

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**COORDINACIÓN GENERAL DE ESTUDIOS DE
POSGRADO**

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO DEL BOSQUE
DE LA ESTACIÓN FORESTAL EXPERIMENTAL ZOQUIAPAN

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA:

JIMÉNEZ ANTONIO SONIA



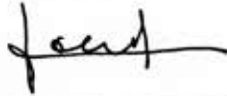
DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Chapingo, México. Febrero de 2017



La tesis intitulada: **Estimación del potencial de captura de carbono del bosque de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan**, realizada por **Sonia Jiménez Antonio**, bajo la dirección del **Dr. José Luis Romo Lozano** y del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES



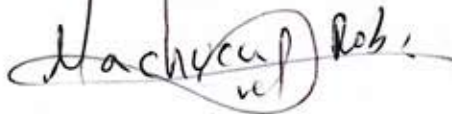
DIRECTOR: _____

Dr. José Luis Romo Lozano



ASESOR: _____

Dra. M. Amparo Borja de la Rosa



ASESOR: _____

Dr. Roberto Machuca Velasco



ASESOR: _____

M.C. René D. Martínez Bravo

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para realizar los estudios de Posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo por proporcionarme los conocimientos necesarios para forjarme como profesionista.

A la Coordinación de Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales por el apoyo brindado para la culminación de esta investigación.

A los profesores del posgrado y de otros departamentos, por el conocimiento brindado.

A los miembros que conforman el comité por sus valiosas aportaciones en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. José Luis Romo Lozano por toda su ayuda y los grandes aportes brindados.

Al M.C. René D. Martínez Bravo por las contribuciones y su asesoría en el manejo del modelo de simulación utilizado.

A mis compañeros de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, generación otoño 2014-2016.

DATOS BIOGRÁFICOS

Sonia Jiménez Antonio estudió la carrera de Ingeniería Forestal en la Universidad Autónoma Chapingo, egresando en el 2010. Posteriormente trabajó como Prestador de Servicios Técnicos en la empresa INyDES en Texcoco, Edo. de México. Más tarde laboró como evaluador de reforestaciones forestales en los estados de Oaxaca y Chiapas, como parte del equipo de trabajo del Centro de Educación Continua de la UACH. En agosto 2014 comenzó a estudiar la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo, concluyéndola en junio de 2016.

RESUMEN

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO DEL BOSQUE DE LA ESTACIÓN FORESTAL EXPERIMENTAL ZOQUIAPAN

Jiménez-Antonio Sonia¹, Romo-Lozano, José Luis ²

La emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera debida principalmente a la quema de combustibles fósiles ha generado que la temperatura de la Tierra se eleve, causando el cambio climático global. El bióxido de carbono (CO₂) es el GEI que se encuentra en mayor cantidad en la atmósfera por lo que es considerado el más importante. Los bosques y masas forestales en general, son considerados almacenes de CO₂ ya que a través de la fotosíntesis lo incorporan a sus procesos metabólicos y lo almacenan como parte de sus estructuras vegetales. Conocer el potencial con que cuentan un bosque en particular es decisivo para implementar un manejo adecuado que contribuya a maximizar este potencial. En el presente estudio se utilizó el modelo de simulación CO2FIX para calcular el potencial de captura de carbono del bosque de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, para ello, se tomaron en cuenta cinco clases de cobertura vegetal: Bosque de Pino, Bosque de Oyamel, Bosque de Pino-Oyamel, Bosque de Pino-Aile y Bosque de Encino-Pino. Los resultados muestran que el área de estudio puede almacenar hasta 1,300.91 Megagramos (Mg) de carbono por hectárea, en un periodo de simulación de 100 años y un escenario de conservación, siendo el Bosque de Oyamel el que arrojó el valor más alto con 374.36 MgC/ha, mientras que la masa pura de Pino tuvo el valor más bajo con 121.03 MgC/ha. Finalmente, se obtuvo que en las 1,585.58 ha cubiertas con vegetación arbórea de Zoquiapan se tiene un potencial de captura de 306, 690.48 MgC/ha en la vegetación arbórea al término del periodo de 80 años.

Palabras clave: Gases de efecto invernadero, almacén de carbono, potencial de captura, cobertura vegetal, CO2FIX

¹ Tesista, ² Director de tesis

ABSTRACT

ESTIMATION OF THE CARBON CAPTURE POTENTIAL OF THE ZOQUIAPAN EXPERIMENTAL FOREST STATION FOREST

Jiménez-Antonio Sonia¹, Romo-Lozano, José Luis²

The emission of greenhouse gases (GHG) into the atmosphere due mainly to the burning of fossil fuels has caused the temperature of the Earth to rise, causing global climate change. Carbon dioxide (CO₂) is the most abundant GHG in the atmosphere and is considered the most important. Forests and forest masses in general are considered CO₂ stores because through photosynthesis they incorporate it into their metabolic processes and store it as part of their plant structures. Knowing the potential of a particular forest is decisive to implement an appropriate management which contributes to maximize this potential. In this study, the CO2FIX simulation model was used to calculate the carbon capture potential of the forest of the Experimental Forest Station Zoquiapan. Five types of vegetation cover were taken into account: Pine, Oyamel, Pino-Oyamel, Pine-Aile and Encino-Pine. The results show that the study area can store up to 1,300.91 Mg of carbon per hectare in a simulation period of 100 years and a conservation scenario, with the Oyamel Forest being the highest value with 374.36 MgC / Ha, while the pure pine mass had the lowest value at 121.03 MgC / ha. Finally, it was obtained that the total forest within the forest station (1,585.58 ha) has a potential for carbon sequestration of 306, 690.48 MgC/ha in the tree vegetation during a period of 80 years.

Key words: Greenhouse gases, carbon storage, potential for carbon sequestration, vegetation cover, CO2FIX

¹ Author

² Thesis advisor

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 El problema del cambio climático.....	4
3.2 Gases de Efecto Invernadero	4
3.2.1 Dióxido de carbono CO ₂	6
3.2.2 Metano CH ₄	6
3.2.3 Óxido Nitroso N ₂ O	7
3.3 El ciclo del carbono	7
3.4 Sumideros de CO ₂	9
3.4.1 Océano.....	9
3.4.2 Suelo	10
3.4.3 Vegetación.....	10
3.5 Potencial de México para la captura de carbono	11
3.6 Métodos Destructivos para Calcular Contenido de Carbono en Bosques	12
3.6.1 Ecuaciones Alométricas y Métodos destructivos	12
3.7 Modelos para analizar flujos de Carbono.....	16
3.7.1 Modelo de Simulación CO2FIX.....	17
3.7.2 Medición de Captura de Carbono por medio del modelo de simulación CO2FIX en México.....	19
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
4.1 Descripción del área de estudio.....	21
4.2 Clima	22
4.3 Suelos	22
4.4 Topografía	22
4.5 Vegetación	22
4.5.1 <i>Pinus hartwegii</i>	23
4.5.2 <i>Pinus montezumae</i>	23
4.5.3 <i>Abies religiosa</i>	23
4.5.4 <i>Alnus jorullensis</i>	23
4.5.5 <i>Quercus sp.</i>	23

4.6	Metodología.....	24
4.6.1	Determinación de los Tipos de Cobertura.....	24
4.6.2	Estimación del potencial de captura de carbono.....	25
4.6.3	Búsqueda de Parámetros.....	26
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5.1	Tipos de Cobertura.....	28
5.2	Parámetros por cobertura vegetal.....	31
5.3	Potencial de captura por tipo de vegetación.....	32
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
7.	LITERATURA CITADA.....	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. GEI más importantes y sus fuentes principales de emisión.....	5
Cuadro 2. Especies presentes en el estrato arbóreo.....	23
Cuadro 3. Coberturas vegetales obtenidas.....	28
Cuadro 4. Parámetros por tipo de cobertura.....	31
Cuadro 5. Datos de parámetros y sus fuentes.....	32
Cuadro 6. Contenido de carbono por cobertura vegetal.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo del carbono.....	8
Figura 2. Módulos del modelo CO2FIX	18
Figura 3. Ubicación del área de estudio.....	21
Figura 4. Mapa de vegetación de la EFEZ.....	24
Figura 5. Módulo de biomasa del modelo CO2FIX.....	27
Figura 6. Asociación de Pino.....	28
Figura 7. Asociación de Oyamel.....	29
Figura 8. Asociación de Pino-Oyamel.....	29
Figura 9. Asociación de Pino-Aile	30
Figura 10. Asociación de Encino-Pino.....	30
Figura 11. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Pino.....	32
Figura 12. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Oyamel.....	33
Figura 13. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Pino-Oyamel.....	34
Figura 14. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Encino-Pino.....	34
Figura 15. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Pino-Aile.....	35

SIGLAS

CMNUCC Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

GEI Gases de Efecto Invernadero

Gt Gigatoneladas

CO₂ Dióxido de Carbono

CH₄ Metano

N₂O Óxido Nitroso

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations

EFEZ Estación Forestal Experimental Zoquiapan

LUC Cambio de Uso del Suelo

ppb Partes por Mil Millones

SEMARNAT Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

GtC Gigatoneladas de Carbono

MtC Megatoneladas de Carbono

MgC Megagramos de carbono

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la preocupación por el cambio climático ha ido en aumento y es un problema real que ha causado enormes impactos en materia ambiental, social y económica. Es un problema global que ha sido tratado por los expertos de todo el mundo. Estos han concluido que el clima cambia, debido a causas naturales y a causas de origen antropogénico (Díaz, 2012).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) lo define como “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” (Allwood, 2014).

Entre las consecuencias más notables del cambio climático se encuentran, el calentamiento global, el aumento de temperatura, elevación del nivel del mar (Henríquez, 2016), en muchas regiones, las cambiantes precipitaciones o el derretimiento de nieve y hielo están alterando los sistemas hidrológicos. Así mismo, muchas especies terrestres y marinas han modificado sus áreas de distribución geográfica, rutas migratorias, tamaño de su población e interacciones con otras especies (IPCC, 2014).

La principal causa del cambio climático es el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, los llamados GEI (Ruiz, 2011; Flores, 2010). Los GEI's emitidos a la atmósfera en mayor concentración son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2014; Flores, 2010), siendo el primero de estos el que contribuye en mayor medida a agravar las consecuencias del cambio climático, puesto que su concentración en la atmósfera es mayor que la de otros gases. Es por ello que las opciones de mitigación están asociadas a la reducción del consumo de carbono principalmente (Ruiz, 2011).

En este contexto, los bosques de todo el mundo juegan un papel muy importante para contribuir a la disminución del efecto invernadero, ya que a través de la fotosíntesis, absorben el CO₂ de la atmósfera y lo almacenan en cada uno de sus compartimentos (tallos, hojas, ramas, raíces) en forma de carbono. Aproximadamente el 80% del carbono que se intercambia entre los suelos y la vegetación con la atmósfera se lleva a cabo en los bosques (Pardos, 2010) y tomando en cuenta que el área forestal total en el mundo es de 4 mil millones de hectáreas y que estos almacenan alrededor de 289 gigatoneladas (Gt) de carbono (FAO, 2010), los convierte en grandes protagonistas en el tema del cambio climático.

Estimar el contenido de carbono en diversos ecosistemas es relevante para determinar su capacidad de retención y, en su caso, facilitar la toma de decisiones sobre el manejo más adecuado que contribuya a maximizar la cantidad de carbono almacenado. Para calcular el contenido de carbono en los bosques, se han desarrollado métodos directos e indirectos y, aunque algunos autores señalan que los métodos directos son más precisos, estos tienen la desventaja de requerir procedimientos destructivos que pueden ser sumamente costosos y requerir demasiado tiempo en su realización (Ruíz-Díaz *et al.*, 2014). Por otro lado, los métodos indirectos permiten realizar mediciones sin alterar el ecosistema en el cual se realiza el estudio. Entre los métodos indirectos se pueden mencionar las ecuaciones y modelos matemáticos, imágenes de satélite y modelos de simulación como el CO₂FIX.

El modelo de simulación CO₂FIX es una herramienta que cuantifica los almacenes y flujos de carbono en la biomasa forestal, así como en la materia orgánica del suelo y los productos de madera. Es apto para medir los reservorios y flujos de carbono en el sistema de manera confiable (Álvarez y Rubio, 2013), además, tiene la ventaja adicional de que su uso es fácil y de bajo costo, para alimentarlo se requiere de parámetros relativamente fáciles de conseguir y no provoca disturbios en el área evaluada.

En el caso de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), ubicada dentro del Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan y dentro de dos zonas prioritarias para la conservación de la biodiversidad, aparte de ser un área significativa para la enseñanza e investigación de la Universidad Autónoma Chapingo y de otras universidades, es importante contar con información detallada sobre los beneficios ambientales que brinda y conocer su potencial de captura de carbono es vital para la toma de decisiones futuras en relación con su manejo forestal y las prácticas silvícolas adecuadas que contribuyan a maximizar este potencial.

2. OBJETIVOS

General

Estimar el potencial de captura de carbono de la vegetación arbórea del bosque de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan.

Particulares

- Estimar la captura potencial de carbono del bosque de la EFEZ a través del tiempo.
- Evaluar la captura de carbono bajo un escenario de conservación por medio del modelo de simulación CO₂FIX.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 El problema del cambio climático

Tal como lo define el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2014), este fenómeno se caracteriza por un cambio en los patrones de clima que permanece por largos periodos de tiempo. Sus causas pueden ser naturales o provocadas por las actividades humanas, como la emisión de CO₂ y otros gases a la atmósfera (óxido de nitrógeno, metano, clorofluorocarbonados), todos ellos originados de actividades humanas principalmente la quema de combustibles fósiles (gas y petróleo), cambios de uso del suelo, tala y deforestación, disturbios forestales (incendios) y producción de cemento (Ordoñez, 2008). Este fenómeno tiene un sinnúmero de efectos y consecuencias en distintos procesos naturales del planeta, entre los principales se pueden mencionar; mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, cambios en los patrones de temperatura y precipitación (Bonilla-Cárdenas *et al.*, 2012), expansión de los desiertos, el derretimiento de los polos y el consecuente aumento del nivel del mar, entre otros.

3.2 Gases de Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero, los llamados GEI, son producto de las actividades humanas, específicamente de la quema de combustibles fósiles como el gas natural y el petróleo. Estos gases provocan que la superficie y la parte inferior de la atmósfera se calienten, pues detienen la radiación infrarroja a nivel de la atmósfera (Echeverri, 2006), dando lugar al fenómeno conocido como efecto invernadero.

Los principales GEI emitidos a la atmósfera son el CO₂, NH₄ y N₂O, sin embargo, el CO₂ es considerado el más importante debido a que es el gas de origen antropogénico que más se produce. Por otra parte, el vapor de agua, a pesar de ser el componente de la atmósfera que más contribuye al efecto invernadero, no

se considera en las medidas de mitigación porque su concentración atmosférica no está relacionada directamente con las actividades humanas (Sapiña, 2006).

Cuadro 1. GEI más importantes y sus fuentes principales de emisión

Fuente: (Echeverri, 2006; Carmona, 2005)

Gas	Fuente Principal	Contribución al cambio climático (%)
Dióxido de carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión de combustibles fósiles • Deforestación 	55
Metano	<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura • Pantanos • Gas y petróleo 	15
Óxido nitroso	<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura • Quema de biomasa • Fertilizantes • Quema de combustibles fósiles 	6

A partir del inicio de la revolución industrial del siglo XIX, la concentración de los GEI en la atmósfera se ha incrementado de manera alarmante sobre todo en las últimas décadas (Pardos, 2010). En México, los principales sectores que emiten GEI a la atmósfera son los de transporte (44%) e industrias de la transformación de la energía (33%), (Flores-Velázquez, 2010). Por otro lado, Ruiz (2011), menciona que en el año 2002, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso representaron el 99% de las emisiones en el país.

3.2.1 Dióxido de carbono CO₂

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de origen natural, subproducto de la combustión de combustibles fósiles procedentes de depósitos de carbono de origen fósil, como el petróleo, el gas o el carbón, de la combustión de biomasa, y de los cambios de uso del suelo (LUC) y otros procesos industriales como la producción de cemento. Está considerado como el principal gas de efecto invernadero (GEI) antropógeno que afecta al equilibrio radiativo de la Tierra. Es el gas utilizado como referencia para medir otros GEI, por lo que su potencial de calentamiento global (PCG) es igual a 1 ((Allwood, 2014).

Después de la Revolución Industrial su concentración atmosférica aumento de 280 a 360 ppm (Granados, 2004), alcanzando un promedio de 379 ppm en 2005 (IPCC, 2007) y se prevé que al ritmo actual de emisiones, su concentración aumentará drásticamente en los próximos 100 años, teniendo repercusiones directas sobre el nivel y eficiencia del proceso de fotosíntesis y el uso del agua, afectando la productividad de los organismos vegetales (IPCC, 2002), y su potencial de captura.

3.2.2 Metano CH₄

Es el componente principal del gas natural, y está asociado a todos los hidrocarburos utilizados como combustibles y sus principales fuentes son la agricultura y la ganadería (Allwood, 2014), especialmente a través de los animales rumiantes y la producción de arroz (IPCC, 1996). Naturalmente se produce por la descomposición anaeróbica de la materia orgánica en pantanos, arrozales e incluso, en el océano, que producen algunas bacterias.

En los últimos años, su concentración ha ido en aumento y algunos autores señalan que puede ser incluso más contaminante que el CO₂, pues una molécula de metano absorbe energía de la radiación infrarroja en una cantidad que es 23 veces mayor a la de una molécula de dióxido de carbono. Se calcula que aproximadamente 500 millones de toneladas métricas de CH₄ se desprenden a la atmósfera cada año (Carmona *et. al.*, 2005)

3.2.3 Óxido Nitroso N₂O

Es uno de los seis gases de efecto invernadero más importantes por la cantidad que se emite a la atmósfera, sus principales fuentes antropógenas son la agricultura, la ganadería, el tratamiento de aguas residuales, la quema de combustibles fósiles y los procesos industriales químicos. De manera natural se produce por la acción microbiana en los bosques tropicales húmedos (Allwood, 2014; Garzón y Cárdenas, 2013). El potencial de calentamiento de este gas es 298 veces mayor que el CO₂ en un periodo de 100 años (Solomon *et al.*, 2007) y su concentración en la atmósfera ha aumentado 9% desde los inicios de la Revolución Industrial, pasando de 270 a 318 ppb (partes por mil millones) (IPCC, 2007; Sapiña, 2006).

3.3 El ciclo del carbono

El carbono es el cuarto elemento más abundante en el universo y en nuestro planeta, el 98.6% se encuentra en rocas sedimentarias, mientras el resto está contenido en la atmósfera, océanos, plantas, suelos, seres vivos, combustibles fósiles y compuestos disueltos (Sapiña, 2006; FAO, 2011). Entre cada uno de estos reservorios existe un intercambio, de uno a otro, mediante el ciclo del carbono y cuando en la atmósfera hay mayor cantidad de este elemento, la temperatura de la tierra aumenta, sin embargo, el equilibrio durante este ciclo es el que permite que la temperatura del planeta se mantenga estable (Riebeek, 2011).

Existen dos fases que se llevan a cabo durante el ciclo del carbono; la primera es la fase biológica o ciclo rápido y es en donde intervienen los seres vivos: las plantas absorben el CO₂ de la atmósfera y lo utilizan para construir sus estructuras vegetales como tallos, hojas, raíces, flores, frutos y semillas, a través de la fotosíntesis. De esta manera puede permanecer durante mucho tiempo, ya sea en la madera o en la hojarasca del suelo, o puede regresar a la atmósfera

por la respiración y digestión de los animales herbívoros, o por la descomposición de sus desechos y de los restos vegetales y la hojarasca.

La segunda es la fase biológica o ciclo lento, en la cual el CO_2 de la atmósfera se disuelve en el océano para transformarse en bicarbonatos que se mezclan con el calcio para formar grandes acumulaciones de piedra caliza. Así, el carbono se integra a la corteza terrestre y se almacena durante largos periodos de tiempo hasta que la disolución de las rocas calizas o la actividad de los volcanes lo libera a la atmósfera en forma de gas, es decir, como bióxido de carbono, cerrando de esta manera el ciclo rápido (SEMARNAT, 2009).

En la figura 1, se observa el flujo que sigue el carbono a través de la atmósfera, el suelo y los océanos.

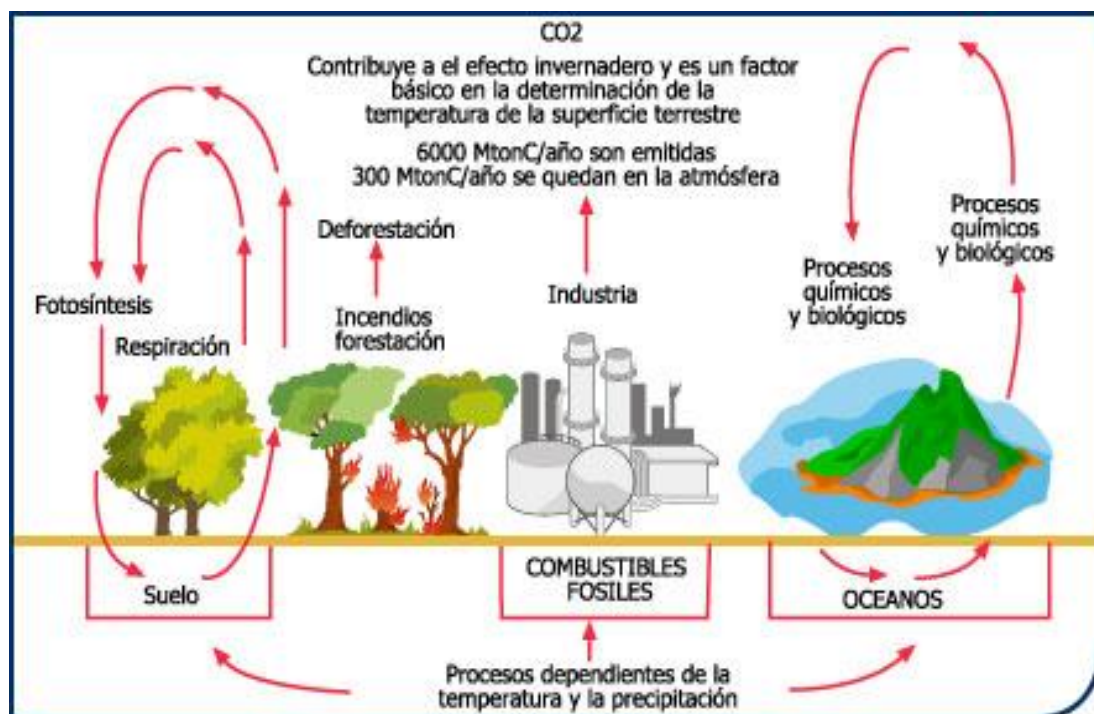


Figura 1. El ciclo del carbono

Fuente: PDVSA, 2005

3.4 Sumideros de CO₂

Se considera como sumidero cualquier proceso, actividad o mecanismo que sustrae de la atmósfera un gas de efecto invernadero, aerosol o un precursor de cualquiera de ellos (Allwood, 2014), los océanos, los suelos y los bosques, son sumideros naturales de CO₂. En 2005, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático informó que entre los años 1750 y 2011, se generaron 555 Gigatoneladas de Carbono (GtC) provenientes de actividades antropogénicas como la quema de combustibles fósiles y la elaboración de cemento. De estas emisiones, 240 GtC se almacenaron en la atmósfera, 155 en los océanos y 160 GtC en ecosistemas terrestres naturales.

3.4.1 Océano

Los océanos representan uno de los principales depósitos de carbono y juegan un papel preponderante porque absorben parte del bióxido de carbono antropogénico que se emite a la atmósfera cada año (IPCC, 1997), se estima que aproximadamente el 50% del carbono presente en la atmósfera se procesa en los mares y océanos (Nellemann *et al.*, 2009) y tomando en cuenta que los océanos cubren más del 70% de la superficie terrestre, los convierte en un recurso con fuerte potencial como sumidero de CO₂ (IPCC,2005).

El ciclo inicia cuando el CO₂ que se encuentra disponible en el aire, entra en contacto con la superficie de los océanos y se disuelve en el agua formando carbono inorgánico disuelto, distribuyéndose por medio de las corrientes marinas, una porción es consumida por el fitoplancton, el cual lo utiliza para crecer y la otra parte se almacena en los sedimentos y rocas, quedándose atrapado durante mucho tiempo. (Nellemann *et al.*, 2009; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2009), este intercambio entre la atmósfera y los océanos se produce hasta que se alcanza un equilibrio. De ésta manera, cuando el contenido de bióxido de carbono en la atmósfera aumenta, el océano absorbe más CO₂, por lo que se calcula que su intensidad de absorción es de aproximadamente 7 Gt de CO₂ al año (IPCC, 2005).

No obstante, la absorción excesiva de CO₂ en los océanos ha provocado la disminución del pH en 0.1 unidades, aumentado su acidez, ya que han absorbido alrededor del 30% del bióxido de carbono antropogénico (IPCC, 2013) y se prevé que si esta acidez aumenta, se afectaría de manera negativa a los organismos marinos y a las especies que dependen de ellos (IPCC, 2007).

3.4.2 Suelo

A nivel mundial, el suelo almacena dos veces más carbono que la atmósfera y casi el doble de la cantidad almacenada en la vegetación, por lo que es considerado el segundo “sumidero” más importante, después de los océanos. El carbono orgánico de este reservorio constituye aproximadamente dos tercios del carbono contenido en los ecosistemas terrestres (Pardos, 2010) y la capacidad de almacenamiento depende de las propiedades del suelo y su uso (Pérez-Ramírez *et al.*, 2013), por ejemplo, los suelos forestales contienen más carbono que un suelo degradado.

En forma natural el carbono se incorpora al suelo por el aporte continuo de material orgánico de origen vegetal en forma de detritus o de humus (material descompuesto), mientras que en los suelos cultivados, este aporte proviene de los restos de cosecha (Martínez *et al.*, 2008; Figueroa & Redondo, 2007). Así, la cantidad de carbono que se almacena en los suelos depende del balance entre la incorporación de material vegetal muerto y las pérdidas de los procesos de descomposición y mineralización (FAO, 2007).

3.4.3 Vegetación

A través de la fotosíntesis, las plantas de los ecosistemas terrestres incorporan el carbono atmosférico a sus procesos metabólicos, lo fijan y lo mantienen almacenado como parte de sus estructuras: fuste, follaje, ramas, flores, etc. (Flores, 2012; Ordoñez, 2008; IPCC, 1997), se calcula que aproximadamente el

50% de la biomasa seca del componente leñoso de las plantas es carbono (Becerril-Piña *et al.*, 2014).

La cantidad de carbono que las plantas pueden almacenar depende de una serie de características como son; tipo y composición de especies, estructura y clases de edad, concentraciones de CO₂ en la atmósfera, temperatura, y en menor medida, de la humedad y la disponibilidad de nutrientes (IPCC, 1997, Pardo, 2010). De la misma manera, las plantas y bosques en crecimiento son capaces de absorber mayor cantidad de dióxido de carbono que los bosques maduros, que solo retienen el carbono fijado pero no pueden absorber más (Mendizábal-Hernández *et al.*, 2008).

De manera general, las masas forestales (bosques, selvas, vegetación xerófila y ribereña) juegan un papel importante en la fijación y retención del carbono emitido antrópicamente a la atmósfera (Rojo-Martínez *et al.*, 2013), de estos ecosistemas, los bosques son los que mayor cantidad de carbono contienen (Pardo, 2010). Por otro lado, a través de la respiración, la descomposición y la combustión, se libera carbono a la atmósfera, por lo que es importante conservar el carbono una vez que se ha almacenado.

3.5 Potencial de México para la captura de carbono

México es uno de los países con gran diversidad biológica, se encuentra dentro de los cinco países denominados “megadiversos”, y entre los doce que albergan entre 60 y 70% de la diversidad biológica conocida del planeta, la mayoría de los tipos de vegetación terrestres están presentes en nuestro país y otros solamente se encuentran dentro de su territorio (Sarukhan & Dirzo, 1992; Mendizábal-Hernández, 2008). Sus bosques se clasifican en cuatro ecosistemas principales (Mendizábal-Hernández *et al.*, 2008):

- Ecosistemas de clima árido y semiárido
- Ecosistemas de clima templado-frío

- Ecosistemas de clima cálido húmedo y,
- Ecosistemas de clima cálido-seco

Torres y Guevara (2002), estimaron que el país tiene la capacidad de almacenar 13, 238, 371 toneladas de CO₂ por año solo en el caso de los bosques, 11, 092, 781 en las selvas y 182, 538 toneladas por año en las plantaciones, lo que da un total de 24, 513, 690 toneladas totales de CO₂ por año.

3.6 Métodos Destructivos para Calcular Contenido de Carbono en Bosques

En México se han hecho numerosos trabajos para estimar el contenido de carbono en bosques, en la mayoría de estos, construyendo ecuaciones alométricas por medio de métodos destructivos. Entre ellos, se encuentran los siguientes:

3.6.1 Ecuaciones Alométricas y Métodos destructivos

- En 2013, Douterlungne *et al.*, construyeron ecuaciones alométricas que permitieran estimar la biomasa aérea de árboles tanto jóvenes como adultos en La Selva Lacandona en Chiapas. Se muestrearon 103 árboles y se les midió el diámetro a la altura del pecho y a la base. Posteriormente se derribaron y se procedió a medir la altura y la relación peso seco-peso fresco. Se usaron 12 ecuaciones para 4 especies diferentes y se determinó que no sobreestimaron ni subestimaron sistemáticamente a las observaciones realizadas. Tuvieron valores de r^2 de 90% o más, residuales estándares y errores relativos menores a 1 y 10%. De igual forma, se determinó que los modelos con términos cuadráticos o cúbicos son útiles y que los mejores predictores de la biomasa aérea son los diámetros en este caso.
- Méndez-González *et al.*, 2011, calcularon los incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación ubicada en Jerécuaro, Guanajuato,

México, mediante ecuaciones alométricas cuantificando acumulación de biomasa, carbono y CO₂. El estudio se realizó en una plantación de 12 años de edad conformada por *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus*. Se usó una muestra de 20 árboles por especie, de buena conformación y representativos para el diámetro y la altura, y se tomaron datos de estas dos variables. Cada árbol se desintegró en ramas, hojas y fuste y se pesó estando aún verde, después de secaron muestras de cada una de estas partes en laboratorio para determinar su relación peso fresco/peso seco. En el fuste se realizaron análisis troncales, analizados con el programa WinDendro y procesadas con Xlstem. Se usaron 9 ecuaciones alométricas y se ajustaron con el método de cuadrados mínimos y se evaluaron con coeficiente de determinación y error estándar. El CO₂ fijado en la biomasa seca se obtuvo con el producto del peso seco y el coeficiente resultante de la relación entre el peso de la molécula de CO₂ y el peso del átomo de carbono. Los resultados muestran que el a los 12 años de edad, *Pinus devoniana* tuvo un diámetro entre 13 y 23, altura entre 5.6 y 10 y *P. pseudostrobus* diámetros entre 14.5 y 27 y altura entre 7.4 y 12.6. Los aumentos medios anuales fueron 1.53 y 1.56 cm/año en diámetro y 67.67 y 81.83 cm/año en altura, en *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*. Con los datos del inventario y los modelos alométricos se obtuvo una biomasa aérea total de 39.36 t ha, que corresponde a 19.68 tC/ha y 72.02 tCO₂/ha. La máxima productividad de la biomasa aérea para estas especies se alcanzó a los 20 años de edad, con valores de 3.96 t ha⁻¹año⁻¹ para biomasa, 1.98 t ha⁻¹año⁻¹ para carbono y 7.27 t ha⁻¹año⁻¹ para carbono equivalente.

- Acosta *et al.*, 2002, realizaron un estudio para generar modelos alométricos que estimaran la biomasa aérea total de seis especies arbóreas dominantes de los bosques mesófilos de montaña de la Sierra Norte de Oaxaca, esto a partir de datos del diámetro a la altura del pecho. Se generó un modelo para cada una de las especies para compararlas y

analizar la posibilidad de usar una sola de ellas para varias especies. Las especies seleccionadas fueron *Clethra hartwegii*, *Rapanea myricoides*, *Alnus glabrata*, *Liquidambar macrophylla*, *Inga sp.* y *Quercus peduncularis*, por ser las más abundantes de la zona. Mediante muestreo destructivo se midieron y cortaron de 5 a 12 individuos, antes, se les midió el diámetro a la altura del pecho. Los árboles con diámetros menores a 10 cm., se colectaron completamente para obtener su biomasa en laboratorio y de los de mayor tamaño solo se obtuvieron submuestras. En laboratorio se calculó la relación peso seco: peso fresco del tronco y copa a diferentes alturas, para conocer el peso seco total del árbol y por ende, su biomasa total. El modelo original de relaciones alométricas usado fue $Y=bX^k$. El modelo propuesto tuvo un valor alto de determinación con una $R^2 > 0.97$ para el total de las especies del estudio pero no fue posible ajustar la misma ecuación alométrica para estimar la biomasa de todas juntas. Sin embargo, se pudo sub-agrupar a las especies de acuerdo a su tamaño, con tres especies en cada subgrupo, y se ajustó una ecuación para cada uno, con coeficientes de determinación de 0.99 y 0.98, respectivamente.

- Pompa-García y Yerena-Yamalliel (2014) midieron la concentración de carbono en corteza, raíz, fuste, yema, ramas y hojas de *Pinus cembroides* en bosques naturales de la Sierra Madre Occidental en el estado de Chihuahua. Para el análisis se tomó una muestra de 8 individuos, uno por cada categoría diamétrica. De cada uno de los árboles seleccionados, se extrajeron 250 gr de peso en verde de cada componente a analizar. Después estas muestras se secaron en laboratorio y se pulverizaron. La concentración de carbono se obtuvo con un equipo Solids TOC Analyzer el cual analiza muestras sólidas por medio de la combustión a una temperatura de 900° C. Se realizaron aproximadamente 3 repeticiones por muestra para que la desviación estándar no rebasara 0.6 de concentración. Los resultados se analizaron en un diseño completamente al azar con un análisis de Varianza en SAS para determinar las diferencias

estadísticas significativas, esto es, cuando el p-valor es menor o igual a 0.05. Cuando se encontraron diferencias, se hizo una prueba de comparación de medias de Tukey. También se realizó una prueba de correlación PROC CORR para determinar la asociación estadística ($P \leq 0.05$) de la concentración de carbono, respecto al compartimento analizado. Los promedios de concentración tuvieron variación de 47.7% hasta 57.1%. Resultó que la concentración en los compartimentos es estadísticamente significativa. Las concentraciones de carbono más altas se observó en los compartimentos de yema y hoja. Una de las importancias de este trabajo es que normalmente se asume que las concentraciones por compartimento son de 50% y al no ser así, como en este caso, se sobre-estima de 0.9% para la corteza, 1.0% para la raíz, 2.3% para el fuste y 2.2 % para la rama. De forma contraria se hicieron sub-estimaciones de 7.1% para el caso de la yema y de 1.3% para la hoja, al menos para el caso de *Pinus cembroides* pues estas concentraciones dependen de la especie la edad y las condiciones ecológicas en las que se desarrolla. En base a estos resultados, se puede deducir que la especie en cuestión, es una buena alternativa para programas de reforestación con fines de captura de carbono pues es resistente a la sequía y se desarrolla en lugares accidentados e irregulares.

- Razo-Zárate *et al.*, 2013, estimaron la biomasa y el carbono almacenado en oyameles que se quemaron en el Parque Nacional “El Chico”, en Hidalgo. Se midieron árboles muertos (112), árboles adultos vivos (28) y renuevo (4, 515). El estudio se realizó después de 12 años del incendio en un área de 30.34 tomándose una muestra de 5%. Se usó como base el inventario del parque y se calcularon las variables de interés a partir de datos de diámetro y altura. Para estimar la biomasa se tomó en cuenta la densidad del oyamel que es de 360 kg/m³. De los resultados se desprende que los árboles muertos en pie están dentro de categorías diamétricas de 15, 30 y 35 cm. El mayor número de árboles adultos que lograron

sobrevivir al siniestro muestran categorías diamétricas de 35 cm, 45 cm y 60 cm. Para el renuevo natural, se han establecido 3010 árboles por hectárea en categorías diamétricas de 5 y 10 cm. La biomasa estimada en los árboles muertos, arbolado vivo y renuevo de oyamel, se realizó con el modelo en su forma potencial, mostrando un buen ajuste con un coeficiente de determinación de $R^2= 0.99$. Para el contenido de carbono, se multiplicó la cantidad de biomasa obtenida por la concentración de carbono del oyamel que es de 0.45. En conclusión, en las 30.34 ha se tiene una biomasa de 41.20 t/ha para los árboles muertos en pie, con 18.54 t de carbono por ha, para los árboles vivos una biomasa de 7.51 t/ha y 3.38 t/ha de carbono, mientras que el renuevo tuvo 9.8 t/ha de carbono. De aquí se desprende que 665.05 t de carbono no se consumieron por el fuego y no fueron liberadas a la atmósfera. Finalmente, se generó la ecuación $B=0,06463*DN^{2,3832}$ para estimar biomasa en árboles de *Abies religiosa* en áreas afectadas por incendios y $C=0,029083*DN^{2,38322}$ para estimar carbono bajo las mismas condiciones.

3.7 Modelos para analizar flujos de Carbono

En la actualidad se han desarrollado distintos modelos que cuantifican y simulan tanto la acumulación, como los flujos de carbono que existen en una determinada área, dependiendo de las condiciones específicas de cada sitio. Estos modelos tienen diferencias en cuanto al enfoque que se le da dentro del ciclo del carbono, los parámetros que se requieren para alimentarlos, los resultados que pueden obtenerse y la facilidad para poder usarlos.

Dentro de estos modelos se puede nombrar al modelo de simulación CO2FIX, el cual es un software libre que puede descargarse directamente de su página de internet y es de fácil manejo para el usuario sin mucha experiencia. Fue desarrollado originalmente como parte del proyecto CASFOR II (Carbon Sequestration in Afforestation and Sustainable Forest Management).

3.7.1 Modelo de Simulación CO2FIX

El modelo de simulación CO2FIX es una herramienta que cuantifica los almacenes y flujos de carbono en la biomasa forestal, en la materia orgánica del suelo y los productos maderables, calculando el balance de carbono en segmentos de tiempo de 1 año, el dato básico que se ingresa es el crecimiento en volumen del tallo y los correspondientes patrones de distribución a los otros compartimentos del árbol, que son el follaje, ramas y raíces. El carbono almacenado en la biomasa viva es calculado como el balance entre el crecimiento por un lado y la rotación, mortalidad y cosecha por el otro. El nivel que maneja es el ecosistema, mostrando los resultados en forma tabular y gráfica.

CO2FIX distingue cuatro tipos de compartimientos de biomasa del árbol: tallo (incluyendo corteza), follaje, ramas y raíces. Para simular el crecimiento en biomasa, el modelo usa como insumo la tasa de crecimiento de volumen en el tallo (incremento anual bruto), el cual puede ser derivado de las tablas de crecimiento. Desde esta tasa de crecimiento de los volúmenes del tallo, se calculan las tasas de crecimiento para el follaje, ramas y raíces, usando coeficientes de asignación dependientes del tiempo. Por lo tanto, el modelo usa crecimiento en volumen del tallo (en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) como el principal insumo, y usa un enfoque alométrico para derivar los incrementos en biomasa en los principales componentes de biomasa a partir del crecimiento en volumen del tallo. Para ajustar las diferencias en la calidad de sitio, pueden utilizarse tablas de rendimiento derivadas para condiciones de sitios buenas, medias y pobres y otros parámetros de crecimiento relacionados, modificados adecuadamente (Schelhaas *et al.*, 2004).

El programa cuenta con 6 módulos representados en la figura 2, los cuales son:

- Biomasa: Con la ayuda de otros parámetros adicionales, convierte los datos de incremento corriente anual en volumen a almacenes anuales de carbono.

- Suelo: En este módulo se simula la descomposición de la materia orgánica y los residuos de las cosechas.
- Productos: Se hace un seguimiento del carbono contenido en los productos, usando parámetros como la eficiencia, la vida media de los productos o su reciclaje.
- Bioenergía: En el módulo de bioenergía, los productos de desecho o derivados del módulo de productos son usados para generar bioenergía mediante el uso de tecnologías variadas.
- Financiamiento: Usa los costos y réditos de las intervenciones de manejo para determinar la rentabilidad financiera de los distintos escenarios.
- Contabilidad del carbono: Realiza un seguimiento de todos los flujos hacia y desde la atmósfera y determina los efectos de los escenarios elegidos, usando diferentes enfoques de contabilidad de carbono.

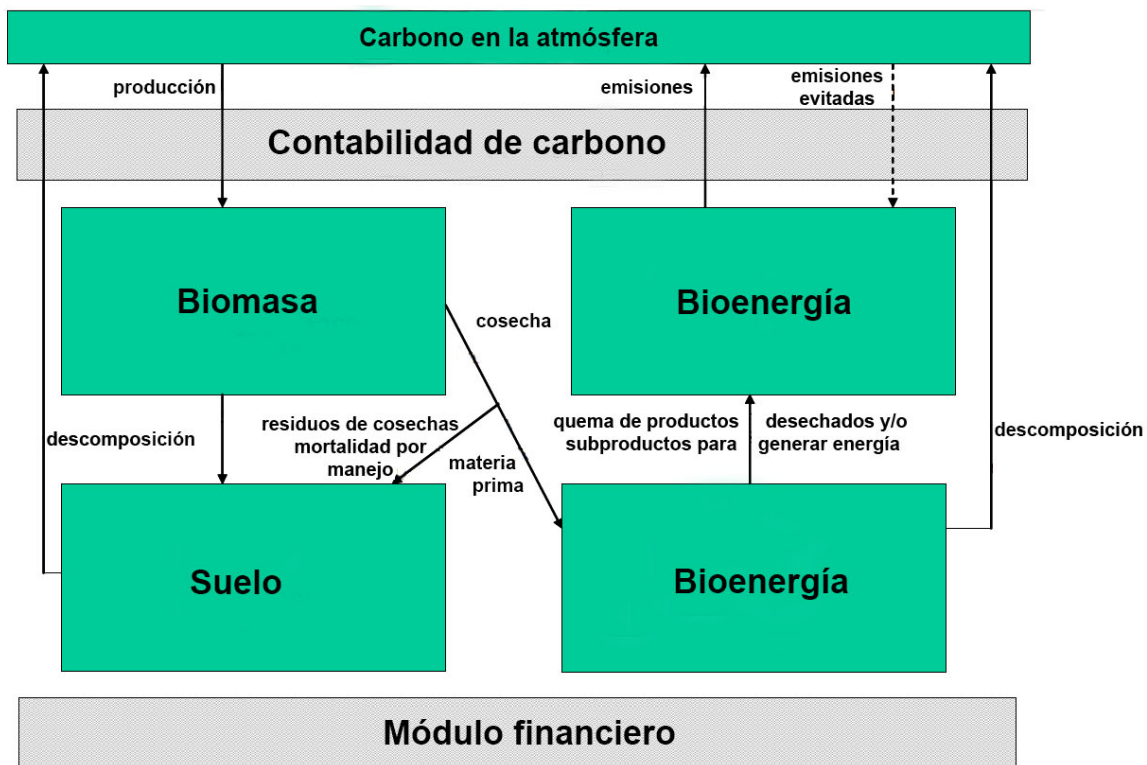


Figura 2. Módulos del modelo CO2FIX

Fuente: Schelhaas *et al.*, 2004

3.7.2 Medición de Captura de Carbono por medio del modelo de simulación CO2FIX en México

- En el 2001, Ordoñez *et al.*, obtuvieron la captura de potencial de carbono de un bosque templado en Nuevo San Juan, en el estado de Michoacán, utilizando el modelo de simulación CO2FIX, el cual está basado en una simulación del ciclo del carbono para rodales forestales bajo manejo silvícola. El plan de manejo que se utiliza en la comunidad de estudio tiene un turno de 50 años con tratamientos cada diez años. Las variables que se utilizaron para alimentar el modelo fueron la superficie forestal, volumen de extracción, productos, incremento corriente anual (ICA), incremento medio anual (IMA), existencias reales (ER), edad promedio, altura, diámetro, ciclo de corta, ciclo de rotación, aclareos, corta de regeneración y corta de liberación. En base a estas variables, se elaboró una curva de crecimiento, se hizo también un análisis estadístico con regresiones tanto lineal como exponencial. Los valores resultantes se integraron al modelo de simulación para que estimara la captura de carbono en la biomasa, los productos resultantes del aprovechamiento, el carbono presente en el suelo y finalmente, el carbono total. Como un dato adicional, se usó un análisis de sensibilidad, pues el rango de variación de los parámetros usados era muy alto sobre todo para el carbono contenido en el humus, el tiempo de residencia promedio de los productos y para los coeficientes de humificación y descomposición. Este análisis también se usó para la curva del ICA. Se consideraron 2 escenarios; un turno de 80 años en lugar del de 50 que se utiliza en el lugar y considerando que los productos del bosque se transforman en 100 años. Los autores llegaron a los siguientes resultados; a los 80 años, la captura de carbono en suelo y biomasa, se estabiliza y el carbono de los productos alcanza esta estabilidad a los 100 años. También se encontró que para la zona, la captura de carbono crece de los 50 a los 100 años y a partir de este periodo comienza a estabilizarse. Igualmente, la biomasa, el suelo y los productos presentan un incremento escalonado, coincidiendo con las épocas en las que se

realiza el tratamiento silvícola. El potencial de captura total de carbono estimado para el bosque natural de la C.I. de NSJ mediante el empleo del modelo CO₂Fix fue de 1.5 MtC a los 50 años, en una superficie de 8,870 ha de *Pinus*. Y en el largo plazo, esta captura se estabiliza en 1.9 millones de tC, equivalentes a 217 Tc/ha en el área de estudio.

- Por su parte, Álvarez y Rubio en 2013, estimaron la línea base de Carbono de un bosque mixto de Pino-encino en la Sierra Juárez de Oaxaca por medio del modelo de simulación CO₂FIX y se comparó con resultados basados en muestreos directos. De sus resultados se desprende que el modelo de simulación permite estimar de manera simple y eficaz los reservorios y flujos del sistema y al compararlo con las estimaciones por medio de ecuaciones alométricas como se observa en el cuadro, se puede apreciar que el resultado es ligeramente mayor al usar el modelo.

Los autores señalan que esto puede deberse a que en las ecuaciones alométricas no se tomaron en cuenta los árboles con diámetros menores a 30 cm. En cuanto a la estimación para el suelo, en el trabajo hecho por Ordoñez, que es con el cual se está comparando, se tomó en cuenta los primeros 20 cm de suelo, cosa que no se hizo con el modelo de simulación. Y el resultado final para este estudio es que el modelo CO₂FIX es un buen estimador para medir el carbono en un bosque.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo. La EFEZ está ubicada en el Estado de México, en los municipios de Iztapaluca y Chalco, entre los 19°12'30" y 19°20'00" de Latitud Norte y los 98°42'30" y 98°30'00" de Longitud Oeste. Actualmente cuenta con una extensión aproximada de 1,638.59 hectáreas. Es un área natural protegida con problemas graves de desequilibrio ecológico y una fuerte presión de la zona urbana que se encuentra cerca del área (Lomas, 2005).



Figura 3. Ubicación del área de estudio

4.2 Clima

El clima de la zona es templado subhúmedo, correspondiente al tipo C (W"2) (w) (b´) y g, con lluvias en verano, una temperatura media de 11 °C y una precipitación media anual de aproximadamente 1180 mm, concentradas entre los meses de febrero a julio. De manera esporádica se presentan nevadas sobre todo en los meses de diciembre a febrero (Zavala, 1984).

4.3 Suelos

Los suelos son derivados de cenizas volcánicas, ricos en nitrógeno, calcio, magnesio y materia orgánica, por lo que su porosidad y aireación y drenaje son muy buenas. Son suelos profundos con textura franco arenosa y su pH varía de 5.5 a 7.1, siendo generalmente ácidos (Rey, 1975).

4.4 Topografía

La zona es mayormente de relieve montañoso, con pendientes que van desde 2% en las partes más planas hasta más del 50% en las zonas más elevadas y montañosas. Las altitudes varían de 3, 080 hasta 3, 690 msnm en el cerro denominado Tres Cruces, esto en la parte sur de la zona (Rey, 1975). De igual forma se pueden encontrar algunos llanos intermontanos.

4.5 Vegetación

La vegetación arbórea presente en la zona, comprende asociaciones de *Pinus*, *Abies*, *Quercus* sp. y *Alnus jorullensis*, principalmente, siendo los dos primeros, los géneros dominantes.

Cuadro 2. Especies presentes en el estrato arbóreo

Nombre científico	Nombre común
<i>P. hartwegii</i>	Pino de las alturas
<i>P. montezumae</i>	Ocote blanco
<i>Abies religiosa</i>	Oyamel
<i>Quercus sp.</i>	Encino
<i>Alnus jorullensis</i>	Aile

4.5.1 *Pinus hartwegii*

Es la especie dominante en la zona con aproximadamente 60% de cobertura, la mayoría de los rodales son masas puras, aunque se pueden encontrar sitios mezclados con *Alnus firmifolia*.

4.5.2 *Pinus montezumae*

Su importancia en cuanto a superficie cubierta es escasa, ya que solamente representa 0.5% del área total, por lo que para fines del presente estudio, la especie fue analizada junto con datos de *Pinus hartwegii* que es la especie dominante, además de que las diferencias entre ambas especies no son significativas.

4.5.3 *Abies religiosa*

Se encuentra cubriendo aproximadamente 20% del área total. Se localiza en sitios con pendientes que van del 30 al 50%, con follaje denso por lo que se aprecia poca presencia de arbustos.

4.5.4 *Alnus jorullensis*

Se presenta en áreas alteradas y siempre mezclado con otras especies, por lo general con alguna de las dos variedades de pino presentes.

4.5.5 *Quercus sp.*

Esta especie no se encuentra en masas puras, la mayoría de las veces está mezclada con pinos. Se localiza solo en pequeños manchones en la parte noreste de la estación.

4.6 Metodología

4.6.1 Determinación de los Tipos de Cobertura

El cálculo de la biomasa total, se hizo por tipo de cobertura vegetal presente en la zona. Para ello se dividió el área total en rodales, donde un rodal es una porción del bosque definida sobre la base de un conjunto de criterios asociados a uno o más objetivos de manejo (Corvalán y Hernández, 2006), estos criterios pueden ser composición de especies, edades, calidad de sitio, o intervenciones silviculturales. Para este estudio en particular, el criterio que se tomó en cuenta fue la especie arbórea dominante.

La delimitación de rodales se realizó en dos fases: en la primera se usó una herramienta de Sistema de Información Geográfica, específicamente el software ArcMap en su versión 10.1. Con la ayuda de este software se delimitaron los distintos rodales a partir del mapa base de la EFEZ proporcionado por personal de la misma.

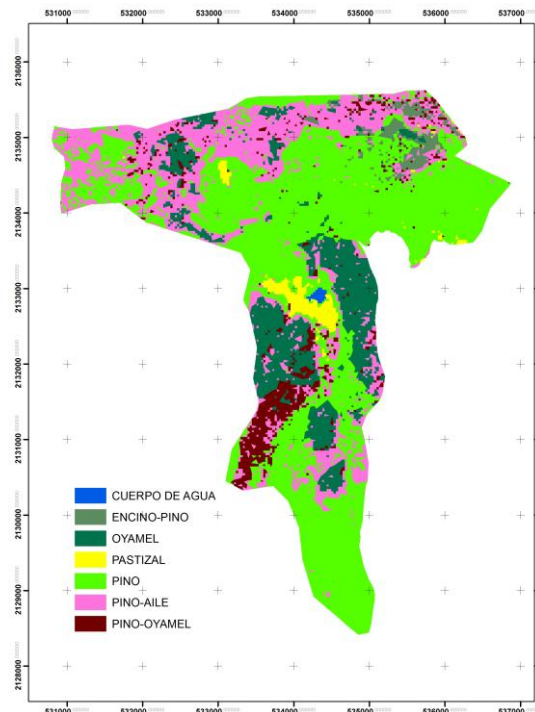


Figura 4. Mapa de vegetación de la EFEZ

Fuente: Madrigal, 2017

En la segunda etapa, se procedió a corroborar la información obtenida en ArcMap, directamente en la zona de estudio. Para la verificación de campo se conformó una brigada compuesta por 4 personas, mediante coordenadas geográficas obtenidas previamente en gabinete y con la ayuda de un GPS, se visitaron distintas áreas al azar. Durante el recorrido se tuvo ayuda de una camioneta pick up propiedad de la EFEZ, con la cual se facilitó el acercamiento a las distintos sitios por visitar, sin embargo, en los tramos en donde no era posible continuar avanzando debido a las irregularidades del terreno y las malas condiciones de los caminos, fue necesario seguir los recorridos caminando hasta acercarse lo más posible a las coordenadas del GPS.

Finalmente, después de verificar los distintos tipos de vegetación y compararlos con los resultados generados con el software, se obtuvieron 5 tipos de coberturas vegetales arbóreas en la zona, en las cuales se hicieron las estimaciones de captura de carbono.

4.6.2 Estimación del potencial de captura de carbono

Para la estimación del potencial de captura de carbono del bosque, se usó el modelo CO2FIX, en su versión 3.2, el cual fue desarrollado en 1990 por Mohren y Goldewijk en el Instituto de Investigaciones Forestales y de Ecología Urbana de Holanda. Con los datos adicionales que se ingresan para correr el programa, éste calcula la tasa de aumento del volumen del fuste y la biomasa del follaje, ramas y raíces, utilizando segmentos de tiempo de un año (Morhen *et al.*, 1997).

El modelo cuenta con 6 módulos; biomasa, suelo, productos, bioenergía, financiamiento y contabilidad del carbono. El módulo usado en este trabajo fue el de biomasa, el cual convierte los datos de incremento neto anual de volumen a stocks anuales de carbono en fracciones de biomasa con la ayuda de parámetros adicionales (Schelhaas *et al.*, 2004).

4.6.3 Búsqueda de Parámetros

Para poder alimentar el modelo en su módulo de biomasa, fue necesario realizar una búsqueda exhaustiva de los parámetros necesarios. En primera instancia, se procedió a obtener datos sobre trabajos realizados específicamente en la EFEZ, como programas de manejo, tesis, manuales y artículos, mientras que los datos que no estuvieron disponibles se tomaron de estudios hechos en lugares cercanos o con escenarios semejantes al área de estudio: condiciones climáticas, tipo de vegetación, géneros y especies, etc. Cabe mencionar que hubo información que no fue posible obtener de manera local, o incluso nacional, por lo que se decidió utilizar datos ya estandarizados por tipo de cobertura vegetal a nivel mundial.

La información que fue necesaria coleccionar para poder iniciar la modelación es la siguiente:

- Densidad de la madera,
- Contenido de carbono en biomasa,
- Carbono inicial en el sitio,
- Incremento Corriente Anual (ICA) y
- Crecimiento relativo de follaje, ramas y raíces

Después de reunir la información requerida, se procedió a ingresarla en las secciones correspondientes del software. En la figura 5, se muestra un ejemplo de la ventana de biomasa del CO₂FIX, en la cual, para el presente estudio se llenaron las pestañas referentes al tallo, follaje, ramas y raíces, mientras que las de mortalidad y competencia se dejaron vacías por no contar con información concreta y no ser determinantes para conseguir los objetivos propuestos. Asimismo, los datos sobre mortalidad por manejo y cosecha no se tomaron en cuenta, puesto que al ser un área de conservación, no se realizan extracciones de madera en grandes volúmenes como para ser importantes. Debido a lo anterior, el escenario que se manejó fue el de conservación, el cual sugiere que no existen aprovechamientos con fines comerciales, sino solamente cortas de saneamiento o aclareos esporádicos.

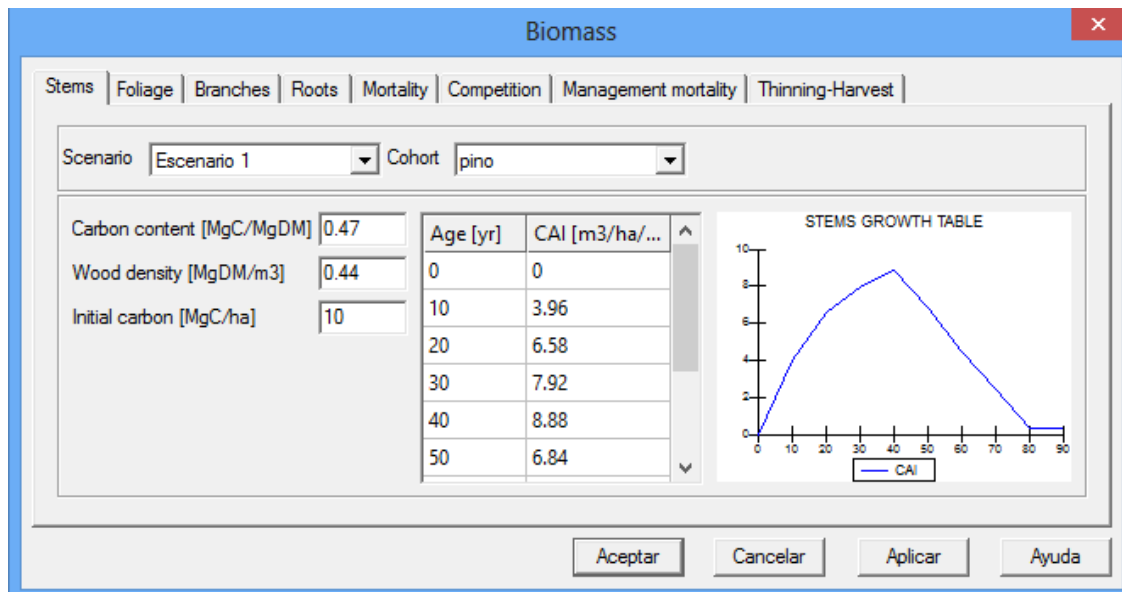


Figura 5. Módulo de biomasa del modelo CO2FIX

Finalmente, después de ingresar la información de parámetros generales y biomasa y una vez finalizada la modelación, se obtuvieron las 5 gráficas finales, una por cada cobertura vegetal, así como los contenidos de carbono anual en un periodo de 80 años para el caso del pino y el encino, y de 50 años para el caso del oyamel, considerándose suficiente para observar el progreso del almacenamiento de carbono arbóreo en la zona.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Tipos de Cobertura

Después de determinar los tipos de vegetación por medio de un Sistema de Información Geográfica y su posterior verificación en campo, se obtuvieron 5 clases de coberturas vegetales (Cuadro 3). Así mismo, en las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 se muestra una vista general de cada tipo de vegetación en la zona.

Cuadro 3. Coberturas vegetales obtenidas

No.	Cobertura vegetal arbórea
1	Bosque de Pino
2	Bosque de Oyamel
3	Bosque de Pino-Oyamel
4	Bosque de Pino-Aile
5	Bosque de Encino-Pino



Figura 6. Asociación de Pino



Figura 7. Asociación de Oyamel



Figura 8. Asociación de Pino-Oyamel



Figura 9. Asociación de Pino-Aile



Figura 10. Asociación de Encino-Pino

5.2 Parámetros por cobertura vegetal

Derivado de la búsqueda de información sobre los parámetros requeridos para correr el modelo, se obtuvieron los datos mostrados en el cuadro No.4, ordenados para cada una de las cinco coberturas vegetales analizadas. Asimismo, en el cuadro No. 5 se describen las fuentes de las cuales se obtuvieron los distintos datos.

Cuadro 4. Parámetros por tipo de cobertura

	Bosque de Pino	Bosque de Oyamel	Bosque de Pino-Oyamel	Bosque de Pino-Aile	Bosque de Encino-Pino
Densidad de la madera (g/cm³)	0.49	0.38	0.49/0.38	0.49/0.43	0.78/0.49
Contenido de carbono					
Fuste	0.5	0.47	0.5/0.38	0.5/0.57	0.49/0.44
Follaje	0.5	0.46	0.5/0.38	0.5/0.14	0.47/0.44
Ramas	0.5	0.46	0.5/0.38	0.5/0.29	0.47/0.44
Raíces	0.5	0.47	0.5/0.47	0.5/0.44	0.47/0.44
Carbono inicial					
Fuste	108.07	276.96	60.52/121.86	88.62/19.95	4.88/106.99
Follaje	5.40	24.92	3.02/10.96	4.43/0.99	0.24/5.34
Ramas	16.21	19.38	9.07/8.53	13.29/5.98	0.73/16.05
Raíces	32.42	69.24	18.16/30.46	26.59/3.99	1.46/32.09
Tasa de recambio					
Follaje	0.33	0.33	0.33/0.33	0.33/1	1/0.33
Ramas	0.22	0.02	0.02/0.02	0.02/0.02	0.02/0.02
Raíces	0.22	0.02	0.02/0.02	0.02/0.02	0.03/0.02

Cuadro 5. Datos de parámetros y sus fuentes

Parámetro	Especie	Fuente
Densidad de la madera	<i>Abies religiosa</i>	Sotomayor et al., 2003
	<i>Alnus jorullensis</i>	
	<i>Quercus rugosa</i>	
	<i>Pinus hartwegii</i>	Rojas y Villers, 2005
Contenido de carbono	<i>Alnus jorullensis</i>	Acosta & Tupaz, 2007
	<i>Abies religiosa</i>	Avendaño et al., 2009
	<i>Pinus hartwegii</i>	Yerena et al., 2012
	<i>Quercus</i>	IPCC, 2006
Tasa de recambio		De Jong et al, 2007

5.3 Potencial de captura por tipo de vegetación

En las gráficas resultantes, el eje X corresponde al tiempo de simulación en años y el eje Y a la cantidad e incremento de carbono acumulado durante cada periodo. La edad promedio que se consideró para todos los cohortes fue de aproximadamente 65 años. El periodo de simulación dependió de los datos de incremento con los que se contaba, por lo que las coberturas de Pino y Pino-Aile, se simularon a un periodo de 80 años, mientras los de Oyamel, Pino-Oyamel y Encino-Pino a un periodo de 100 años.

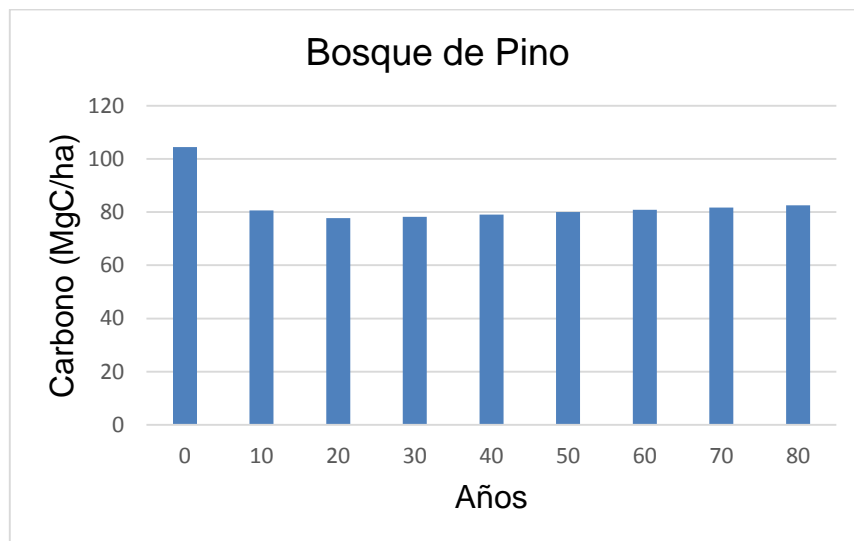


Figura 11. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Pino

En el caso del bosque de pino (Figura 11), en el que se realizó la simulación con un periodo de 80 años, debido a que la masa forestal es de edad avanzada se observa que el incremento de carbono por hectárea a través de los años es relativamente pequeño, manteniéndose más o menos constante, lo mismo se puede observar en las gráficas restantes, debido a que la edad de inicio de la simulación fue la misma para todas las coberturas. Esto es así porque las plantas capturan más carbono cuando están en crecimiento, pues lo utilizan para incorporarlo a sus estructuras como tallo, ramas y follaje (Ordoñez, 2008), mientras que cuando los árboles son adultos, esta capacidad de retención disminuye.

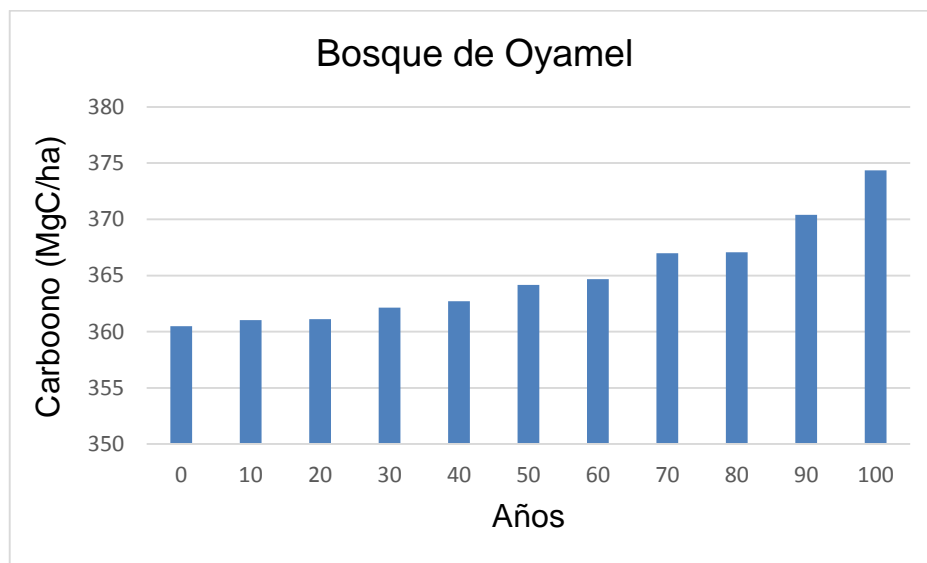


Figura 12. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Oyamel

En el caso de las coberturas con periodos de simulación de 100 años, en la masa pura de Oyamel (Figura 12) se alcanzó 374.36 MgC/ha, el cual representa también el valor más alto dentro de las cinco coberturas analizadas, seguido de los 323.52 MgC/ha obtenidos para el Bosque de Pino-Oyamel (Figura 13). En último lugar en cuanto a carbono capturado al término de éste periodo (100 años) se encuentra el Bosque de Encino-Pino (Figura 14) con 273.17 MgC/ha.

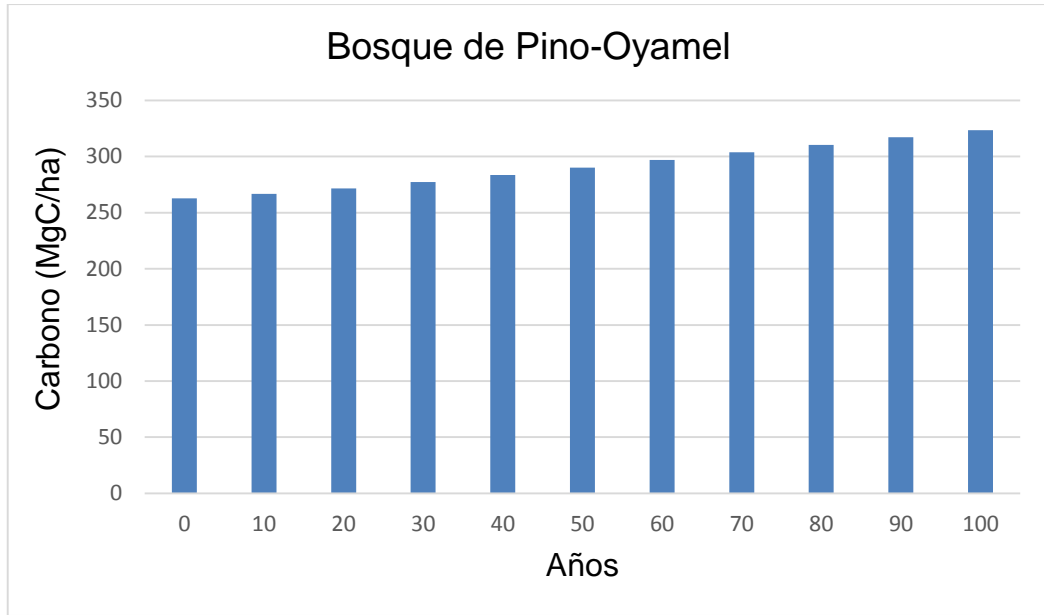


Figura 13. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Pino-Oyamel

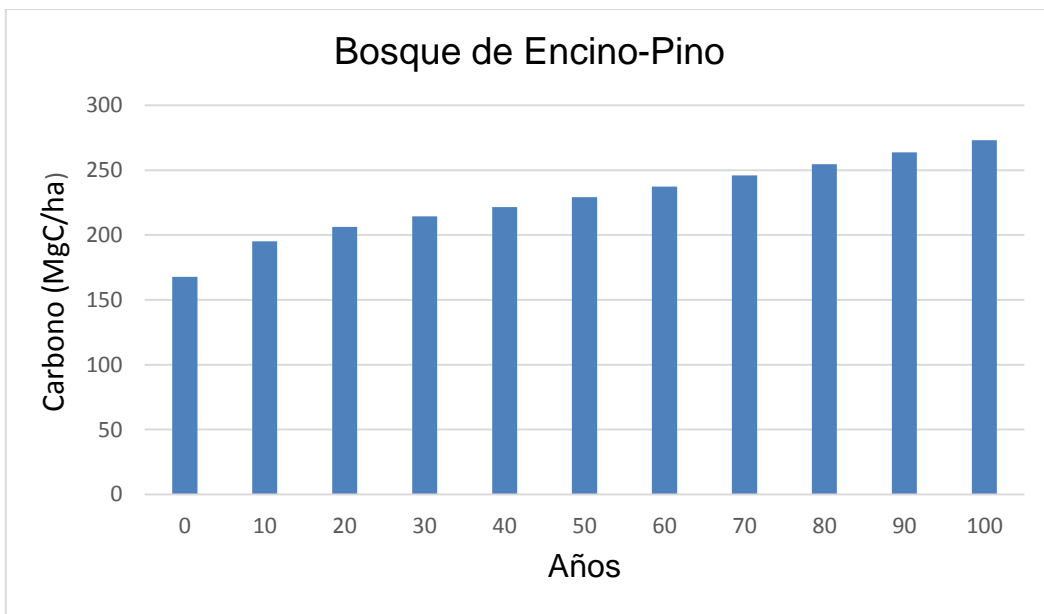


Figura 14. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Encino-Pino

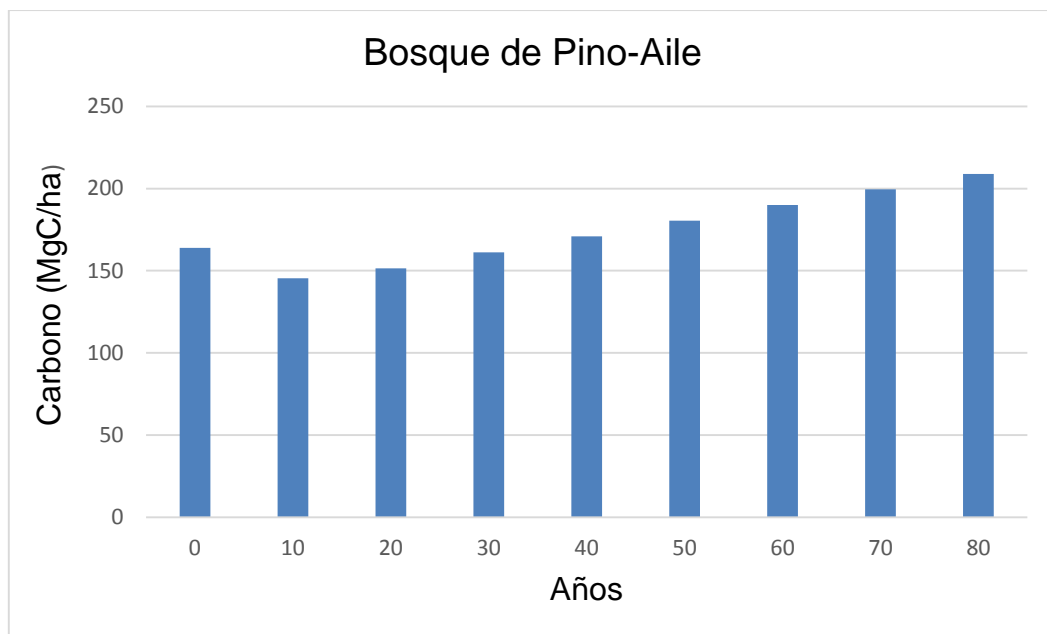


Figura 15. Gráfica de acumulación de biomasa para el bosque de Pino-Aile

Entre las dos coberturas vegetales con periodo de simulación de 80 años, la de Pino-Aile (Figura 15) fue la que presentó mayor cantidad de carbono capturado al término de la simulación con 208.84 Mg por hectárea, mientras que con la masa pura de pino solo se obtuvo 121.03 Megagramos de Carbono por hectárea (MgC/ha) a los 80 años.

Derivado de las gráficas anteriores y del contenido de carbono capturado por cada asociación vegetal, el potencial de captura de carbono total para el bosque de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, fue de 306, 690.48 MgC/ha, dividido entre los 5 tipos de cobertura como se muestra en el cuadro 6, siendo 1,585.58 hectáreas la superficie total analizada en este estudio.

Cuadro 6. Contenido de carbono por cobertura vegetal

Tipo de cobertura vegetal	Superficie (ha)	MgC/ha	Total MgC
Bosque de Pino	854.82	121.03	103,458.86
Bosque de Oyamel	228.50	374.36	85,541.26
Bosque de Pino-Oyamel	90.15	323.52	29,165.33
Bosque de Pino-Aile	373.87	208.84	78,079.01
Bosque de Encino-Pino	38.24	273.17	10,446.02
TOTAL	1,585.58	1,300.91	306, 690.48

Si se generaliza la cantidad de carbono total (306, 690.48) entre el número de has (1,585.58), se tiene un resultado de 193.42 MgC/ha, este resultado es mayor al reportado por Ordoñez en el 2001, para un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan Michoacán, en el cual se alcanzó un total de 1.5 MtC (Megatoneladas de Carbono) en un área de 8,870 hectáreas, es decir, 169.11 MgC/ha. Esto podría ser debido a que la EFEZ es un área de conservación en donde no se realizan aprovechamientos forestales, por lo que la masa forestal está prácticamente intacta.

En otro estudio realizado por Pérez *et al.* en el 2007, usando el modelo CO2FIX y llevado a cabo en una localidad del sur de Austria con presencia de bosques de picea (*Picea abies*), de roble (*Quercus robur x petraea*) y de pino albar (*Pinus sylvestris*), los resultados mostraron que la masa de pino alcanzó su máximo potencial de fijación de carbono a la edad de 100 años con 213.2 MgC/ha; mientras la masa de roble captura 375 MgC/ha a la misma edad, con la diferencia de que esta especie continua capturando carbono hasta su corta final a la edad de 150 años. Por otro lado, en las masas de picea se obtuvo un valor de captura de 317 MgC/ha a los 100 años. De igual manera, se observó que la especie de lento crecimiento, en este caso el roble, mostró el valor más elevado de captura, al contrario de las dos especies de rápido crecimiento. Los autores atribuyen este resultado al hecho de que la madera de robles es más densa que las otras.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante contar con información sobre el potencial de captura de los bosques, con el fin de determinar el tipo de manejo y las prácticas más adecuadas que se deben implementar en una zona específica. En este caso, la edad del arbolado se considera demasiado alta, sin embargo la cantidad de carbono almacenado durante la simulación es similar a los obtenidos por otros autores en zonas distintas por lo que aún se considera dentro del rango normal para un bosque de coníferas.

En cuanto a los resultados, se puede observar que las masas con presencia de *Abies religiosa* presentaron los valores más altos de captura de carbono, probablemente por la alta densidad de árboles por hectárea para esta especie mientras que la masa pura de *Pinus* presentó el valor más bajo de todas las coberturas.

Sería importante realizar un estudio de medición de carbono en los que se incluyan la cobertura pastizal, la cual no se incluyó en el presente análisis. De igual forma, se podría incluir la biomasa contenida en la vegetación herbácea y arbustiva, así como el carbono del suelo y de esta manera contar con información sobre el carbono del bosque en todos sus componentes. Por otro lado, el periodo de simulación podría ampliarse para observar con mayor claridad la dinámica del carbono en el bosque de la EFEZ.

7. LITERATURA CITADA

ACOSTA, F. J. J. y TUPAZ, F. F. (2007). Cuantificación de la Captura de Carbono por la Biomasa Aérea de Aliso (*alnus jorullensis* h.b.k.) en Dos Arreglos Agroforestales de la Granja Experimental Botana Universidad de Nariño, Municipio de Pasto, Departamento de Nariño. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 78 p.

ACOSTA, M. M., VARGAS, H. J., VELÁZQUEZ, M. A y ETCHEVERS, B. J. D. (2002). Estimación de la Biomasa Aérea Mediante el Uso de Relaciones Alométricas en Seis Especies Arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36 (6): 725-736. Fuente: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2002/nov-dic/art-10.pdf>. Consultado 20/Diciembre/2016

ÁLVAREZ, S. & RUBIO, A. (2013). Línea Base de Carbono en Bosque Mixto de Pino-Encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del Modelo CO2FIX v.3.2. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1): 125-137. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62926254010> Consultado 29/Mayo/2015

ALLWOOD J.M., V. BOSETTI, N.K. DUBASH, L. GÓMEZ-ECHEVERRI, y C. VON STECHOW. (2014). Glosario. En: *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel y J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

AVENDAÑO, H. D. M., ACOSTA, M. M, CARRILLO, A. F. y ETCHEVERS, B. J. D. (2009). Estimación de Biomasa y Carbono en un Bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3): 233-238. Fuente:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000300011 Consultado 23/Nov/2016

BECERRIL-PIÑA, R., GONZÁLEZ-SOSA, E., MASTACHI-LOZA, C.A., DÍAZ-DELGADO, C. y RAMOS-SALINAS, N.M. (2014). Contenido de Carbono en un Ecosistema Semiárido del Centro de México. *Ecostemas y Recursos Agropecuarios*, 1 (1): 9-18. Fuente: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282014000100002&lng=es&tlng=es Consultado 29/Mayo/2015

BENJAMÍN, O. J. A. & MASERA, O. (2001). Captura de Carbono ante el Cambio Climático. *Madera y Bosques*, 7(1): 3-12. Fuente: <http://www.oikos.unam.mx/Bioenergia/images/PDF/CC/CC-Bosques/captura-carbono-cambio-climatico.pdf> . Consultado 29/Mayo/2015

BONILLA-CÁRDENAS, J. A., LEMUS-FLORES, C., MONTAÑO-GÓMEZ, M. F., GONZÁLEZ-VIZCARRA, V.M. y LY-CARMENATTI, J. (2012). Fermentación Ruminal, Digestibilidad y Producción de Metano en Ovinos Alimentados con Cuatro Niveles de Rastrojo de Maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15(3): 499-509. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93924624003> Consultado 01/Dic/2016

CARMONA, J. C., BOLÍVAR, D. M. y GIRALDO, L.A. (2005). El Gas Metano en la Producción Ganadera y Alternativas para Medir sus Emisiones y Aminorar su Impacto a Nivel Ambiental y Productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(1): 49-63. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=295022952006> Consultado 24/Nov/2016

CORVALÁN, V. P. y HERNÁNDEZ, P. J. (2006). Estructura de Rodal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Manejo de Recursos Forestales. Cátedra de Dasometría.

DE JONG B. H. J., MASERA, O., OLGUÍN, M. y MARTÍNEZ, R. (2007). Greenhouse Gas Mitigation Potential of Combining Forest Management and

Bioenergy Substitution: A Case Study from Central Highlands of Michoacán, Mexico. *Forest Ecology and Management*. *Forest Ecology and Management*, 30: 1-14. Fuente: <http://fulltext.study/preview/pdf/90651.pdf> Consultado 01/Ene/2017

DÍAZ, C.G. (2012). El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*, 37 (2): 227-240. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024179004>. Consultado 15/Ago/2016

DOUTERLUNGNE, D., HERRERA-GOROCICA, A. M., FERGUSON, B. G., SIDDIQUE, I. y SOTO-PINTO L. (2013). Ecuaciones Alométricas para Estimar Biomasa y Carbono de Cuatro Especies Leñosas Neotropicales con Potencial para la Restauración. *Agrociencia*, 47(4): 385-397. Fuente: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140531952013000400007&script=sci_arttext . Consultado 25/Mayo/2015

ECHEVERRI, L. C. A. (2006). Estimación de la Emisión de Gases de Efecto Invernadero en el Municipio de Montería, (Córdoba, Colombia). *Revista Ingenierías*, Universidad de Medellín, 5(9): 85-96. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75050908> Consultado 24/Nov/2016

FAO. (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010. Main Report*. Roma, Italia. 378 pp.

FAO. (2007). *Secuestro de Carbono en Tierras Áridas*. Roma, Italia. 138 pp.

FIGUEROA, C. M.E. y REDONDO, G. S. (2007). *Los Sumideros Naturales de CO₂. Una Estrategia Sostenible entre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto desde las Perspectivas Urbana y Territorial*. Muñoz Moya, Editores Extremeños. Secretariado de Publicaciones. Universidad de Sevilla. Sevilla, España. 218 p.

FLORES, R. N. F., MENDIZÁBAL-HERNÁNDEZ, L. D. C. y ALBA-LANDA, J. (2012). Potencial de Captura y Almacenamiento de CO₂ en el Valle de Perote. Estudio de Caso: *Pinus cembroides* subsp. *Orizabensis* D.K. Bailey. *Foresta Veracruzana*, 14(1): 17-22. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49724122003> Consultado 24/Nov/2016

FLORES-VELÁZQUEZ, R., LEDO-CARRANZA, M. y VILLALBA-VALLE, D. (2010). Inventario de Emisiones en 2005 de Gases de Efecto Invernadero por el Sector Energético Mexicano. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 11(1): 35-43. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40415986005> Consultado 15/Ago/2016

GRANADOS, J. y CORNER, C. (2004). Respuesta de las Selvas Tropicales al Incremento de CO₂ en la Atmósfera. Revista Forestal Iberoamericana, 1(1): 63-70. Fuente: <http://www.forest.ula.ve/rforibam/archivos/DOC8.pdf> Consultado 01/Dic/2016

HENRÍQUEZ, C. (2016). Impactos, Vulnerabilidades y Desafíos Frente al Cambio Climático. Revista de Geografía Norte Grande, 63: 5-7. Pontificia Universidad Católica de Chile. Fuente: <http://www.redalyc.org/pdf/300/30045600001.pdf> Consultado 20/Diciembre/2016 Consultado 24/Nov/2016

IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp.

IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

IPCC. (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. Agriculture, forestry and other land use. Japan: IGES.

IPCC. (2005). La Captación y el Almacenamiento de Dióxido de Carbono. Resumen para Responsables de Políticas y Resumen Técnico. Fuente: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf Consultado 24/Nov/2016

IPCC. (2002). Cambio Climático y Biodiversidad. Documento Técnico V del IPCC. Fuente: <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf> Consultado 24/Nov/2016

IPCC. (1997). Introducción a los Modelos Climáticos Simples Utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Documento Técnico II del IPCC. Fuente: <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-II-sp.pdf> Consultado 24/Nov/2016

IPCC. (1996). Tecnologías, Políticas y Medidas para Mitigar el Cambio Climático. Documento Técnico I del IPCC. 92 pp.

LOMAS. B.C.T., TERRAZAS, D. S. y TCHIKOUÉ, M.H. (2005). Propuesta de Ordenamiento Ecológico Territorial para el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 11(1): 57-71. Fuente: [file:///D:/Downloads/rchscfaXI431%20\(1\).pdf](file:///D:/Downloads/rchscfaXI431%20(1).pdf) Consultado 28/Dic/2016

MADRIGAL, R. S. (2017). Influencia de la Pendiente, Cobertura y Profundidad del Suelo en la Concentración y Contenido de Carbono y Nitrógeno del Suelo, Zoquiapan, México. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales, Chapingo, México.

MARTÍNEZ, H. E., FUENTES, E. J. P. y ACEVEDO, H. E. (2008). Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal, 8(1): 68-96. Fuente: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006> Consultado 11/Ene/2017

MASERA, O., GARZA-CALIGARIS, J.F., KANNINEN, M., KARJALAINEN, T., LISKI, J., NABUURS, G.J., PUSSINEN, A. y DE JONG, B.J. (2003). Modelling Carbon Sequestration in Afforestation, Agroforestry and Forest Management Projects: the CO2FIX V.2 Approach. Ecological Modelling 164: 177-199.

MENDIZÁBAL-HERNÁNDEZ, L. D. C., MÁRQUEZ, R. J. ALBA-LANDA, J. CRUZ-JIMÉNEZ, H. y RAMÍREZ-GARCÍA, E. O. (2008). Cambio Climático y

Comunidades Forestales. Foresta Veracruzana, 10(2): 49-56. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49711436007> Consultado 24/Nov/2016

MINISTERIO DE AMBIENTE DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. (2009). El ABC del Cambio Climático. Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. Formación, Organización y Participación Social. Fuente: http://cambioclimatico.cridlac.org/wp-content/uploads/ABC_CC_GT1.pdf Consultado 22/Nov/2016

MORHEN, G.M.J., J.F. GARZA, O. MASERA y G.J. NABUURS. (1997). User's Manual CO2Fix For Windows: a Dynamic Model of the CO2-Fixation in Forest Stands Version 1.2. IBN Research Report-Instituto de Ecología de la UNAM. 26 pp.

NELLEMANN, C., CORCORÁN, E., DUARTE, C.M., VALDÉS, L., DE YOUNG, C., FONSECA, L. y GRIMSDITCH, G. (eds). (2009). Carbono Azul. El Papel de los Océanos Saludables en la Fijación de Carbono. Evaluación de una Respuesta Rápida. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, GRID-Arendal. Fuente: http://www.unep.org/pdf/BLUE_CARBON_sp.pdf Consultado 05/Dic/2016

ORDOÑEZ, D. J. A. B. (2008). Como Entender en Manejo Forestal, la Captura de Carbono y el Pago de Servicios Ambientales. Ciencias, No. 90, 37-42. Fuente: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=64411395006> Consultado 24/Nov/2016

ORDOÑEZ, J. A. y B.H., DE JONG. (2001). Almacenamiento de Carbono en un Bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. Instituto de Ecología, A.C., 7(2): 27-47. Fuente: http://www.researchgate.net/publication/237037636_Almacenamiento_de_carbono_en_un_bosque_de_Pinus_pseudostrobus_en_Nuevo_San_Juan_Michoacn Consultado 29/Mayo/2015 Consultado 25/Mayo/2015

PARDOS, J.A. (2010). Los Ecosistemas Forestales y el Secuestro de Carbono ante el Calentamiento Global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, 2010. 253 pp.

PÉREZ, P. S., R. JANDL y A. RUBIO S. (2007). Modelización del Secuestro de Carbono en Sistemas Forestales: Efecto de la Elección de Especie. *Ecología*, No. 21; 341-352.

PÉREZ-RAMÍREZ, S., RAMÍREZ, M.I., JARAMILLO-LÓPEZ, P. F y BAUTISTA, F. (2013). Soil Organic Carbon Content Under Different Forest Conditions: Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XIX (1); 157-173. Fuente: https://chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?id_articulo=1448&id_revisitas=3&html=MjM0Nw== Consultado 04/Dic/2016

PÉREZ-VERDÍN, G., HERNÁNDEZ-DÍAZ, J.C., MÁRQUEZ-LINARES, M. A. y TECLE, A. (2009). Aplicación de Técnicas Multicriterio en el Manejo Integral Forestal en Durango, México. *Instituto de Ecología, A.C.*, 15(1): 27-46. Fuente: http://www1.inecol.edu.mx/myb/resumeness/15.1/MB_2009_15-1_027-046.pdf Consultado 29/Mayo/2015

POMPA-GARCÍA, M. y YERENA-YAMALLIEL, J. I. (2014). Concentración de Carbono en *Pinus cembroides* Zucc: Fuente Potencial de Mitigación del Calentamiento Global. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20 (3): 169-175. Fuente: https://chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?id_articulo=1861 Consultado 25/Mayo/2015

REY, C. J. A. (1975). Estudio de Suelos de la Estación de Enseñanza, Investigación y Servicios Forestales de Zoquiapan. *Información Técnica de Bosques*. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo México. 50 pp.

RIEBEEK, H. (2011). The Carbon Cycle. NASA. Fuente: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/> Consultado 04/Dic/2016

ROJAS, G. F. y VILLERS, R. L. (2005). Comparación de Dos Métodos para Estimar la Densidad de la Madera de *Pinus hartwegii* Lindl. del Volcán La Malinche. *Madera y Bosques*, 11(1): 63-71. Fuente: Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61711105> Consultado 22/Ene/2017

ROJO-MARTÍNEZ, G.E., JASSO-MATA, J. y VELÁSQUEZ-MARTÍNEZ, A. (2003). Las Masas Forestales como Sumideros de CO₂ ante un Cambio Climático Global. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9 (1): 57-67. Fuente: https://chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?id_articulo=388 Consultado 04/Dic/2016

RUÍZ-DÍAZ, C., RODRÍGUEZ-ORTÍZ, G., LEYVA-LÓPEZ, J.C. y ENRÍQUEZ-DEL VALLE, J. R. (2014). Methodologies for Estimating Biomass and Carbon in Forest Species from Mexico. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1): 28-45. Fuente: http://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/revista/sites/www.ciidiroaxaca.ipn.mx.revista/files/pdf/vol12num1/nyd_vol12_num1_2014_art3.pdf Consultado 29/Dic/2016

RUIZ. N. P. (2011). Estimación de los Costos Relativos de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en las Ramas de la Economía Mexicana. *El trimestre Económico*, Vol. LXXVIII (1), Núm. 309: 173-191. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31340966006> Consultado 25/Ago/2016

SAPIÑA, N. F. (2006). ¿Un Futuro Sostenible? El Cambio Global Visto por un Científico Preocupado. Cátedra de Divulgación de la Ciencia. Publicacions de la Universitat de València. 162 pp.

SARUKHÁN, J., *et al.* (2009). *Capital Natural de México. Síntesis: Conocimiento Actual, Evaluación y Perspectivas de Sustentabilidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 100 pp.

SARUKHAN, J. y DIRZO, R. (Compiladores). (1992). México Ante los Retos de la Biodiversidad. CONABIO, México, pp. 63-73.

SCHELHAAS, M.J., P.W. VAN ESCH, T.A. GROEN, B.H.J. DE JONG, M. KANNINEN, J. LISKI, O. MASERA, G.M.J. MOHREN, G.J. NABUURS, T. PALOSUO, L. PEDRONI, A. VALLEJO & T. VILÉN. (2004). CO2FIX V 3.1 – A Modelling Framework for Quantifying Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. Wageningen, Alterra, Alterrapport 1068. 122 p.

SEMARNAT. (2009). Cambio Climático. Ciencia, Evidencia y Acciones. Serie ¿Y el Medio Ambiente? 80 pp. Fuente: http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/cambio_climatico_09-web.pdf Consultado 11/Ene/2017

SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M. y H.L. MILLER (eds.). (2007). H.L. Miller (eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.

SOTOMAYOR, C. J. R. HERRERA, F. M. A. y CRUZ, D. L. J. (2003). Clasificación Mecánica de la Madera de 100 Especies Mexicanas. XII Congreso Forestal Mundial. Quebec, Canadá. Fuente: <http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/1054-B4.HTM> Consultado 22/Ene/2017

TORRES, R. J. M. y GUEVARA, S. A. (2002). El potencial de México para la Producción de Servicios Ambientales: Captura de Carbono y Desempeño Hidráulico. Gaceta Ecológica, No. 63. pp. 40-59. Fuente: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906303> Consultado 24/Nov/2016

ZAVALA, C. F. (1984). Sinecología de la Vegetación de la Estación de Enseñanza e Investigación Forestal Zoquiapan, Estados de México y Puebla. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 164 p.