	Tiempo de residencia
		Preindustrial	Actual		
CO ₂	Uso de combustibles fósiles y leña, deforestación	275.000	353.000	0.5%	50-200
CH ₄	Cultivo de arroz, ganado, tiraderos de basura uso de combustibles fósiles	800	1.720	0.9%	10
NO _x	Fertilizantes químicos, deforestación, uso de leña	285	310	0.2%	150-180
CFC	Aerosoles, refrigerantes, aislantes	0	3	5%	65-130

*Partes por billón.

Desde 1,800 se ha planteado que el anhídrido carbónico en la atmósfera deja pasar la energía del sol, compuesta fundamentalmente por radiación de onda corta; esta radiación, al remitirse en la superficie de la tierra, aumenta la longitud de onda; las moléculas de CO₂, al ser menos permeables a esta longitud de onda, vuelven a remitir la longitud de onda calórica al interior de la atmósfera y sólo un porcentaje se emite al espacio exterior, lo cual produce la elevación de la temperatura atmosférica, teoría que actualmente se mantiene (Isaza *et al.*, 2007).

Por lo tanto se puede decir que el efecto invernadero se origina por la presencia de gases invernadero en la atmósfera, ya que tienen la propiedad de adsorber radiación

térmica emitida por la superficie de la tierra. El nombre del efecto se debe a que el vidrio en un invernadero tiene propiedades similares a las de los gases invernadero, pues el absorbe radiación infrarroja pero es transparente a la radiación de la parte visible del espectro. Si la cantidad de gases se incrementa, probablemente por razones antropogénicas, el balance de la radiación incidente-saliente se altera y sólo restaura mediante un incremento de la temperatura superficial de la tierra (Isaza *et al.*, 2007).

En el periodo carbonífero, alrededor de 345 a 280 millones de años atrás, grandes cantidades de carbono quedaron aisladas de su ciclo debido a condiciones calurosas y húmedas correspondientes al periodo carbonífero, los restos de las plantas y los animales quedaron sepultados en los sedimentos y no se descompusieron. Por la acción de temperatura y presión se transformaron, esos residuos, en combustibles fósiles, como hulla, petróleo y gas natural. Pero con nuestra intervención y con el aumento de consumo de esta energía desde la revolución industrial la población empezó a depender de esta fuente de energía. Por lo tanto a partir de 1850 el contenido de CO₂ en la atmósfera se ha elevado de 280 partes por millón (ppm) a 370 ppm, que equivale a un incremento de más del 30%, es el mayor aumento en un periodo de 400 000 años. Se estima un crecimiento anual de aproximadamente 1.5 ppm anuales, y que como causa principal es la quema de combustibles fósiles (Audesirk *et al.*, 2004, Isaza *et al.*, 2007).

3.5 Combustibles fósiles

A escala mundial se registra que los Estados Unidos, con 4.5% de la población global, emite cerca de la cuarta parte de las emisiones mundiales de CO₂ (24%). Caso

contrastante frente a países altamente poblados como India que posee 17% y China el 21% de la población mundial y sus emisiones de CO₂ son del 4% y 13% respectivamente (Isaza *et al.*, 2007).

Las emisiones del sector petróleo y gas, que en 2006 alcanzaron 84 Mt CO₂ de acuerdo con el INEGI (2006), representan alrededor del 11.7% de las emisiones totales de México en ese mismo año. Para Generación desarrollar las actividades de mitigación en este subsector se contemplan acciones de eficiencia energética, reducción de emisiones fugitivas de metano y fomento de fuentes renovables de energía. Si se cumplieran los supuestos incluidos en la visión de largo plazo, las emisiones esperadas para los años 2020, 2030 y 2050, podrían ser de 73.2 Mt CO₂, 65.5 Mt CO₂ y 41.5 Mt CO₂, respectivamente (Poder Ejecutivo Federal, 2009).

3.6 Almacenamiento de carbono

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC, 1998) en el marco del Protocolo de Kyoto reconoce que las emisiones netas de carbono pueden ser reducidas ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases de invernadero o incrementando la tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros.

Los suelos agrícolas están entre los mayores depósitos de carbono del planeta y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO₂. Dentro del contexto del Protocolo de Kyoto y las subsiguientes discusiones de la Conferencia de las Partes (COP), hay un cierto número de características que hacen que el secuestro de carbono en las tierras agrícolas y

forestales pueda ofrecer posibilidades de estrategias atractivas de modo de mitigar el incremento en la atmósfera de las concentraciones de gases de invernadero (FAO, 2002).

3.7 Bosques y cambio climático

Por "cambio climático" se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1998).

Los ecosistemas forestales almacenan más del 80% del todo el carbono existente por encima de la superficie de la tierra y más del 70% del carbono orgánico del suelo. El intercambio anual de CO₂ entre bosques y la atmósfera por medio del proceso de fotosíntesis y de la respiración es de aproximadamente 7 veces las emisiones antropogénicas de carbono. Un incremento en la respiración de los suelos llevaría a un aumento de CO₂ de los ecosistemas forestales. Cuando un bosque o una selva se encuentran en estado de equilibrio, caso de la selva amazónica, su efecto sobre el nivel de CO₂ en la atmósfera es neutro porque durante el día adsorbe dióxido de carbono por medio de la fotosíntesis y lo expulsa en la noche. Las hojas y ramas que se desprenden emiten anhídrido carbónico a la atmósfera pero al nacer nuevas hojas y ramas absorben CO₂ (Isaza *et al.*, 2007).

En el tema del suelo, los ecosistemas forestales contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso de la tierra y sus suelos, que contienen cerca del 40 por ciento del total del carbono, son de importancia primaria cuando se

considera el manejo de los bosques. Por lo general, en los bosques naturales el carbono del suelo está en equilibrio, pero tan pronto como ocurre la deforestación, o la reforestación, ese equilibrio es afectado (FAO, 2002). Actualmente, se estima que cada año son deforestadas entre 15 y 17 millones de hectáreas, sobre todo en los trópicos (FAO, 1993) y que muy a menudo parte del carbono orgánico se pierde dando lugar a una considerable emisión de CO₂. Por lo tanto, donde la deforestación no puede ser detenida, es necesario un manejo correcto para minimizar las pérdidas de carbono. La reforestación, sobre todo en los suelos degradados con bajo contenido de materia orgánica, será una forma importante de secuestro de carbono a largo plazo, tanto en la biomasa como en el suelo (FAO, 2002).

Los bosques también afectan las emisiones netas de CO₂ a la atmósfera, al incrementar o disminuir la cantidad de carbono almacenado o al proporcionar biocombustibles para la generación de energía en sustitución de los combustibles fósiles, actualmente se estima que los bosques almacenan 1,146 Gt C, de las cuales 2/3 son de materia orgánica de los sustratos, por causa del cambio de uso de la tierra se estima que los bosques emiten a la atmósfera cerca de 0.9 Gt C/año, teniendo como causa principal la disminución de los bosques en los trópicos, los cuales presentan una deforestación de 20 millones de hectáreas por año, caso inverso ocurre en las altitudes altas debido a que presentan ganancias por los programas de reforestación que se iniciaron en el siglo XX (Isaza *et al.*, 2007).

3.7.1 Captura de carbono por la vegetación

Los bosques y selvas capturan, almacenan y liberan CO₂ como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y de degradación de la materia orgánica. Este servicio ambiental que proveen bosques o selvas como secuestradores de carbono (sumideros) permite equilibrar la concentración de este elemento (Torres y Guevara, 2005; Breymeyer *et al.*, 1996; Shaver and Aber, 1996). El sistema suelo-vegetación desempeña un papel importante en el aumento o en la reducción de las concentraciones de CO₂ dependiendo de la velocidad de formación y descomposición de la materia orgánica (Segura *et al.*, 2005). El suelo es el almacén de carbono más importante en los ecosistemas terrestres, en general, y forestales, en particular. La mayor concentración de este elemento se encuentra en las capas más superficiales del suelo.

3.8 Mitigación

La CMNUCC se adoptó durante La Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, en 1992, y entró en vigor el 21 de marzo de 1994. Dicha convención tuvo como objetivo estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, con el fin de no alcanzar niveles que impidan interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático.

Con el fin de reducir los costos que implica cumplir con estos compromisos, los países desarrollados del Protocolo de Kyoto pueden recurrir a mecanismos de desarrollo limpio MDL que son las siguientes opciones: I. Proyectos de energía renovable (hidroeléctricos, eólicos, biomasa, solares); II. Proyectos de eficiencia energética y

reingeniería de procesos (iluminación, potencia, ecotecnologías en vivienda, mejoramiento en plantas generadoras de energía, etc.); III. Proyectos de cambio de combustible (sustitución de gasolina por gas natural, uso de biocombustibles); IV. Proyectos de gestión de residuos (captura o uso de emisiones de metano en rellenos sanitarios y de estiércol en granjas pecuarias), y V. Proyectos forestales (captura de carbono por reforestación y forestación comercio de emisiones (SEMARNAT, 2001).

3.9 Ecuaciones alométricas

Las ecuaciones alométricas son, según Rüginitz *et al.* (2009), una herramienta matemática que permite conocer de forma simple, la cantidad de biomasa de un árbol por medio de la medición de otras variables y son generadas a partir de los análisis de regresión, donde se estudian las relaciones entre la masa (generalmente en peso seco) de los árboles y sus datos dimensionales (ejemplo: altura, diámetro) dependiendo del número de variables independientes (datos dimensionales) la ecuación puede ser una regresión lineal simple (única variable) ejemplo diámetro a la altura del pecho (DAP) o una regresión lineal múltiple (más de una variable, ejemplo DAP, altura total).

Dependiendo de las circunstancias las ecuaciones pueden ser lineales o no lineales. Las variables independientes más utilizadas son el DAP y la altura total. Algunas ecuaciones también consideran como variables independientes la altura comercial, volumen, densidad de la madera, entre otras. Las ecuaciones alométricas de acuerdo con Montero *et al.* (2005) sirven para el cálculo de la biomasa de una especie arbórea.

Existen dos métodos comúnmente usados para estimar la biomasa: el método directo y el indirecto. El primero es destructivo y consiste en cortar el árbol y determinar la

biomasa pesando directamente cada componente (Klinge *et al.*, 1983, Araujo *et al.*, 1999). Los indirectos se utilizan métodos de cubicación del árbol donde se suman los volúmenes de madera, se toman muestras de ésta y se pesan en el laboratorio para calcular los factores de conversión de volumen a peso seco, es decir, la gravedad o densidad específica (Segura, 1997). Otra forma de estimar la biomasa es mediante ecuaciones o modelos basados en análisis de regresión, que utilizan variables colectadas en el campo tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura comercial (hc) y total (ht), el área basal y la densidad específica de la madera (Jordan *et al.*, 1978; Saldarriaga *et al.*, 1988; Brown, 1997; Araujo *et al.*, 1999; Francis, 2000). Este método no es destructivo y es extrapolable a situaciones de crecimiento similares (Parresol, 1999).

Los modelos de biomasa han aumentado en los últimos años y posiblemente sean más los desarrollados para árboles individuales que para bosques (Segura, 1997; Acosta *et al.*, 2002; Dauber *et al.*, 2008) gracias a estos modelos matemáticos se facilita la toma de decisiones y permiten la estimación de biomasa y carbono a gran escala (Fonseca *et al.*, 2009).

Como se mencionó anteriormente las variables más utilizadas para la determinación de biomasa independientemente del método empleado (directo o indirecto), son la altura y el diámetro, pero en varias investigaciones el diámetro es la variable que mejor se correlaciona y predice la biomasa, además es fácil de medir y se registra en la mayoría de los inventarios forestales (Fonseca *et al.*, 2009).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización

El trabajo se realizó en la Estación Experimental Mario Ávila La Siberia (EEMA) perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, con una superficie de 44 hectáreas, de las cuales 25 fueron reforestadas. El bosque se encuentra localizado en el Estado de México, municipio de Texcoco en el poblado Huexotla a dos kilómetros en sentido oriente (Figura 2). Su ubicación geográfica está entre los paralelos 19° 27' 58'' a 19° 28' 27'' latitud norte y longitud 98° 51' 14'' a 98° 51' 45'' al oeste de Greenwich, con una altura sobre el nivel del mar que varía desde los 2,300 a 2,346, presenta una pendiente general de 6% hacia el norte y oeste. (Ávila, 1963; Reyes, 1972; Ramírez, 1977; Vera, 1981; Martínez, 2008).

La EEMA se encuentra en las estribaciones de la Sierra Nevada o Sierra de Río Frío, en límite oriental de la Cuenca del Valle de México. Las elevaciones importantes de este sistema orográfico son los cerros llamados Telapón, Tlaloc, Tecorral, Caída del Diablo, El Huxto, La Meza y Cocotl. La sierra Nevada, a su vez, forma parte del Eje Neovolcánico (Reyes, 1972; Ramírez, 1977).

El terreno presenta un escurrimiento natural hacia el norte y oeste, al oeste se unen el río San Bernardino y el arroyo Oipatitlan, los cuales desembocan en el lago de Texcoco (Ávila, 1963, Reyes, 1972).

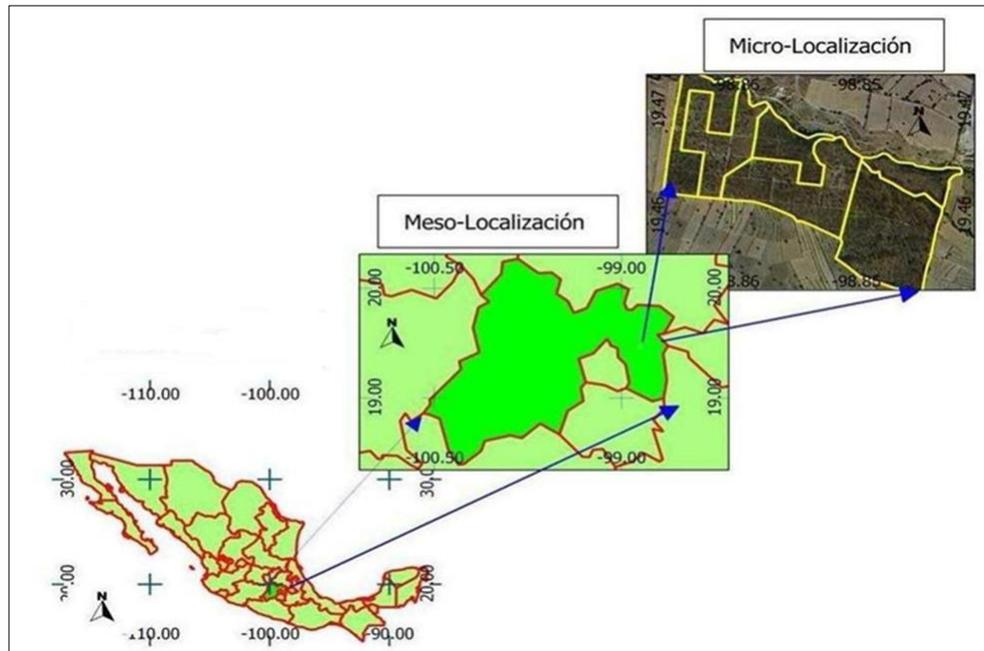


Figura 2. Localización de la estación experimental Mario Ávila.

4.1.1 Suelos

De acuerdo a la descripción general los suelos de la zona, pertenecen a la serie Coatlinchán, arena migajosa, somera. Suelos con estrato superficial que varía de 10 a 30 cm, color gris muy oscuro, textura arena migajosa. Debajo de él se encuentra un estrato cementado de color pálido, con costras blancas de 2 mm de espesor, que reaccionan fuertemente al ácido clorhídrico. Presentan baja capacidad de retención de humedad, medianamente ricos en materia orgánica, con grave peligro de erosión. Por su capacidad de uso se clasifican como Ve-1 lo cual señala que requieren prácticas de conservación intensas. Los suelos están formados por material cinerítico originado de las cenizas del volcán Tláloc que descansan sobre rocas metamórficas (Ávila, 1963).

4.1.2 Clima

El clima está clasificado como C (wo) (w) b (i'). Correspondiente a clima templado sub-húmedo, presenta una precipitación media anual de 700 mm, régimen de lluvias en verano, temperatura media del mes más frío varía entre los 5 y los 18°C y los meses más calurosos oscilan entre 20 y 24°C. (Ávila, 1963; Reyes, 1972; Cachón *et al.*, 1976; Martínez, 2008). La humedad atmosférica se encuentre entre los 50 a 60% (Martínez, 2008).

Se presentan vientos dominantes del Noreste y Sureste alternándose durante el año, los cuales alcanzan velocidades de 3.6 y 5.3 m/s, las máximas velocidades se manifiestan en los meses de febrero y marzo con 94 km/h (Reyes, 1972). La zona sufre heladas en los meses de octubre a febrero, ocasionalmente se registran granizadas de mayo a septiembre (Ramírez, 1977).

4.1.3 Vegetación

En la EEMA se pueden encontrar pastos, hierbas, arbustos y árboles, los últimos establecidos de forma dispersa y como vegetación de galería a lo largo de arroyos y barrancas. Los géneros que se encuentran son principalmente *Schinus* (Pirul), *Casuarina* (casuarina) y *Eucalyptus* (eucalipto) que son especies introducidas al lugar, esporádicamente se encuentran *Cupressus* (cedro blanco), *Quercus* (encino) y *Pinus* (pino), estos pertenecen a los relictos de la vegetación original. También se encuentran nopaleras conformadas por *Opuntia* sp, generalmente consideradas de baja calidad (Reyes, 1972).

Reyes (1972), reporta que parte de los terrenos se usaron inapropiadamente para la agricultura en cultivos de maíz criollo de temporal, asociado generalmente con frijol, haba y calabaza.

Por otra parte, Ramírez (1977) menciona que debido a la erosión que presentaban los terrenos perdieron toda su capa arable, por lo que se presenta un nuevo cambio de uso de la tierra lo que trae como consecuencia el incremento de deterioro.

Un aspecto importante a considerar en el área, es la reforestación realizada, ya que contribuyó de alguna manera en la recuperación del bosque. Esta inició en 1960 y finalizó en 1962 (Ramírez, 1977). La selección de especies se realizó en los viveros de Los Remedios, Coyoacán y Xochimilco (Ávila, 1963), las plantas seleccionadas fueron: *Pinus montezumae* Lamb, *Pinus michoacana* Martínez, *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostris* F. v. M, *Eucalyptus resinifera* Sm. y *Schinus molle* Lin.

En el área también se estableció una cortina protectora de 17 ha alrededor de la zona experimental, la especie más empelada fue *Eucalyptus* sp. (Ramírez, 1977).

4.2 Inventario de carbono almacenado en la EEMA

La estimación del almacenamiento de carbono se realizó utilizando la metodología propuesta por Schlegel *et al.* (2001), en su trabajo denominado Manual de Procedimientos para Inventarios de Carbono en Ecosistemas Forestales, la cual permitió contabilizar la cantidad de carbono capturado en la EEMA.

4.2.1 División de la EEMA en áreas

Para la clasificación de las áreas se utilizó una imagen satelital del sitio, que sirvió de apoyo para distinguir los diferentes grados de cobertura, el cual fue el primer criterio de agrupación que se complementó con el tipo de vegetación, biomasa aérea, textura, color del suelo y árboles en pie.

4.2.2 Selección de las áreas

Analizada la fotografía aérea se definieron 6 áreas con la ayuda del sistema de información geográfico Quantum GIS, con esta misma herramienta se establecieron los 13 puntos de muestreo para obtener una distribución al azar (Figura 3), por lo tanto estos puntos quedaron georeferenciados y con esta información se buscaron en el campo. Con el número de puntos para tomar la información se alcanzó el 1% que es un porcentaje utilizado en los inventarios forestales (Romahn *et al.*, 2006) Una vez determinadas las áreas y los puntos, se realizó el recorrido de campo para verificar que la información analizada correspondiera a la que se encontraba en la EEMA.

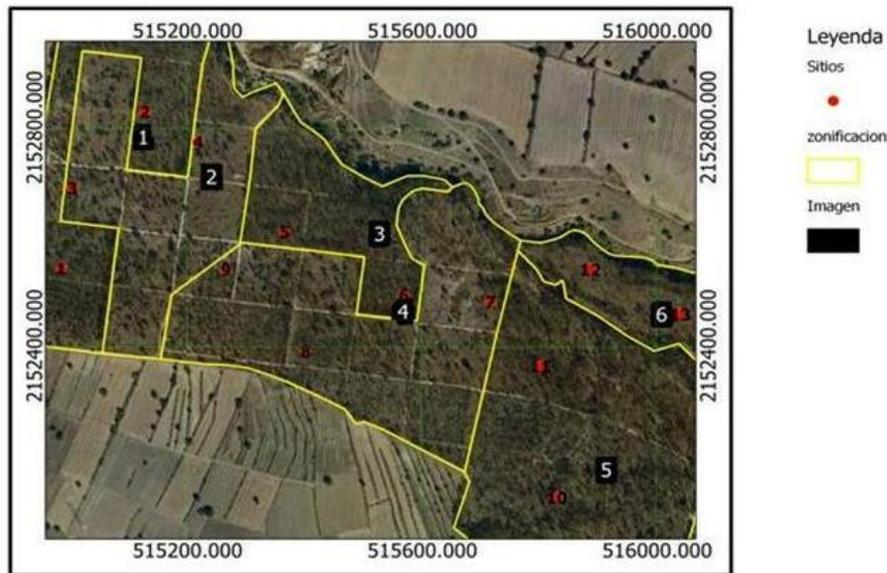
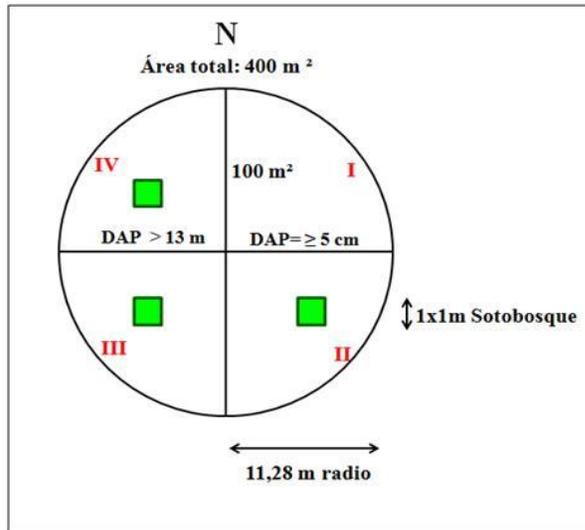
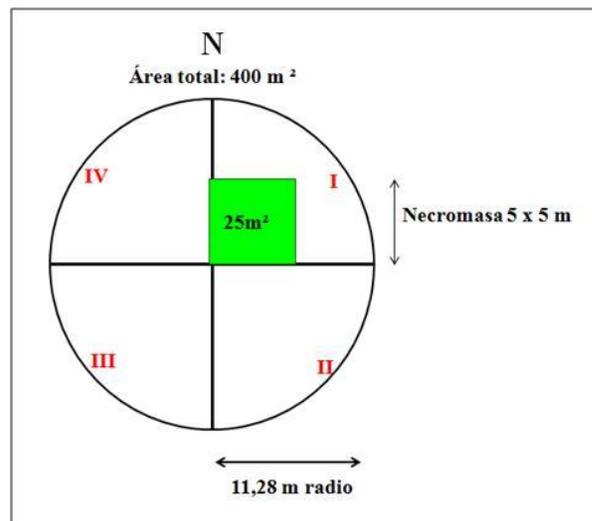


Figura 3. Sub-zonas de la EEMA con la delimitación de áreas y puntos de muestreo.

Dentro de los puntos de muestreo se encontraban diferentes tipos de depósitos de carbono como lo son; biomasa sobre el suelo (árboles y sotobosque), árboles muertos en pie y ramas caídas, hojarasca y suelo. Para estos reservorios la metodología planteó hacer parcelas de tipo circular ubicadas de acuerdo a los puntos cardinales y dividirlos en cuatro cuadrantes. De los cuatro cuadrantes tres se dedicaron a tomar muestras de hojarasca y sotobosque y corresponden a los numerados como II, III y IV, las dimensiones de ellos fueron de 1 m x 1m, en el cuadrante restante (I) se tomó muestras de necromasa, en esta la dimensión del Cuadro cambió a 5 m x 5m (Figura 4), el radio que se utilizó fue de 11,3 metros ya que se esperaba evaluar alrededor de 30 árboles.



(A) Las áreas verdes muestran los lugares para realizar la toma de muestras de hojarasca, gramíneas y herbáceas, correspondiente a los cuadrantes II, III y IV.



(B) El recuadro verde indica la zona donde se recolectó la necromasa, ubicado en el cuadrante I.

Figura 4. Forma, ubicación y distribución de las parcelas para la toma de muestras y datos. Tomado de Shclegel *et al.* (2001).

Para la determinación de la biomasa sobre el suelo en caso específico de los árboles, se procedió a medir aquellos que presentaban un diámetro a la altura del pecho (DAP)

superior a 10 cm en los cuadrantes II, III y IV. En el cuadrante I se midieron aquellos a partir de un DAP mayor o igual a 5 cm.

Antes de realizar el levantamiento de los puntos en la EEMA se hicieron tres pruebas preliminares, dos de ellas inicialmente en el arboretum de eucalipto ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo y la tercera en la EEMA. En ellas se realizó todo el levantamiento simulando la toma real de la información, con el fin de determinar las herramientas que facilitarían el trabajo de recolección de datos como la medición de alturas (en forma directa y estimada con instrumentos), muestras de hojarasca, gramíneas, herbáceas y arbustos.

En la medición de alturas se ensayaron dos métodos, el clinómetro y la tabla hipsométrica. Los dos arrojaron información similar, que fue comprobada con la medición de árboles que se pudieran medir con la cinta métrica. La selección de la herramienta se basó en el tiempo empleado para tomar este dato, que se consiguió con la tabla hipsométrica ya que nos permitía hacer mayor número de lecturas en un determinado tiempo.

Para la recolección de las muestras de hojarasca, gramíneas, arbustos y herbáceas, se ajustó de acuerdo a lo observado en el bosque, con esta observación se determinó la unión de muestras de gramíneas con herbáceas porque la presencia de las últimas era escasa. Con este ajuste se determinó recolectar muestras de: hojarasca, arbustos, gramíneas más herbáceas. Para el sub-muestro en el Cuadro de 1m x 1m, donde se recolectaron los reservorios anteriormente mencionados, se utilizó un cuadrado hecho de varilla con las dimensiones nombradas para agilizar la toma de las muestras.

Además se construyó el formato de campo para la toma de la información de DAP, altura y pesos frescos de las muestras.

4.3 Inventario de árboles

La instalación de los puntos se realizó como se mencionó anteriormente, con la ubicación norte sur y un radio de 11.3 m.

Dentro de cada parcela se realizó el inventario de los árboles que se encontraban dentro de cada cuadrante, para esto se realizó el siguiente procedimiento.

Se inició el conteo en el cuadrante I y se midieron todos los árboles que poseía un diámetro mayor o igual a 5 cm a la altura de pecho (DAP), que fue de 1.30 m. Para los restantes tres cuadrantes (II, III y IV), se tomaron en cuenta aquellos árboles con DAP mayor o igual a 10 cm. Para la toma del diámetro se utilizó la cinta métrica, por lo tanto el dato que se obtuvo fue perímetro, así que se realizó la conversión dando como resultado los siguientes perímetros: 16 y 31, 5 cm para los diámetros 5 y 10 cm respectivamente.

Se tomaron en cuenta los árboles muertos que aún estaban en pie, y aquellos que tenían más de la mitad del tronco dentro de la parcela.

4.3.1 Medición de alturas

Se realizó con la tabla hipsométrica. Como su nombre lo indica es una tabla de madera con diferentes categorías de altura que ayuda a estimar con precisión esta información.

Por lo tanto se inició seleccionando el rango de altura posible del árbol para hacer una

medición acertada. Posteriormente se requirió de la ubicación del operador a una distancia horizontal fija al árbol, una vez ubicado se realizaron dos mediciones al árbol, la primera la base y la segunda a la copa del árbol. Para tomar el dato la tabla debía estar alineada en su parte superior con la zona objetivo. Las dos lecturas fueron sumadas para obtener la altura total en metros.

4.4 Medición del sotobosque

Para el muestreo de sotobosque, se levantaron 3 sub-parcelas de 1 m² en los cuadrantes II, III y IV, se localizaron a una distancia de 7 m del centro de parcela de 400 m².

Una vez recolectadas las muestras de estos reservorios se registró su peso fresco en una balanza de 10 kg con una precisión de 25 g posteriormente fueron llevadas a la estufa del laboratorio de química del Departamento de Suelos para determinar su peso seco, este se obtuvo mediante la deshidratación de las muestras a una temperatura de 70°C por 24 horas.

4.5 Muestreo del suelo

Las muestras de suelo se recolectaron de los centros de los cuadros de 1m² en cada circunferencia. Como se mencionó anteriormente estos suelos son poco profundos por lo tanto se eligieron dos profundidades, la primera de 0-5 y la segunda de 5-15 cm. Posteriormente se mezclaron las tres muestras para obtener una muestra por cada punto de muestreo.

4.5.1 Análisis de las muestras de suelos

Para determinar el contenido de carbono por unidad de volumen de suelo, se requiere conocer su densidad aparente. Para determinar este valor se empleó en método de la parafina y se realizó para las dos profundidades de suelo.

Asteinza *et al.* (1997) realizaron un estudio acerca de los cambios físicos y químicos del suelo en la EEMA en tres periodos diferentes 1963, 1987 y 1997, donde analizaron propiedades como pH, nitrógeno total, fósforo, densidad aparente y materia orgánica. Para conocer la evolución del suelo 50 años después de su reforestación se decidió analizar las mismas características de suelo anteriormente nombradas.

El único dato que se obtuvo de manera indirecta fue la MOS. Se empleó el valor del carbono total y se aplicó la ecuación propuesta por Walkley and Black (1934):

$$\%M.O = (\%C) (1.724)$$

Donde:

%MO = porcentaje de MOS,

%C = porcentaje de carbono y

1.724 = constante

Calculados los valores se compararon con los establecidos en la norma NOM 021/00 (SEMARNAT, 2002) para determinar la evolución de los suelos de la EEMA.

4.6 Determinación de carbono

Para aumentar la precisión de la cantidad de carbono presente en los tejidos vegetales y en el suelo se decidió realizar la determinación por medio del método directo. Como

se tenían 13 puntos de muestro con tres tipos de muestras (hojarasca, gramíneas más herbáceas y suelos con dos profundidades) el número de muestras analizadas fue de 52. Para poder hacer el análisis fue necesario realizar diferentes tratamientos de molienda a las muestras con el fin de obtener una textura extrafina esto garantizó la obtención de buenos resultados. En las muestras de tejido vegetal, se inició con el molino de muestras gruesas del laboratorio de nutrición vegetal, ya trituradas se pasó al laboratorio de química para usar el molino de muestras finas con malla 60, con este procedimiento se obtuvo la textura que se requería en este tejido. Para el suelo, fue necesario dejar secar las muestras a temperatura ambiente por una semana, luego pasarlas por un tamiz malla 40 y finalmente macerarlas para que pasaran por un tamiz de malla 100.

Preparadas las muestras, acorde al tamaño deseado, se llevaron al Colegio de Posgraduados para ser analizadas en su contenido de carbono orgánico en el laboratorio de fertilidad de suelos con el equipo TOC- 5050A. La técnica consiste en hacer una curva de calibración empleando diferentes cantidades de sacarosa, donde es conocido su contenido de carbono (aproximadamente 41%). Una vez obtenida la curva se inicia con el proceso de pesado de las muestras. Para las de tejido vegetal se utilizaron alrededor de 30 mg y para el suelo cerca de 300 mg. Estas se colocaron en una copa de cuarzo llamada crisol y es llevada al equipo que posee un horno de combustión a 900°C (Figura 5), con una atmósfera de oxígeno de 99.9% de pureza, el carbono presente en las muestras es convertido a CO₂, todos los gases liberados pasan a una cámara con rayos infrarrojos que al cruzar por ella son detectadas y contabilizadas únicamente las partículas de CO₂. Los resultados se expresan en

porcentaje de carbono que está presente en la muestra (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009).

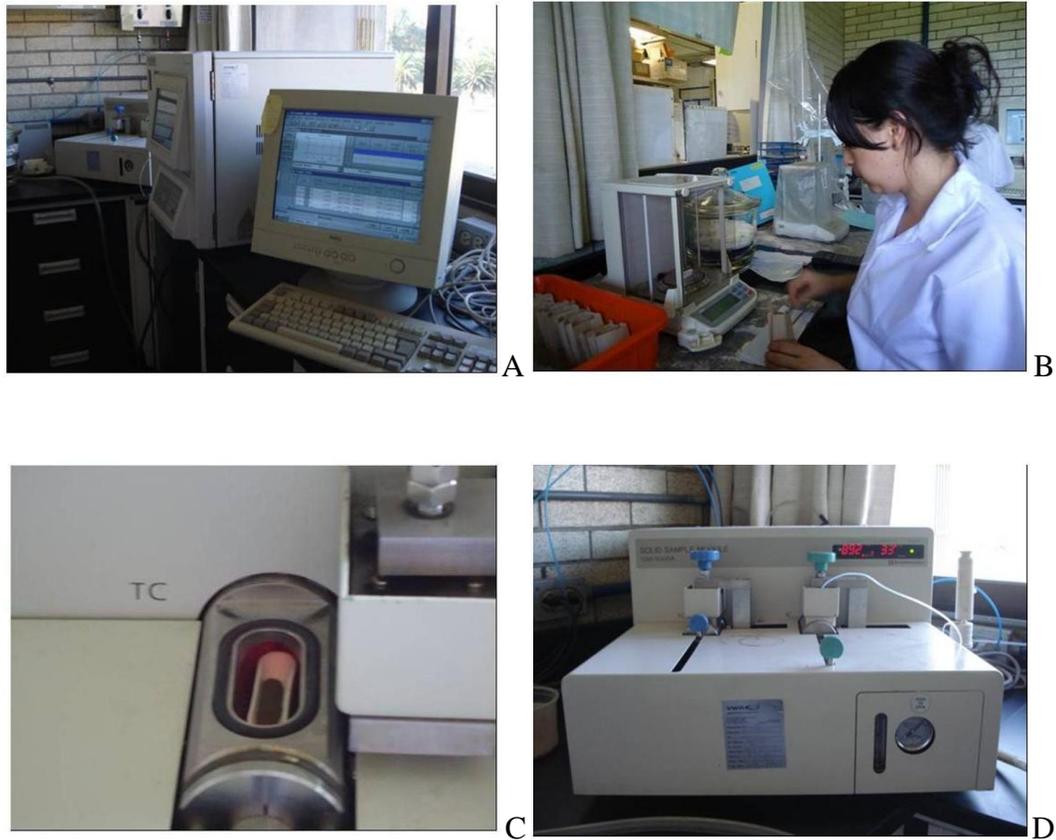


Figura 5. (A) Equipo TOC 5050A, (B) peso de muestras; (C) crisol con muestra y (D) horno.

4.7 Generación del modelo alométrico para la determinación de biomasa

Realizado el inventario de los árboles se encontró que la especie que se presentó con mayor frecuencia fue *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostris* F. v. M y *Eucalyptus resinifera* Sm. Por lo tanto, se realizó el modelo para este género. La selección de los árboles se realizó en las seis zonas que se emplearon en la medición de carbono. En total se tomaron 10 árboles distribuidos en las 6 zonas, se buscó que presentarían

características similares como; fuste recto, libre de plagas y que su diámetro se encontrara cerca del promedio general de alrededor de 16 cm.

Para tomar las muestras se tuvo en cuenta la metodología de Díaz-Franco *et al.* (2007) (Figura 6), que consistió en fraccionar el árbol en fuste, ramas y hojas. Para el fuste se hicieron trozas comerciales, las primeras de 2.55 y las segundas de 1.25 m, las tres fracciones se pesaron en campo utilizando para el fuste una balanza romana de 200 kg de capacidad con una precisión de 1 kg, y para las ramas y hojas una báscula de reloj de 10 kg con precisión de 25 g. Se tomaron muestras de cada una de las partes del árbol para determinaciones de biomasa y carbono total, en el fuste se tomó la parte ancha de cada troza con un espesor de 5 cm y para ramas y hojas se seleccionaron aproximadamente 200 g. Estas fueron igualmente pesadas en campo utilizando la báscula de 10 kg. Previo al derribo del árbol se midió el DAP, una vez derribado se midió la altura total del árbol.

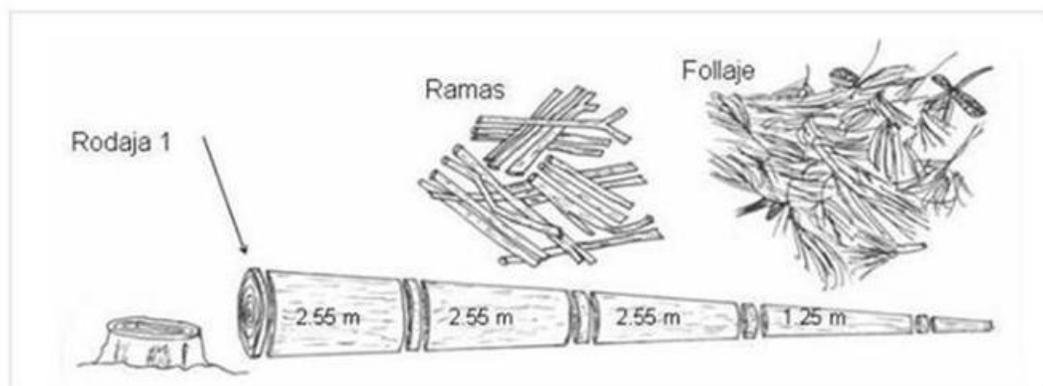


Figura 6. Metodología descrita por Díaz-Franco *et al.* (2007), para el fraccionamiento del árbol.

4.7.1 Determinación de biomasa

Una vez derribados los árboles se realizó el corte del fuste, ramas y hojas como se mencionó anteriormente (Figura 7). Las muestras de cada uno de ellos fueron pesadas y marcadas para llevarlos a las diferentes zonas de secado. En el caso del fuste, debido al tamaño de las rodas, no era posible inicialmente secarlas en la estufa del laboratorio de química del Departamento de Suelos por lo que fue necesario construir un micro túnel en el invernadero del mismo departamento (Figura 7), allí estuvieron cerca de dos semanas mientras perdían la mayor cantidad de humedad, luego se trasladaron a la estufa del laboratorio de química para terminar el secado, proceso que duro aproximadamente una semana. Las hojas y ramas se secaron en la estufa del mismo laboratorio a 70°C, por 24 h.

Finalizado el secado de las tres partes del árbol, se agruparon de acuerdo a cada subzona de la EEMA. Obtenidas las 6 muestras de cada componente se inició el proceso de trituración, este fue el mismo descrito en el capítulo anterior, para ser llevadas al Colegio de Posgraduados para la determinación de carbono total.



Figura 7. (A). Selección de árboles. (B). Toma del DAP. (C). Fraccionamiento del fuste. (D). Rodajas de fuste. (E) hojas, (F) ramas y (G) rodajas en micro túnel para secado.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Inventario de carbono

5.1.1 Biomasa aérea

Realizado el levantamiento de los 13 puntos de muestreo en las 6 sub-zonas, se encontró un total de 244 árboles. En la circunferencia se esperaba que se evaluaran aproximadamente 30 árboles, por lo tanto el número total por sub-zona debería haber sido de alrededor 60 individuos (Cuadro 2), con excepción del área 4 que contó con 3 puntos de muestreo el número ascendería a 90, pero esto no ocurrió en ninguno de los casos, seguramente por el aprovechamiento de la madera que realizan los vecinos del bosque. En el momento del muestro se pensó en ampliar el radio de muestreo, pero esto no se hizo ya que no habría permitido realizar las comparaciones entre las diferentes sub-zonas.

Analizando cada sub-zona en número de árboles, densidad, DAP y altura (Cuadro 2), se observó que la zona 5 presentó la mayor densidad, diámetro y altura, esta zona no fue sembrada como ensayo en la reforestación si no como barrera rompe viento. La zona que menor cantidad de árboles presentó fue la zona 6 y por lo tanto la menor densidad, pero tiene el segundo mejor diámetro y altura, muy seguramente es el efecto de la baja densidad que le permitió a los árboles tener menor competencia y por ende una mejor captación de luz y nutrientes. Las cuatro zonas restantes muestran un comportamiento similar en las tres características. Considerando específicamente la densidad de árboles (Cuadro 3), el promedio general fue de 474 por ha.

Cuadro 3. Promedio de los árboles encontrados en cada sub-zona.

Sub-zona	No de árboles	Da árboles ha ⁻¹	DAP (cm)	Altura (m)
1	44	550	13.55	9.26
2	39	488	11.73	7.51
3	33	413	15.27	10.01
4	56	467	14.67	10.03
5	58	725	20.61	16.72
6	16	200	20.11	12.03
Promedio	41	474	15.99	10.93

Da= densidad arbórea.

En el inventario se encontraron cinco especies de árboles (Cuadro 4), casuarina, (*Casuarina* sp.), cupresus (*Cupressus* sp), eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostris* F. v. M, *Eucalyptus resinifera* Sm) y Pirul (*Schinus molle* Lin.). De ellas las que mayor representación tuvieron fueron las dos especies de eucalipto, con 96.31% y 235 árboles en conjunto, las tres especies restantes sumaron 4 %.

Cuadro 4. Individuos encontrados y porcentaje de participación en el inventario.

Especies	Individuos	%
Casuarina	2	0.82
Cupresus	2	0.82
Eucalipto	235	96.31
Pirul	5	2.05
Total	244	100.00

Las características dasométricas como DAP y altura se muestran en los cuadros 5 y 6 respectivamente, en donde se exponen los máximos, mínimos, promedio y desviación estándar de esas características. Para los DAP el eucalipto tiene los valores máximo y mínimo, y en altura también presenta el máximo, la altura mínima es similar en las cuatro especies. De acuerdo a esta información el eucalipto posee los árboles de mayor y menor DAP y mayor altura.

Cuadro 5. Diámetro a la altura del pecho (DAP) de las especies encontradas.

Especies	DAP (cm)			Desv. Est.
	Max	Min	Promedio	
Casuarina	25.15	19.10	22.12	4.28
Cupresus	23.24	12.73	17.98	7.43
Eucalipto	84.03	3.18	16.36	8.14
Pirul	12.73	9.55	11.01	1.38

Desv. Est= desviación estándar.

Cuadro 6. Altura de las especies encontradas.

Especies	Altura (m)			Desv.Est.
	Max	Min	Promedio	
Casuarina	8	7	7.50	0.71
Cupresus	6.5	5.5	6.00	0.71
Eucalipto	30	5.5	11.63	4.67
Pirul	4.5	4.5	4.50	0.00

Desv. Est= desviación estándar.

Como es evidente de las especies encontradas en el inventario las que muestran mayor frecuencia fueron *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostris* F. v. M. y *Eucalyptus resinifera*, por este motivo se decidió realizar el modelo matemático para estas dos especies.

5.1.2 Carbono aéreo

Como se mostró en el inventario de las especies encontradas, el género que se encontró en un 96.31% fue el *Eucalyptus*, por esta razón se decidió realizar la estimación principalmente para este árbol. Para realizar la determinación del carbono almacenado en este reservorio, y como se mencionó en el marco teórico, existen dos métodos el indirecto y el directo. Para el primer método se buscó en la literatura las ecuaciones disponibles y se encontraron 4 modelos, en el caso del segundo método, se desarrolló el muestreo destructivo para construir la ecuación, mediante el análisis de selección se encontró que el mejor fue el modelo lineal y su ecuación fue $y=8.4905x-$

37.471. Donde y = biomasa (kg) y x = DAP (cm). Más adelante se ampliará como fue la selección de esta ecuación matemática. Se aplicaron los modelos encontrados en la literatura como el desarrollado en este trabajo, el que mejor se ajustó a la biomasa encontrada en los árboles derribados fue el determinado en esta investigación. En el Cuadro 7 se muestran las toneladas de biomasa y carbono por hectárea almacenadas en cada sub-zona estudiada. El promedio de carbono retenido por los árboles fue de 21.91 Mg C ha⁻¹.

Como este valor está relacionado con la densidad de árboles en cada sub-zona y de acuerdo al inventario la sub-zona 5 presentó la mayor cantidad de árboles pues efectivamente presentó la mayor cantidad de biomasa, seguido de las sub-zonas 1 y 2 que fueron las que siguieron en número de árboles en el inventario.

Cuadro 7. Toneladas de carbono capturadas por los árboles.

Sub-zona	Biomasa (Mg MS árbol ⁻¹)	Da (árboles ha ⁻¹)	Biomasa (Mg MS árbol ⁻¹)	Carbono (Mg C ha ⁻¹)
1	0.08	550.00	43.73	20.69
2	0.09	487.50	42.72	20.21
3	0.09	412.50	37.98	17.97
4	0.09	466.67	40.58	19.20
5	0.14	725.00	100.22	47.42
6	0.13	200.00	26.64	12.60
Promedio	0.10	473.61	48.65	23.01

Da= densidad arbórea, MS = materia seca.

Para tener una referencia de la capacidad de captura del *Eucalyptus*, los datos se compararon con otros ecosistemas estudiados por Acosta-Mireles *et al.* (2009), Espinoza-Domínguez *et al.* (2009) y Masuhara (2012). Este mismo análisis se realizó para el sotobosque y el componente suelo.

Al comparar los valores que se muestran en el Cuadro 8, se puede apreciar que la cantidad de carbono almacenado por el *Eucalyptus* es comparable con varios sistemas naturales y agroforestales, lo que muestra, que el eucalipto, a pesar de las condiciones edáficas (20 cm) de escasa profundidad, de que el clima con precipitación media (700 mm), contribuye sustancialmente en el almacenamiento del carbono.

Cuadro 8. Carbono almacenado en árboles en diferentes tipos de vegetación.

Autor	Tipo de vegetación	Mg C ha ⁻¹
Acosta-Mireles <i>et al.</i> (2009)	Pino-encino-hojosas	89.1
	Oyamel-pino	74.2
	Oyamel-pino-encino	70.8
	Pino	45.3
	Pino-oyamel	17.3
	Pino-oyamel-encino	55.2
Espinosa-Domínguez <i>et al.</i> (2012)	Bosque caducifolio	266.0
	Café-chalahuite	29.0
	Silvopastoril	2.0
	Café-plátano	27.0
	Café-macadamia	34.0
	Potrero	0.0
	Café-cedro rosado	114.0
Masuhara (2012)	Café especializado	5.3
	Café policultivo	20.9
	Bosque mesofilo de montaña	239.9
EEMA	Eucalipto	23.0

5.1.3 Sotobosque

Para la medición de este reservorio se hicieron tres grupos de muestras, que consistieron en gramíneas y herbáceas, hojarasca y finalmente arbustos. En este último grupo no se encontraron individuos por lo tanto solo se presentan datos de los primeros dos grupos.

5.1.4 Gramíneas y herbáceas

El contenido de biomasa varió en cada una de las sub-zonas (Cuadro 9), dentro de las explicaciones de estas variaciones Acosta-Mireles *et al.* (2009) manifiestan que pueden ser debidas al efecto del clima, del suelo y de otros factores como podría ser el grado de densidad en que se encuentre el dosel. Al analizar los datos se encontró que las sub-zonas que presentaron menor biomasa fueron las 5 y 1, y por este efecto no alcanzaron las 0.5 Mg C ha⁻¹, estos resultados se ajustan con la densidad de árboles encontrados en el inventario donde las dos zonas presentaron la mayor cantidad de árboles por hectárea, que reducen el ingreso de la radiación solar al sotobosque y producen menor desarrollo de herbáceas y gramíneas. Las áreas restantes estuvieron mayor o igual a los 0.7 Mg C ha⁻¹. En términos generales se tiene un promedio de 0.71 Mg C ha⁻¹ de carbono capturado en este reservorio.

Cuadro 9. Biomasa y carbono almacenado en el componente gramíneas y herbáceas de las sub-zonas de la EEMA.

Sub-zona	Biomasa Mg MS ha ⁻¹	Carbono	
		%C	Mg C ha ⁻¹
1	1.04	41.54	0.44
2	1.55	43.50	0.70
3	1.91	41.51	0.78
4	2.50	39.82	1.00
5	0.96	43.54	0.42
6	2.24	41.45	0.93
Promedio	1.70	41.89	0.71
Desv. Est.	0.63	1.42	0.24

Desv. Est= desviación estándar.

En el Cuadro 10 se puede observar que el promedio de la EEMA en gramíneas y herbáceas (0.71 Mg C ha⁻¹) dista ampliamente de la reportada en la vegetación pino-encino-hojosas, de forma media con la oyamel-pino-encino, pino-oyamel, pino-

oyamel encino y con el potrero. Con el resto de vegetaciones la diferencia no es tan marcada. Estas situaciones se pueden explicar porque para el crecimiento de las hierbas y gramíneas se requiere del ingreso de la radiación solar, entonces, en los bosques gracias a la presencia de claros pueden permitir el rápido crecimiento de ellas, y en el caso del potrero tienen como ventaja la exposición total al sol (Espinosa-Domínguez *et al.*, 2012).

Cuadro 10. Contenido de carbono almacenado en herbáceas en diferentes tipos de vegetación.

Autor	Tipo de vegetación	Mg C ha ⁻¹
Acosta-Mireles <i>et al.</i> (2009)	Pino-encino-hojosas	5.80
	Oyamel-pino-encino	1.70
	Pino-oyamel	1.30
	Pino-oyamel-encino	1.00
	Oyamel-pino	0.80
	Pino	0.30
Espinosa-Domínguez <i>et al.</i> (2012)	Potrero	1.78
	Bosque caducifolio	0.64
	Silvopastoril	0.61
	Café-cedro rosado	0.13
Masuhara (2012)	Café especializado	0.02
	Cafépolicultivo	0.76
	Bosque mesófilo de montaña	0.14
EEMA	Eucalipto	0.71

5.1.5 Hojarasca

La hojarasca aportó tres veces más carbono capturado que las gramíneas y herbáceas. Al observar las cantidades de biomasa se pueden distribuir en dos grupos teniendo en cuenta el promedio general del bosque que fue de 2.10 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 11). Por lo tanto las sub-zonas que aportaron más que el promedio fueron 1, 2 y 5, y las que aportaron menos 3, 4 y 6, estos valores comparados con la densidad de árboles encontrados por zona muestran una gran relación porque al igual que las que presentan

mayor cantidad de carbono almacenado poseen un mayor número de árboles por área las que reportaron menor densidad igualmente contienen menor cantidad de carbono.

Cuadro 11. Biomasa y carbono almacenado en el componente hojarasca de las sub-zonas de la EEMA.

Sub-zona	Biomasa	Carbono	
	Mg Ms ha ⁻¹	%C	Mg C ha ⁻¹
1	7.26	42.24	3.06
2	6.59	42.82	2.83
3	3.17	43.99	1.39
4	4.75	42.72	2.04
5	6.53	41.37	2.74
6	1.32	41.23	0.55
Promedio	4.94	42.39	2.10
Desv. Est.	2.32	1.03	0.97

Desv. Est= desviación estándar.

Acosta-Mireles *et al.* (2009), comenta que la cantidad de biomasa en la hojarasca puede ser alterada por factores climatológicos como los vientos fuertes, ya que gracias a ellos se puede ver incrementada. Pero el incremento de la biomasa puede ser un efecto contraproducente por el riesgo de la generación de incendios y, por lo tanto, para la emisión de CO₂. Consecuentemente, en lugar de ser un almacén de carbono se puede convertir en una fuente de CO₂. Otros factores que pudieran influir son la densidad y la edad del arbolado, ya que entre más densa y madura esté una masa, lo probable es que exista una mayor cantidad de hojarasca.

En el Cuadro 12 se muestra la comparación de los otros tipos de vegetación y la de la EEMA. Donde se puede apreciar que en los bosques evaluados por Acosta-Mireles *et al.*, 2009, el promedio general de la EEMA (2.10 Mg C ha⁻¹) solo puede alcanzar cerca del 10% de los valores estimados en ese trabajo. Comparando los datos de la investigación desarrollada por Espinosa-Domínguez *et al.* (2012) se aprecia que la

hojarasca de EEMA no es inferior a los valores calculados en todos los tipos de vegetación estudiados, inclusive se encuentra cercano al estimado para el bosque caducifolio. Con respecto a los valores estimados por Masuhara (2012), la cantidad de carbono almacenada en la EEMA se encuentra cerca de la mitad de las cantidades estimadas por el autor.

Una importante relación que tiene los trabajos de Espinoza-Domínguez *et al.* (2009) y Masuhara (2012), es el lugar donde se realizaron (municipio de Huatusco, Veracruz) que presenta una altitud de 1,300 m. En contraste el estudio de Acosta-Mireles *et al.* (2009) se desarrolló una altura promedio de 2,875 m. Razón por la cual se ven afectados por variables como la temperatura y la precipitación.

Cuadro 12. Contenido de carbono almacenado diferentes tipos de vegetación.

Autor	Tipo de vegetación	Mg C ha ⁻¹
Acosta-Mireles <i>et al.</i> (2009)	Pino-encino-hojosas	23.4
	Oyamel-pino	14.9
	Oyamel-pino-encino	15.3
	Pino	29.6
	Pino-oyamel	16.0
	Pino-oyamel-encino	20.9
Espinoza-Domínguez <i>et al.</i> (2012)	Bosque caducifolio	1.93
	Café-chalahuite	1.87
	Silvopastoril	1.22
	Café-plátano	1.01
	Café-macadamia	0.85
	Café-cedro rosado	0.63
Masuhara (2012)	Café especializado	5.55
	Cafépolicultivo	4.53
	Bosque mesofilo de montaña	5.47
EEMA	Eucalipto	2.10

5.1.6 Suelo

Este reservorio es importante ya que tiene implicaciones relevantes en el reciclaje y almacenaje de carbono mediante los procesos de desnitrificación y descomposición de la materia orgánica teniendo una gran capacidad para secuestrar carbono acumulándolo por miles de años (Melillo *et al.*, 1996).

En el Cuadro 13 se muestran los diferentes porcentajes de carbono en las dos profundidades estudiadas, se puede apreciar que existe una mayor concentración de carbono en los primeros cinco centímetros del suelo, ya que su promedio general es de 3.16% frente a 1.53% de carbono en los siguientes diez centímetros de profundidad, esta última cantidad es casi la mitad de los primeros centímetros. Según lo explican Shaver and Aber (1996) la disminución del contenido de carbono con la profundidad se debe a que la mayor actividad de desarrollo de las raíces se realiza en los primeros centímetros del suelo porque ahí se encuentran las raíces de las hierbas, arbustos y gran parte de las raíces finas de los árboles. Además se le puede atribuir a que existe una mayor actividad microbiana en las capas superficiales de los suelos forestales (Breymer *et al.*, 1996). Este comportamiento también fue reportado por Van Cleve and Powers (1995) en su informe sobre el contenido de materia orgánica del suelo en el norte de California y el sureste de Oregon, EE UU.

Cuadro 13. Carbono orgánico del suelo total y en las dos profundidades muestreadas de las sub-zonas de la EEMA.

Sub-área	%C		Mg C ha ⁻¹		
	0-5 cm	5-15 cm	0-5 cm	5-15 cm	Total (0-15 cm)
1	2.88	2.23	16.83	43.80	60.63
2	2.63	1.09	16.62	27.41	44.03
3	4.94	1.79	29.41	38.01	67.42
4	2.77	1.18	17.27	23.60	40.87
5	3.02	1.17	16.60	23.93	40.53
6	2.74	1.71	16.11	36.69	52.80
Promedio	3.16	1.53	18.81	32.24	51.05
Desv. Est.	0.88	0.45	5.21	8.41	13.62

Desv. Est= desviación estándar.

Analizando la cantidad de carbono almacenado se observa que, en promedio, se capturan 51.05 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 13). Comparando la media con las estimaciones de cada área se aprecia que tres de ellas superan el promedio y por lo tanto tres se encuentran por debajo de ese valor.

Para la comparación de este reservorio no se tuvo en cuenta la investigación realizada por Espinoza-Domínguez *et al.* (2012), porque la profundidad mínima en ese trabajo fue de 30 cm. Los otros dos autores realizaron estimaciones en los primeros 20 cm del suelo, por esta razón las hizo comparables con los datos estimados en la EEMA. En el Cuadro 14 se muestran los valores del carbono total almacenado por hectárea en los diferentes ecosistemas. Llama la atención que en el área de estudio se encontró que el eucalipto propicia que en el suelo haya una acumulación de carbono comparable a un bosque de montaña, o varios sistemas que reportaron Acosta-Mireles *et al.* (2009). Esta información contribuye a esclarecer el papel que juega el eucalipto en el desarrollo del suelo.

Cuadro 14. Contenido de carbono orgánico del suelo almacenado en diferentes tipos de vegetación.

Autor	Tipo de vegetación	Mg C ha ⁻¹
Acosta-Mireles <i>et al.</i> (2009)	Pino-encino-hojosas	65.3
	Oyamel-pino	116.7
	Oyamel-pino-encino	121.1
	Pino	63.0
	Pino-oyamel	129.4
	Pino-oyamel-encino	112.2
Masuhara (2012)	Café especializado	54.30
	Cafépolicultivo	68.70
	Bosque mesofilo de montaña	61.10
EEMA	Eucalipto	51.05

5.1.7 Carbono total del bosque

Una vez realizada la estimación de captura de carbono en cada uno de los reservorios se realizó la suma de ellos para estimar la cantidad total por hectárea, dando como resultado 76.87 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 15). Donde más de la mitad es aportada por el suelo (66.41%), seguido de los árboles con 29.94% y finalmente la hojarasca y las herbáceas con 2.73 y 0.92% respectivamente. Al agrupar los almacenes en reservorio aéreo y subterráneo se puede observar que el aéreo contiene el 33.59% y el subterráneo continua con el 66.41%. Esta proporción coincide por lo encontrado con Acosta-Mireles *et al.* (2009) donde el suelo fue el reservorio que más aportó carbono y su valor fue de 64% del total.

Con respecto a los importantes aportes del suelo a la captura de carbono Dupouey *et al.* (1999) realizaron un trabajo de carbono en un bosque de Francia, donde encontraron una media total del carbono de 137 Mg C ha⁻¹; de este total, el suelo representó el 51%, los restos vegetales superficiales 6%. Esta situación también la

reporta el IPCC (2000) para los bosques en Tennessee (Estados Unidos de América) y también para los bosques tropicales de Brasil donde el almacén fue del 36% del total.

Analizando las sub-zonas, se aprecia que la que más retiene carbono es la 5, siendo su mayor influencia sobre este resultado la cantidad de árboles registrados, la segunda es la 1 que al igual que la 5 se encuentra afectada por el número de árboles pero sumado a esto por el contenido de carbono en el suelo, en la sub-zona 3 aunque no registró una alta densidad de árboles su contenido de carbono en el suelo es sobresaliente con respecto a las otras sub-zonas, aunque este resultado puede ser el resultado de la variabilidad del suelo.

Cuadro 15. Carbono por reservorio y total (Mg C ha⁻¹) de las sub-zonas de la EEMA.

Sub-zona	Árboles	Hojarasca	Herbáceas	Suelo	Total
1	20.69	3.06	0.44	60.63	84.82
2	20.21	2.83	0.70	44.03	67.76
3	17.97	1.39	0.78	67.42	87.56
4	19.20	2.04	1.00	40.87	63.11
5	47.42	2.74	0.42	40.53	91.10
6	12.60	0.55	0.93	52.80	66.89
Promedio	23.01	2.10	0.71	51.05	76.87
%	29.94	2.73	0.92	66.41	100.00

Al momento de la evaluación solo se estima la cantidad de carbono que se encuentra almacenada actualmente y no la que debería existir desde hace 50 años. La razón es que la EEMA ha sufrido mortalidad de árboles por diferentes causas como lo son incendios y saqueos.

5.2 Evolución del suelo

En el área de estudio se cuenta con información edáfica que permite conocer los cambios que han ocurrido en un periodo de 50 años (Asteinza *et al.*, 1997), es por ello que es factible conocer esa evolución después de transcurridos 50 años.

En el Cuadro 16 se muestran los resultados de pH, materia orgánica, densidad aparente, N-inorgánico y fósforo, realizados a los suelos donde se llevó a cabo el estudio.

Para el pH se observa una tendencia de moderadamente ácidos en cinco de las seis sub-zonas, la restante mostró una tendencia neutra, esta propiedad influye de manera importante en la disponibilidad de algunos nutrientes y en la actividad microbiana que permite la descomposición de la materia orgánica.

En cuanto a la MOS se encontraron tres tipos de contenidos; 1 sub-zona en bajo, 4 con medio y 1 con alto. En los contenidos de N se encontró que todas las sub-zonas presentan contenido medio de este elemento. El P estuvo en dos categorías de clasificación, cuatro áreas mostraron contenido medio y dos bajo.

Cuadro 16. Características físicas y químicas de los suelos de la EEMA.

Sub-zona	pH	MO (%)	Da (g cm ⁻³)	N inorgánico (mg kg ⁻¹)	Fósforo (mg kg ⁻¹)
1	6.25	8.81	1.26	27.65	8.33
2	6.54	6.42	1.47	30.63	8.10
3	6.97	11.61	1.30	29.40	7.18
4	6.53	6.53	1.30	24.50	5.25
5	6.35	6.35	1.24	27.65	7.64
6	6.07	6.07	1.30	26.95	4.86

Da= densidad aparente.

Esta es la información que se obtiene para el año 2012, pero para analizar de manera más amplia los cambios desde su reforestación hasta el presente, cuando se cumplen 50 años desde la plantación de los árboles, se cuenta con la información en diferentes intervalos de tiempo: 1, 25, 35 y 50 años. La Figura 8 ilustra el cambio en las características estudiadas. El pH en 1963 se clasificó como medianamente alcalino y ha venido descendiendo su valor hasta encontrarse ahora en moderadamente ácido. La MOS durante 34 años se ubicó en muy baja, aunque su contenido fue aumentando, solo logró pasar a una categoría de mayor contenido en la última evaluación. El N ha venido incrementando su cantidad a través de los años y ahora se clasifica medio. Caso contrario ocurre con las concentraciones de P porque empezó con 13.50 kg ha^{-1} y ahora cuenta con una menor concentración catalogándose como medio. Para el caso de la densidad aparente se observa en sus valores que se ha mantenido estables, a pesar de la variación que se registró en 1987, sin embargo, esos valores han descendido para mantenerse estables a lo largo del periodo 1963 – 2012.

Para interpretar estos cambios se debe tener en cuenta el papel tan importante que realizan los árboles ya que los componentes de su copa contribuyen en cantidades de materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable (Ordoñez, 1999). Una de las características de los suelos degradados por erosión de la capa superficial, corresponde al bajo contenido de MOS por lo tanto cuando esta se incrementa trae consigo beneficios tales como el mejoramiento de las propiedades químicas, la disponibilidad de elementos, mayor fertilidad y la resiliencia contra la degradación física, especialmente de la erosión. Por lo tanto, el secuestro de carbono contribuirá a restaurar la calidad de los suelos degradados (FAO, 2002).

Además la MOS puede mejorar la biodisponibilidad de otros elementos importantes tales como el fósforo y disminuir la toxicidad de otros elementos al formar quelatos u otras uniones, por ejemplo, aluminio y materia orgánica (Robert, 1996). Dentro de las características físicas Basara *et al.* (2008) y González-Molina *et al.* (2008), encontraron una relación entre una mayor cantidad de carbono y la disminución de la densidad aparente.

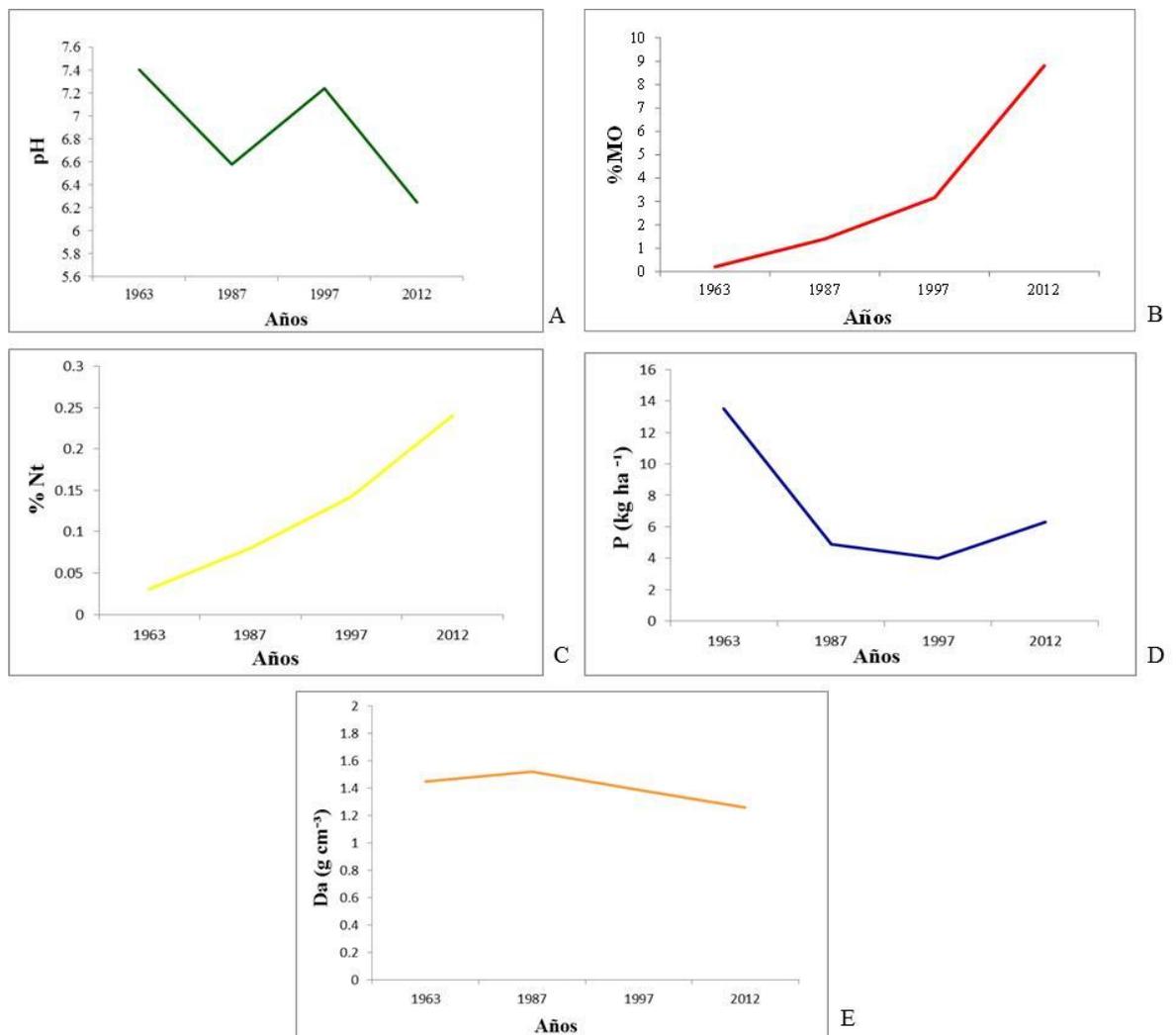


Figura 8. Cambio de algunas propiedades del suelo en el periodo 1963-2012 en la EEMA. (A) pH, (B) % de MO, (C) nitrógeno total Nt %, (D) fósforo P (kg ha⁻¹), (E) Da (g cm⁻³).

5.3 Modelo matemático para la determinación de la biomasa

En el Cuadro 17 se muestran las características dasométricas de los diez árboles derribados con el promedio general y la desviación estándar. Donde se puede observar que el promedio de DAP y biomasa fue de 18.40 cm y 119.56 kg respectivamente. En cuanto a la desviación estándar los variables que presentan menor distancia, respecto a la media, fueron la altura y el DAP. En el Cuadro 18 se muestran los valores máximo, mínimos, promedio y desviación estándar de cada sección del árbol (ramas, fuste y hojas) donde se puede apreciar que el fuste es donde se concentra la mayor cantidad de biomasa seguido de las ramas y las hojas que son las que menos aportan biomasa al total del árbol.

Cuadro 17. Características dasométricas de los árboles derribados para la generación del modelo.

Árbol	DAP(cm)	Altura (m)	Peso fresco (kg)	Biomasa (kg)	Humedad (%)
1	15.6	16.45	188.05	85.00	56.89
2	15.6	15.80	180.73	92.49	49.10
3	17.3	17.10	191.88	104.91	48.91
4	17.5	14.11	203.73	88.44	50.55
5	17.5	12.67	169.93	88.65	47.08
6	18.0	15.00	250.28	136.95	46.16
7	19.7	17.60	268.85	157.82	37.46
8	20.7	15.20	333.68	172.02	52.67
9	20.8	14.64	299.78	135.58	53.26
10	21.1	14.77	264.55	133.74	50.97
Promedio	18.40	15.33	235.14	119.56	49.31
Desv. Est.	2.07	1.46	56.18	31.70	5.21

Desv. Est= desviación estándar.

Cuadro 18. Secciones de biomasa de cada componente del árbol en kilogramos.

	Hojas	Ramas	Fuste	Total
Máximo	10.57	26.29	149.97	172.02
Mínimo	3.18	3.47	66.04	85.00
Promedio	6.56	12.78	100.22	119.56
Desv. Est.	2.19	6.91	28.48	31.70

Desv. Est= desviación estándar.

De esta información se tomó el DAP y la biomasa para graficarlas y así definir el modelo que mejor pudiera predecir la biomasa del árbol. El criterio de selección para el mejor modelo fue el que tuviera el coeficiente de determinación (R^2) más alto. Una vez graficado el cuadro anterior con una línea de tendencia lineal (Figura 9) se encontró que la R^2 solo alcanzó un valor de 0.6744, al revisar los datos que arrojaban esta gráfica se encontró el siguiente escenario; los valores de DAP son homogéneos y esto se puede confirmar con la desviación estándar que se calculó anteriormente, razón por la cual no se obtuvo una R^2 mayor por falta de datos de mayor contraste. Además algunos de ellos disminuían el valor de ajuste ya que se encontraban fuera de la línea de tendencia trazada, por este motivo se consideró realizar una selección de los valores a graficar. Para realizar esta selección se creó un índice de biomasa que se construyó dividiendo la biomasa en el DAP (Cuadro 19), del cual se obtuvo como resultado promedio 6.43, también se estimó la desviación estándar que fue de 1.18. Para formar el criterio de selección se sumaron estos dos valores y se obtuvo el máximo y se restó para calcular el mínimo. Con estos dos parámetros, máximo y mínimo, se descartaron los DAP que se encontraban fuera de este rango. Realizada la selección se obtuvo los datos de mayor contraste y con estos se pudo realizar el modelo.

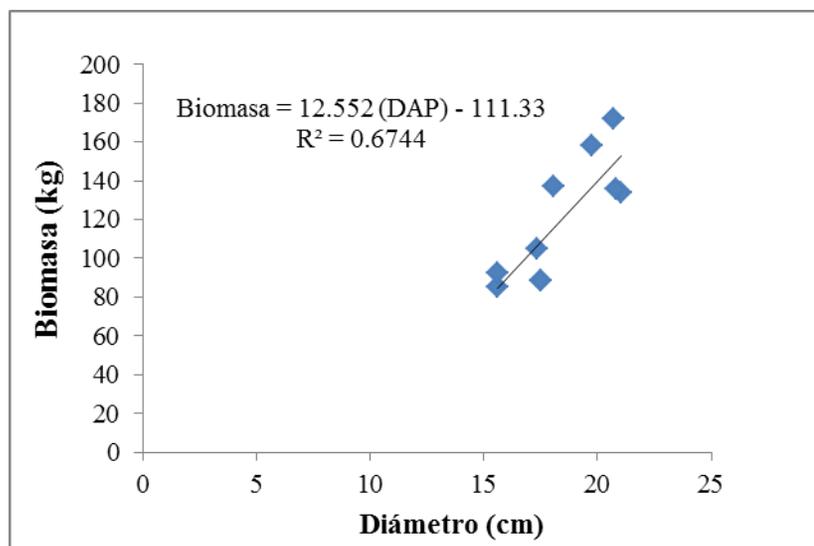


Figura 9. Modelo lineal de biomasa y DAP de los diez árboles derribados.

Cuadro 19. Índice de biomasa de los árboles para obtener el criterio de selección de los árboles, que consistió en el máximo y mínimo de los valores.

Árbol	Biomasa (kg)	DAP(cm)	Ind Biomasa
1	133.74	21.1	6.35
2	135.58	20.8	6.50
3	88.44	17.5	5.05
4	85.00	15.6	5.45
5	172.02	20.7	8.31
6	136.95	18.0	7.59
7	157.82	19.7	8.00
8	104.91	17.3	6.05
9	88.65	17.5	5.06
10	92.49	15.6	5.93
Promedio	119.56	18.40	6.43
Desv. Est.	31.70	2.07	1.18
Max	172.02	21.07	7.61
Min	85.00	15.60	5.25

Desv. Est= desviación estándar, Ind= Índice.

Realizada la selección de valores se organizó la nueva tabla para el modelo (Cuadro 20), en donde se descartaron cuatro de los 10 árboles. Como se requería ampliar los valores de los diámetros de los árboles, para mejorar el ajuste del modelo, se empelaron los DAP encontrados en el inventario inicial y se organizaron en categorías diamétricas, se promediaron y se crearon otros diámetros (Cuadro 21), a los que se les

determinó la biomasa usando el modelo construido a partir de los datos seleccionados del campo. Con esta nueva información se aplicaron los modelos lineal, logarítmico y exponencial.

Cuadro 20. Árboles seleccionados para la construcción del modelo.

DAP(cm)	Biomasa (kg)
15.6	85.00
15.6	92.49
17.3	104.91
18.0	136.95
20.8	135.58
21.1	133.74

Cuadro 21. Categorías diamétricas de los árboles del inventario para introducir nuevos diámetros.

Categorías (cm)	Árboles	DAP (cm)
0 a 5	2	3.18
5 a 10	56	7.6
10 a 15	104	12.65
15 a 20	78	17.27
20 a 25	63	22.47
25 a 30	15	27.88
30 a 35	13	31.95
35 a 40	8	38.63
84	1	84.03

5.3.1 Modelo lineal

Con este ajuste se obtuvo una $R^2 = 0.7674$ (Figura 10) mejorado respecto al que se realizó inicialmente ($R^2 = 0.6744$), que arrojó el modelo $y=8.4834x-38.646$. Donde y = biomasa (kg) y x =DAP (cm). Con este modelo se calculó la biomasa de los otros diámetros incluidos (Cuadro 22), en esos datos se observa que los dos DAP menores a 7.60 producen resultados negativos, por lo que se omitieron de ser graficados. De los 16 árboles se utilizaron 15, estimado el modelo lineal (Figura 11), el cual muestra un ajuste con una $R^2 = 0.9894$ que es alta y una ecuación del tipo. $y=8.4905x-37.471$.

Donde y = biomasa (kg) y x =DAP (cm). Para verificar su capacidad de predicción se aplicó a los datos estimados anteriormente, dando como resultado un promedio de 2.61% de sobreestimación de biomasa.

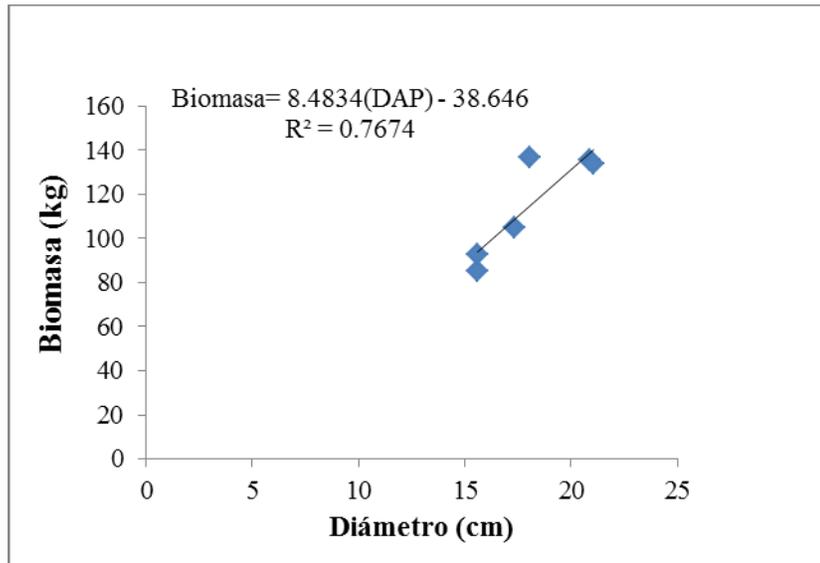


Figura 10. Modelo lineal de los diámetros seleccionados con el índice de biomasa.

Cuadro 22. Diámetros, biomasa calculada con el modelo lineal y en campo, y porcentaje de sobreestimación.

DAP(cm)	Biomasa campo(kg)	Biomasa modelo (kg)	% Sobre Estimación
3.18			
7.60	25.83	27.06	4.76
12.65	68.67	69.93	1.84
15.60	85.00	94.96	11.72
15.60	92.49	94.96	2.67
17.35	104.91	109.82	4.68
17.51	88.44	111.17	25.70
17.51	88.65	111.17	25.40
18.05	136.95	115.77	-15.47
19.74	157.82	130.09	-17.57
20.69	172.02	138.20	-19.66
20.85	135.58	139.55	2.93
21.07	133.74	141.44	5.76
27.88	197.87	199.24	0.69
31.95	232.40	233.80	0.60
38.63	289.07	290.52	0.50
84.03	674.21	675.99	0.26

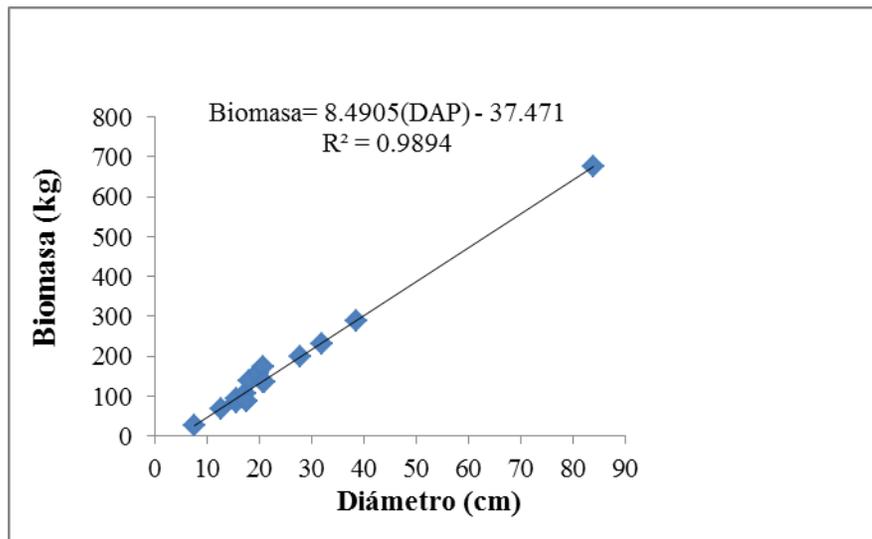


Figura 11. Modelo lineal con los DAP adicionales.

5.3.2 Modelo logarítmico

Al graficar los datos de la tabla de árboles seleccionados se encontró un modelo con una R^2 de 0.7901 y su ecuación $y = 156.85 \ln(x) - 338.15$. Donde $y =$ biomasa (kg) y $x =$ DAP (cm). Se empleó para encontrar los valores de biomasa de los DAP de menor y mayor diámetro que se incluyeron (Figura 12). Esos resultados se incluyen en el Cuadro 23. Con el modelo logarítmico se encontró que, al igual que con el modelo lineal, se registraron valores de biomasa negativas. Sin embargo, con el modelo logarítmico se incluyó un diámetro más (12.65 cm), condición por la cual no se incluyeron en la gráfica (Figura 13). Al igual que el modelo lineal presenta un porcentaje mínimo de diferencia en la predicción de la biomasa ya que alcanzó un promedio de 2.49% de sobreestimación.

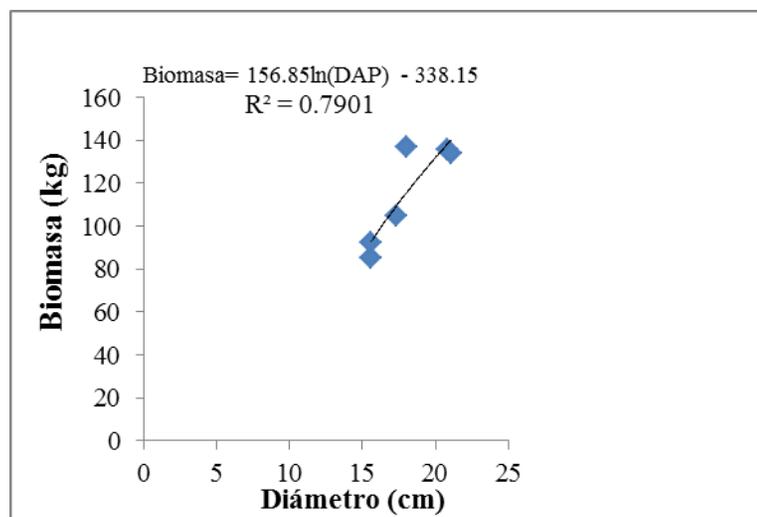


Figura 12. Modelo logarítmico con la ecuación inicial.

Cuadro 23. Datos de diámetro, biomasa calculada por el primer modelo y en campo, logaritmo natural de DAP y la aplicación del modelo para todos los diámetros y porcentaje de sobreestimación.

DAP(cm)	Biomasa campo (kg)	Biomasa modelo (kg)	% Sobre Estimación
3.18	-156.69		
7.60	-20.03		
12.65	59.88	60.24	0.60
15.60	85.00	93.42	9.91
15.60	92.49	93.42	1.01
17.35	104.91	110.28	5.11
17.51	88.44	111.72	26.32
17.51	88.65	111.72	26.02
18.05	136.95	116.54	-14.90
19.74	157.82	130.70	-17.18
20.69	172.02	138.19	-19.67
20.85	135.58	139.40	2.82
21.07	133.74	141.09	5.49
27.88	183.83	185.44	0.87
31.95	205.21	207.03	0.89
38.63	234.98	237.11	0.90
84.03	356.88	360.23	0.94

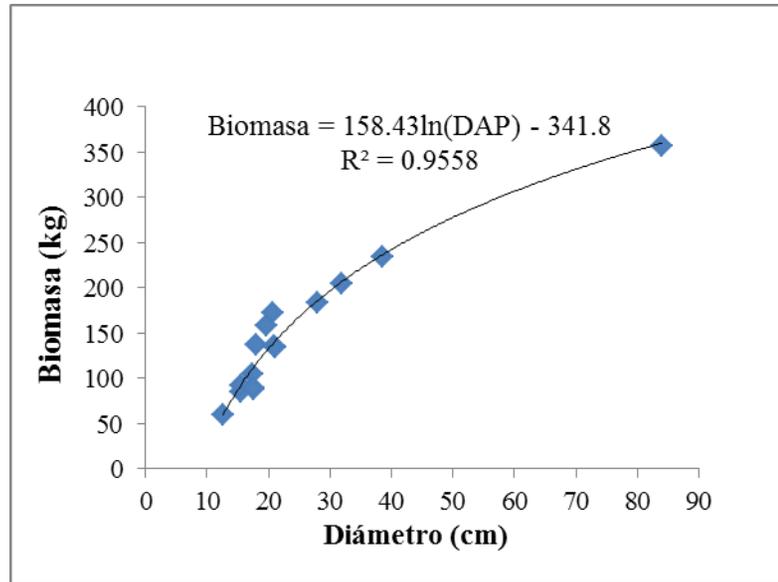


Figura 13. Modelo logarítmico aplicado a los datos del cuadro 23.

5.3.3 Modelo exponencial

Graficados los datos iniciales (Figura 14) se procedió a determinar los valores de DAP nuevos (Cuadro 24), una vez realizada la estimación se graficaron los 17 diámetros y biomasa (Figura 15). A diferencia de los modelos anteriores, con el modelo exponencial se obtuvieron valores de DAP positivos con una R^2 de 0.6087. Revisando el porcentaje de sobreestimación se encontró que el promedio fue de 1,174.41%.

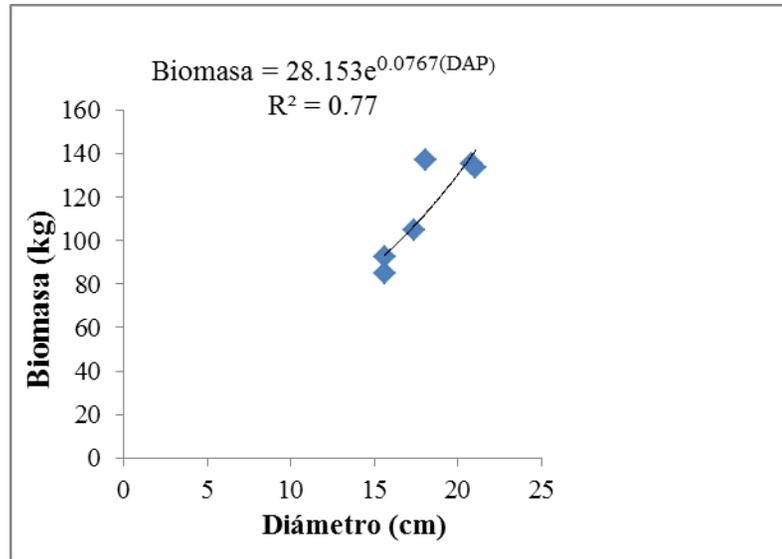


Figura 14. Gráfica inicial para determinar los datos restantes del modelo.

Cuadro 24. Datos de diámetro, biomasa calculada por el primer modelo y en campo y la aplicación del modelo para todos los diámetros y porcentaje de sobreestimación.

DAP(cm)	Biomasa campo (kg)	Biomasa modelo(kg)	% Sobre Estimación
3.18	96.66	253.07	161.81
7.60	231.02	604.83	161.81
12.65	384.53	1,006.73	161.81
15.60	85.00	1,241.27	1,360.36
15.60	92.49	1,241.27	1,242.07
17.35	104.91	1,380.59	1,215.98
17.51	88.44	1,393.26	1,475.29
17.51	88.65	1,393.26	1,471.59
18.05	136.95	1,436.33	948.76
19.74	157.82	1,570.58	895.18
20.69	172.02	1,646.58	857.18
20.85	135.58	1,659.25	1,123.80
21.07	133.74	1,676.98	1,153.88
27.88	847.48	2,218.78	161.81
31.95	971.19	2,542.68	161.81
38.63	1,174.25	3,074.29	161.81
84.03	2,554.29	6,687.36	161.81

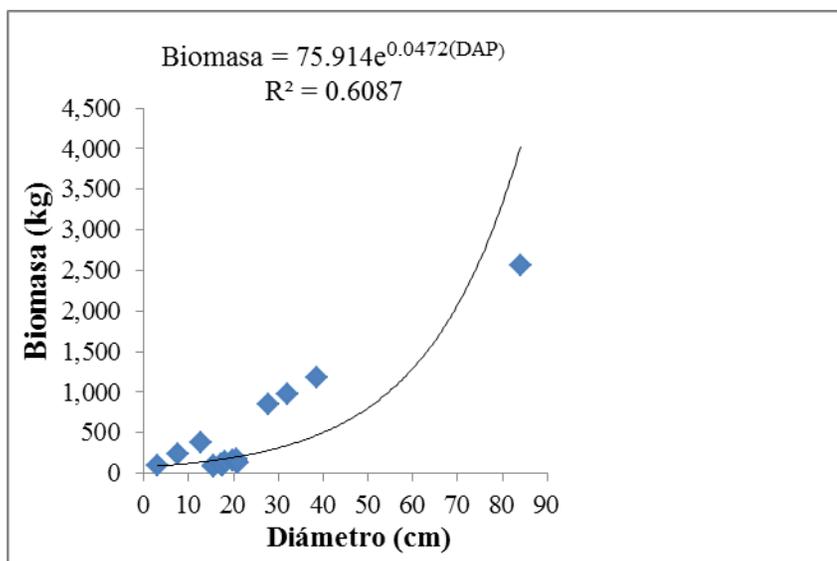


Figura 15. Modelo exponencial con los todos los DAP.

5.4 Estimación de carbono

Los diez árboles utilizados para la determinación de biomasa se agruparon por cada sub-zona y se realizó la determinación de carbono para cada uno de los componentes del árbol (follaje, ramas y fuste) (Cuadro 25). Se encontró que el follaje contiene un porcentaje 49.43% con una desviación estándar de 1.80, las ramas un 44.18% y el fuste 48.43% con desviaciones estándar de 1.19 y 0.99 respectivamente, esta información arrojó un promedio general del árbol de 47.31% de contenido de carbono.

Cuadro 25. Porcentajes de carbono y desviación estándar para cada componente del árbol.

Componente	Sub-zonas de muestro						Promedio	Desv. Esta
	1	2	3	4	5	6		
Carbono (%)								
Follaje	47.97	47.72	49.98	48.01	50.86	52.04	49.43	1.80
Ramas	43.88	43.79	44.54	44.32	46.09	42.43	44.18	1.19
Fuste	48.38	49.26	47.22	47.30	48.21	49.64	48.34	0.99
Total árbol	46.74	46.92	47.25	46.54	48.39	48.04	47.31	0.74

Desv. Est= desviación estándar.

Al analizar la proporción de carbono por componente se puede ver que de menor a mayor, las ramas almacenan el 0.75%, las hojas 5.61%, y el fuste 83.65%, característica similar encontrada por Díaz-Franco *et al.* (2007) y Avendaño *et al.* (2009), donde el árbol acumula mínimo el 80% del carbono en el fuste.

Determinado el promedio del porcentaje de carbono para el árbol, se aplicó a los valores de biomasa de los 16 diámetros incluidos en el modelo y así determinar cuál de ellos presenta el mejor coeficiente de determinación. El modelo lineal presenta el mejor coeficiente con 0.9894, seguido del logarítmico con 0.9558, finalmente el exponencial con 0.6087 resumen de los modelos de biomasa y carbono se puede apreciar en el Cuadro 26.

Cuadro 26. Resumen de los diferentes modelos encontrados con el coeficiente de determinación.

	Biomasa		Carbono	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
Lineal	$y = 8.4905x - 37.471$	0.9894	$y = 4.0169x - 17.728$	0.9894
Logarítmico	$y = 158.43 \ln x - 341.8$	0.9558	$y = 74.952 \ln x - 161.7$	0.9558
Exponencial	$y = 275.914e^{0.6087x}$	0.6087	$y = 35.915e^{0.0472x}$	0.6087

5.5 Comparación con otros modelos

Como se planteó en el segundo objetivo específico, se realizó la comparación del mejor modelo que se halló en este estudio frente a otros. Se buscaron diferentes ecuaciones realizadas por otros autores en el mismo género, en el Cuadro 27 se muestran las encontradas. Para este análisis de los modelos determinados en este trabajo se puede observar que de los tres el que presenta menor coeficiente de

determinación y que sobreestima demasiado la biomasa es el exponencial, por lo tanto no se tendrá en cuenta para compararlo con los otros modelos.

Cuadro 27. Ecuaciones alométricas realizadas por diferentes autores para este género.

Especie	Modelo	Fuente
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> (1)	$Y = -0.13 + 2 \log x$	Faraht <i>et al.</i> (2012)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> (2)	$Y = 0.45 + 2 \log x$	Faraht <i>et al.</i> (2012)
<i>Eucalyptus</i> spp (3)	$B = e^{(-2.81 + 1.92 \ln C)}$	Burrows <i>et al.</i> (2000)
<i>Eucalyptus</i> spp (4)	$Y = 1.22 * DBH^2 * HT * 0.01$	Senelwa and Sims (1998)

(1) Altura total del árbol en m, (2) índice de tamaño = (altura total + DAP)/2, (3) C=circunferencia en cm, (4) DBH2=DAP en cm, HT=altura total en m.

Estos modelos se aplicaron tanto a los árboles del inventario de carbono como a los utilizados en la construcción de la ecuación alométrica. En el Cuadro 28 se muestran los resultados de los 6 modelos, 4 encontrados en la literatura y 2 desarrollados en este trabajo.

Cuadro 28. Resultados de los modelos incluyendo el de este trabajo.

Modelo	Fuente	B. A. I	B. A. M.	% SE
$Y = -0.13 + 2 \log x$	Faraht <i>et al.</i> (2012)	4.66	4.73	-95.27
$Y = 0.45 + 2 \log x$	Faraht <i>et al.</i> (2012)	5.59	6.09	-95.6
$B = e^{(-2.81 + 1.92 \ln C)}$	Burrows <i>et al.</i> (2000)	141.05	146.81	25.24
$Y = 1.22 * DBH^2 * HT * 0.01$	Senelwa and Sims (1998)	62.66	64.77	-45.16
$y = 8.4905x - 37.471$	EEMA	102.03	118.71	2.61
$y = 158.43 \ln(x) - 341.8$	EEMA	120.38	118.65	2.49

B.A.I= biomasa de árboles del inventario en kg, B.A.M=biomasa de árboles del modelo en kg, %SE= porcentaje de sobreestimación del modelo.

Con base en los resultados se puede observar que los modelos reportados por Faraht *et al.* (2012) y Senelwa and Sims (1998). Subestiman la biomasa en un 95.27%, 95.60% y 45.16% respectivamente, esto quiere decir que solo estiman la biomasa de los árboles de la EEMA en un 5% del total de su biomasa, esto para los dos primeros modelos, el tercero calcula un poco más de la mitad de la biomasa (54.84%), por eso

los resultados de biomasa solo alcanzan aproximadamente 5 kg en las ecuaciones de Faraht *et al.* (2012) y en alrededor de 65 kilogramos en el modelo de Senelwa and Sims (1998). Los modelos restantes sobrestiman la biomasa, el de Burrows *et al.* (2000), en un 25.24%, los modelos lineal y logarítmico de este estudio alcanzan el 2.53% y 2.49% respectivamente.

Se debe seleccionar cuidadosamente y, principalmente, evaluar la confiabilidad de los modelos alométricos que serán utilizados para estimar la biomasa de los componentes forestales. Caso contrario, se podrían sub estimar o sobre estimar los valores. Chave *et al.* (2005) comentan que varios autores notificaron que hay modelos que tienden a sobre estimar biomasa. Como ejemplo de esta situación, partiendo de modelos existentes en la literatura, Alves *et al.* (1997) estimaron la biomasa de un bosque tropical de Rondonia, Brasil, de sucesión primaria y secundaria con diferentes edades, y las diferentes ecuaciones produjeron estimaciones con variaciones de hasta 400%.

El reservorio más importante de carbono en el inventario fue el suelo, al contener más del 50% del carbono total almacenado. Este resultado es un claro reflejo del incremento de la MOS y aunque con los análisis del presente estudio, sus concentraciones se encuentran en un nivel medio hay que tener en cuenta que inició en una clasificación de muy bajo. Este aporte de material orgánico en gran medida se debe al eucalipto, porque 50 años después de la reforestación de la EEMA, fue el árbol que se encontró con mayor presencia (96.3%), aunque en 1997 Asteinza *et al.* (1997) reportan la evolución del suelo en pino, actualmente no se encontró ningún ejemplar de este género. Según la FAO (2002) el contenido de MOS es bajo donde la

degradación es más severa, por lo tanto para este caso es posible decir que con un nivel medio de materia orgánica se está recuperando el suelo.

Otro beneficio de la MOS ha sido el incremento de nitrógeno (ya que es un elemento presente en los tejidos vegetales), caso contrario está sucediendo con el P, donde sus niveles eran más altos en el momento de la plantación que los encontrados 50 años después. Este panorama pudo ser originado posiblemente por dos situaciones, la primera puede ser debida al uso anterior a la reforestación, ya que los suelos eran utilizados para la agricultura a pesar de no ser apropiados para esta práctica (Reyes, 1972), pudieron ser fertilizados y por lo tanto iniciaron con altos contenidos de P, pero en los últimos años no se ha vuelto a incorporar fertilización fosfórica al suelo, causando disminución de las reservas de este elemento en el transcurso del tiempo. La segunda, es por la acción de la materia orgánica el P presente se hizo disponible para el aprovechamiento de los árboles y su incorporación nuevamente al sistema en cantidades bajas.

Otro aporte importante en el mejoramiento del suelo en la EEMA, es la disminución de la densidad aparente, y como se mencionó en esa sección, esta característica física no ha cambiado de clasificación si ha disminuido en la cantidad, cabe recordar que su valor en 1963 era de $1.45 \text{ (g cm}^{-1}\text{)}$ (Asteinza *et al.*, 1997), en el 2012 fue de $1.26 \text{ (g cm}^{-1}\text{)}$, información que indica que la MOS ha ayudado facilitar y elevar la granulación de la estructura del suelo, aumentando la porosidad y disminuyendo la densidad aparente.

El modelo seleccionado fue el modelo lineal, que se representa con la ecuación: $y=8.4905x-37.471$. Donde y = biomasa (kg) y x = DAP (cm). Con un coeficiente de

determinación de 0.9894 y que realiza una sobre estimación de la biomasa del 2.61%. A pesar que el modelo logarítmico expresa una menor sobre estimación (2.49) y su R^2 es alta (0.9598), al comparar la biomasa que estima para los diámetros incluidos se observa que estima cerca del 50% de la biomasa que estima el modelo lineal. Por ejemplo para el DAP 84.03 cm, se calcula una biomasa en la ecuación lineal de 674.21 kg y el logarítmico de 356,88 kg teniendo en cuenta que es el árbol de mayor diámetro y por ende su altura es la máxima, 27 metros, es de esperar que posea la mayor biomasa y esto no lo muestra el modelo logarítmico, ya que uno de los árboles derribados que presenta un DAP de 21.1 muestra el 37.47% de la biomasa estimada en ese modelo cuando es la cuarta parte del DAP mayor.

Una de las dificultades que se encontró para la construcción del modelo alométrico fue la falta de amplitud de diámetros, afortunadamente se logró ajustar con el modelo lineal quedando solo uno sin ser calculado DAP 3.18. Aunque la decisión de no derribar otros diámetros se basó en dos razones, la primera que los DAP en un 60% correspondían a los diez árboles seleccionados para determinación de biomasa y estaban dentro de la media general, y la segunda los recursos económicos no eran abundantes para incluir más árboles.

En cuanto a la comparación con otros modelos hay que tener en cuenta el lugar y la edad de los árboles de donde realizaron la ecuación alométrica, con el fin de que se logre ajustar porque los modelos que se aplicaron no fueron acertados en la estimación de biomasa porque las condiciones donde se realizaron no son semejantes a las que presenta en la EEMA.

6. CONCLUSIONES

De las especies empeladas en la reforestación en 1962 se encontraron tres, *Eucalyptus camaldulensis* var. *brevirostris*, *Eucalyptus resinifera*, y *Schinus molle* Lin (Pirul), este último con sólo cinco individuos. El eucalipto fue el que más se encontró y por ende, tuvo mayor supervivencia.

En el inventario de carbono, más de la mitad es aportada por el suelo (66.41%), seguido de los árboles con 29.94% y finalmente la hojarasca y las herbáceas, con 2.73% y 0.92% respectivamente. Al agrupar los almacenes en reservorio aéreo y subterráneo se puede observar que el aéreo contiene el 33.59% y el subterráneo con el 66.41%.

En el suelo se encontraron cambios importantes, principalmente en los contenidos de la MOS porque después de 50 años paso de clasificación muy bajo a medio, y este incremento es una prueba de la disminución de la degradación del suelo. Además proporciona un aumento en los contenidos de carbono y nitrógeno.

El modelo seleccionado fue el lineal con la ecuación $y=8.4905x-37.47$, con un coeficiente de determinación de 0.98 y determina biomasa a partir de un DAP de 4.50 cm, mostró una de las más bajas sobrestimación (2.61%), lo que lo hace un modelo confiable para estimar la biomasa en áreas con características similares a la que se encuentra en la EEMA.

Con los análisis realizados de carbono orgánico total en los árboles derribados se puede decir que la cantidad de carbono que almacena el árbol es de 47.31%. La

distribución de este porcentaje por componente se puede ver que de menor a mayor las hojas almacenan el 5.61%, las ramas el 0.75 y el fuste 83.65%.

7. LITERATURA CITADA

- Acosta, M.M., H.J. Vargas, M.A. Velázquez, J. Etchevers. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Acosta-Mireles, M.; F. Carrillo-Anzures., M. Díaz –Lavariega. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *TERRA Latinoamericana*. (27): 105-114.
- Alves, D. S.; J.V. Soares, S. Amaral, E. Mello; S. A. Almeida, S. Silva, O.F. Silveira. 1997. Biomass of primary and secondary vegetation in Rondônia, Western Brazilian Amazon. *Global Change Biology*. (3): 451-461.
- Araujo, T. M, N. Higuchi, J.A. de Carvalho Junior. 1999. Comparison of formula for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Par. Brazil. *Forest Ecology and Management* (117): 43-52.
- Asteinza, B. G.; A. Vázquez A.; J. Rey C. 1997. Cambios físicos y químicos en suelos erosionados reforestados con *Pinus montezumae* y secuencia de *Pinus montezumae-Eucaliptus camaldulensis* (1963-1997) en Huexotla, Estado de México. *Memorias XXV Congreso Nacional de las Ciencias del Suelo*.
- Audesirk T; G. Audesirk; B. E. Byers. 2004. *Biología, ciencia y naturaleza*. Editorial Pearson, educación. Primera edición. Impreso en México. 484 pp.
- Avendaño, H. D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A., J. D. Etcheverts B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana*, (32): 233-238.
- Ávila, G., F. Jiménez; J. Beer; M. Gómez; M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería de las Américas* 8 (30): 32-35.

- Ávila, H.M. 1963. Recuperación de suelos degradados en Chapingo, México, con plantaciones forestales. Tesis de Maestría. Escuela Nacional de Agricultura. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México. 113 pp.
- Basara, M., G. A. Erpul, E. Tercan, and M. R. Canga. 2008. The effects of land use changes on some soil properties in Indagi Mountain Pass. Cankiri, Turkey *Environ. Monitoring and Assessment* 136: 101-119.
- Ben, H. J., B. de Hong, G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto- Pinto, J. Taylor, and R. Tipper. 1995. Community forest management and carbon sequestration: a feasibility study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20: 409-416.
- Breymeyer, A. I., B. Berg, S. T. Gower, and D. Johnson. 1996. Carbon budget: temperate coniferous forests change: effects on coniferous forests and grasslands. John Wiley. Chichester, UK. 67 pp.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. Roma, Italia. FAO. (Informe Montes N°134). 55 pp.
- Burrows, W. H., M. B. Hoffmann, J. F. Compton, P. V. Back, and L.J. Tait. 2000. Allometric relationships and community biomass estimates for some dominant eucalyptus in Central Queensland woodlands. *Australian Journal of Botany*. (48): 707-714.
- Cachón, A.M.E.; N. Genes H.; H.E. Cuanalo C.1976. Los suelos del área de influencia de Chapingo. Colegio de Posgraduados. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 79 pp.
- Chave, J.; C. Andalo, S. Brown, M. Cairns A.; J. Chambers Q., D. Eamus; F. Ister H.; F. Fromard, N. Higuchi; T. Kira, J-P. Lescure; B. Nelson W.; H. Ogawa, H Puig, Ra. Rie', B. Yamakura T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Ecosystem Ecology*. 145. 87–99.

- CMNUCC. 1998. Protocolo de Kyoto. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Alemania. 25 pp.
- Dauber, E., J. Terán, R. Guzmán. 2008. Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana* 1(1):1-10. Consultado 25 .2012 agosto Disponible en <http://www.revforiberoamericana.ula.ve/archivos/DOC2.pdf>
- Díaz-Franco, R.; M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala, J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y bosques*. 1 (113): 25-34.
- Dupouey, J.L., G. Siguand, V. Bateau, A. Thimonier, J.F. Dhole, G. Nepveu, L. Bergé, L. Augusto, S. Belkacem C. 1999. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *C.R. Acad. Agric. Fr* 85 (6): 293-310.
- Espinoza-Domínguez, W., L. Krishnamurthy; A. Vázquez-Alarcón, A. Torres-Rivera. 2012. Almacén de Carbono en Sistemas Agroforestales con Café. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(1): 57-70.
- FAO. 1993. *Forest Resources Assessment 1990, Tropical Countries*. FAO Forestry Rome. 112 pp.
- FAO. 2002. *Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos No 96*. Roma.
- Faraht, E., S. Kamal; H. El-Kady, and A. Shalapy. 2012. Allometric equations to predict the total aboveground biomass of tree species in a planted forest in Egypt. *Feddes Repertorium* 123: 27–36
- Fonseca, W., F. Alice G, J. M. Rey B. 2009. Modelos para estimar la biomasa de las especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30(1):36-47.

- Francis, J. K. 2000. Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science* 36(3-4): 346-350.
- Franco, M. S. 2009. Estimación de la captura de carbono en las zonas forestales. El caso del parque Nacional Nevado de Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. 25 pp.
- González-Molina, L., J. D. Etchevers-Barra, C. Hidalgo-Moreno.2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia* (42):741-751.
- Goudie, A., 1990. *The Human Impact on the Natural Environment*. Basil Blackwell Ltd, Oxford, U.K. 3 Edition. 388 pp.
- Houghton, R. A., and C. M. Woodwell. 1989. Global climate change. *Sci. Am.* 260: 36-40.
- INEGI. 2006. Balance Nacional de Energía y su relación con el Inventario Nacional de Emisiones. Disponible en:
http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/especiales/revist-inter/num_1_2010/Doctos/RDE_Num01_Nov2010_Art06.pdf.
- International Geosphere Biosphere Program. 1998. The terrestrial cycle: implications for the Kyoto protocol. *Science* 280:1393-1394.
- IPCC. 2005. (Intergovernmental Panel on Climate Change). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas, informe de grupo de trabajo III del IPCC. OMM, PUMA. 66 pp.

- IPCC. 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Reino Unido.
- IPCC. 2000. *Land use, land-use change, and forestry special report*. Cambridge University Press. 377 pp.
- Isaza, D. J. F.; D. Campos R. 2007. *Cambio climático: Glaciaciones y calentamiento global*. Fundación Universitaria de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Primera edición. Impreso en Colombia. 350 pp.
- Jordan, C.F., C. Uhl. 1978. Biomasa of a “tierra firme” forest of the Amazon Basin. *Oecologia Plantarum* 13(4): 387-400.
- Klinge, H., R. Herrera. 1983. Phytomass structure of natural plant communities on spodosols in Southern Venezuela: The tall Amazon Caatinga Forest. *Vegetatio* 53: 65-64.
- Lashof, D. A., and D. R. Ahuja. 1990. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344: 529-531.
- Martínez, S. M. 2008. *Plan de manejo en el área forestal experimental ingeniero Mario Ávila Hernández “La Siberia”, Texcoco, Estado de México*. Tesis de profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. Universidad de Lleida, España. 216 pp.
- Masuhara, A. 2012. *Evaluación del Contenido de Carbono en Sistemas Agroforestales de Café en Huatusco, Veracruz, México*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. 159 pp.
- Melillo, J. M., D. O. Hall, and G. I. Ågren. 1996. Executive summary. In: *Global change: effects on coniferous forests and grasslands*. John Wiley. New York, NY, USA. 1-16 pp.

- Montero, M. M.; F. Montagnini. 2005. Modelos alométricos para a estimação de biomassa de diez espécies nativas em plantaciones em a região Atlântica de Costa Rica. *Recursos Naturales e Ambiente*. (45):.118-125
- Montoya, G., L. Soto, K. Ben de Jong, P. Nelson, P. Farías, T. J. Taylor, R. Tipper. 1995. Desarrollo Forestal Sustentable: Captura de Carbono en las Zonas Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas. Instituto Nacional de Ecología, Cuadernos de Trabajo 4. México, D.F.
- Ordoñez, D. J. A. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. Distrito Federal. México. 16 pp.
- Ordóñez, J. A. y O. Masera, 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*. 1 (7): 3-12.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45(4): 573-593.
- Poder Ejecutivo Federal, 2009. Programa especial de cambio climático 2008-2012. México. 29-30 pp.
- Ramírez, M. H. 1977. Estudio dasométrico de una plantación forestal en Chapingo. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 137 pp.
- Reyes, R. J.J.A. 1972. Evaluación de algunas propiedades del suelo bajo la plantación forestal con diferentes espaciamientos. Tesis profesional. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 133 pp.
- Robert, M. 1996. Aluminum toxicity a major stress for microbes in the environment. In Huang, P.M. Ed. *Environmental Impacts. Soil component interactions*. CRC press. (2): 227-242.

- Rodríguez-Laguna, A., R. Jiménez-Pérez, J. Aguirre-Calderón, Ó. A. Treviño-Garza, E. J. Razo-Zárate. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino encino en la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma Indígena de México, México. Ra Ximhai. Septiembre-diciembre. 3 (5): 317-327.
- Romahn, de la V. C. F.; H. Ramírez M. 2006. Dendrometría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. 295.
- Rügnitz, M. T.; M. Chacón L.; R. Porro .2009. Manual técnico no 11. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Centro Mundial de Agroforestería (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA).1. ed. Lima, Perú. 67 pp.
- Saldarriaga, J.G., D. C. West, M. L. Tharp, C. Uhl. 1988. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Río Negro of Colombia and Venezuela. *Journal of Ecology* 76: 938-958.
- Schlegel, B., J. Gayoso, J. Guerra. 2001. Manual de Procedimientos para Inventarios de Carbono en Ecosistemas Forestales. Medición de la Capacidad de Captura de Carbono en Bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Proyecto FONDEF D98I1076. 10 pp.
- Schneider, S. H. 1989. The greenhouse affect science and policy. *Science* 243: 271-281.
- Segura, C. M. A., P. Sánchez G., C. A. Ortiz S., M. C. Gutiérrez C. 2005. Carbono orgánico de los suelo de México. *Terra Latinoamericana* 1: 21-27
- Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis*, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Escuela de Ciencias Ambientales. 126 pp.

- SEMARNAT. 2001. México II Comunicación Nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio Climático. Comité Intersecretarial sobre Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología (INE). SEMARNAT. México, D. F.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Disponible en: [//www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Oficiales%20Mexicanas%20vigentes/NOM-021-RECNAT-2000.pdf). Consultada el 20 febrero del 2013.
- Senelwa, K., and R. E. H. Sims. 1998. Tree biomass equations for short rotation Eucalyptus grown in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 13: 133-140
- Shaver, G. R., and J. D. Aber. 1996. Carbon and nutrient allocation in terrestrial ecosystems. In: *Global change: effects on coniferous forests and grasslands*. John Wiley. New York, NY, USA. 183-198 pp.
- Starr, C.; R. Taggart. 2004. *Biología. La unidad y diversidad de la vida*. Editorial Thomson, decima edición. Impreso en México. 910 pp.
- Todd, M. J., A. Claudio, R. Zayra, L. Feng. 2009. México: Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono. Banco Mundial. Washington, DC, USA. 186 pp.
- Torres, R. J. M., y S. A. Guevara. 2005. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. Instituto Nacional de Ecología. http://www.ine.gob.mx/veajei/publicaciones/gacetas/63/psp3html?id_pub=361&id_tema=138_dir=consultas (Consulta: enero 5, 2013).
- Van Cleve, K., and R. F. Powers. 1995. Soil carbon, soil formation, and ecosystem development. p. 155-199. In: W.W. McFee and J. M. Kelly, (eds.). *Carbon*

forms and functions in forest soils. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.

Vera, C. J. A. G. 1981. Podas en las plantaciones de *Pinus michoacana* Mtz y *Pinus montezumae* Lamb. En (EEMA), Chapingo, México. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 98 pp.

Vitousek, P.M. 1994. Beyond global warming. Ecology and global change. Ecology 75(7): 1861-1876.

Walkley, A., and I. A. Black. 1934. An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. Soil Sci. 37: 29-3

Wattel-Koekkoek, E. 2002. Clay-associated organic matter in kaolinitic and smectitic soils. Tesis PhD. NL, Wageningen Agricultural University. 120 pp.

White, R. 2006. Principles and practice of soil science. The soils as a natural resource. 4th ed. Oxford, UK, Blackwell Publishing. 212 pp.

Zech, W.; N. Senesi, G. Guggenberger, K. Kaiser, J. Lehmann, T. Miano, A. Miltner, G. Schrot. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. Geoderma 79:117-161.