

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Evaluación de la Producción de Oxígeno en Cinco Especies de Coníferas en Plantaciones Forestales

Por:

MIGDALIA YERANDI BARRIOS GUZMÁN

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Evaluación de la Producción de Oxígeno en Cinco Especies de Coníferas en Plantaciones Forestales

Por:

MIGDALIA YERANDI BARRIOS GUZMÁN

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada

Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal

Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho

Coasesor

Dr. Luis Samaniego Moreno

Coasesor

Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Coordinador de la División de Agronomía

Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, guiarme en los momentos difíciles y ayudarme a concluir esta parte importante de mi vida, ya que sin él no hubiera sido posible.

A mi Alma Mater, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por aceptarme en su casa de estudios y brindarme el apoyo durante mi estancia.

Al Dr. Jorge Méndez González, por su tiempo, apoyo, paciencia y conocimientos compartidos para realizar este trabajo.

Al Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho, por su colaboración en este trabajo.

Al Dr. Luis Samaniego Moreno, por su colaboración en este trabajo.

A mis padres:

Francisca Guzmán Rivera y Onésimo Barrios Aguilar, por darme la vida y por todo el apoyo que me han dado en cada momento, por sus consejos y las palabras de aliento para seguir adelante. Los amo...

A mis hermanos (as):

Noé, Alonso, Angel, Luis, Berna, Maribel, Mayra, Teresa, Susana, Yenifer y Cecilia, muchas gracias a todos y cada uno de ustedes ya que han sido un apoyo muy importante no sólo en esta etapa de mi vida sino siempre que los he necesitado, este logro es también de ustedes. Los amo...

A mis amigos (as):

Liliana Barrios, Lupita Vázquez, Anabel Martínez, Magdalena Colon, Gabriela Lucio, Mónica Pérez, Lupita Roblero, Dayli Pérez, Mariela Silva, Carmen Espinoza, Angel López, Juan Hernández, Eleazar Martínez, Erick Vargas, Leopoldo Damián, Guillermo Pérez, Jorge Bartolomé, Eredi Roblero, Alejandro García, Cesar Gómez, Leonel Domínguez, Gabriel Cervantes, Gustavo Nájera y Ricardo López gracias por su amistad tan sincera y por sus palabras de aliento para concluir esta etapa de mi vida.

A Efraín Maya Zazueta:

Gracias por este tiempo compartido, por brindarme tu apoyo, tu comprensión, cariño y paciencia, eres una persona muy especial para mí.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado para la familia Barrios Guzmán que Dios me brindó y que es mi más grande bendición en mi vida. Pero en especial a mis hermanos Noé, Alonso, Ángel y Luis por ser el motor principal para que yo estudiara una carrera y de lo cual estoy muy agradecida.

A mis hermanas, Cecilia y Yenifer para que esto las impulse a seguir estudiando y saben que cuentan conmigo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| ÍNDICE DE CUADROS | II |
| ÍNDICE DE FIGURAS | III |
| RESUMEN..... | IV |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 1.1. Objetivo general | 9 |
| 1.2. Objetivos específicos..... | 9 |
| 1.3. Hipótesis..... | 9 |
| 1.4. Justificación | 9 |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA | 10 |
| 2.1. Gases de efecto invernadero | 10 |
| 2.2. Servicios ambientales | 10 |
| 2.3. Estudios afines de cuantificación de biomasa y captura de carbono en plantaciones forestales | 11 |
| 2.4. Estudios a fines de estimación de biomasa y carbono en bosque natural..... | 13 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 17 |
| 3.1. Área de estudio | 17 |
| 3.2. Descripción de las especies estudiadas | 18 |
| 3.3. Método directo para estimar biomasa | 20 |
| 3.4. Muestras para realizar análisis troncales..... | 20 |

| | |
|--|----|
| 3.5. Obtención de biomasa en fuste de las especies estudiadas..... | 22 |
| 3.6. Obtención de Carbono en fuste de las especies estudiadas | 23 |
| 3.7. Predicción de biomasa, Carbono e incrementos anuales | 24 |
| 3.8. Cuantificación de Oxígeno en fuste..... | 25 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 26 |
| 4.1. Características dasométricas de las especies estudiadas | 26 |
| 4.2. Estadísticos de ajuste del modelo de Schumacher para estimar biomasa y Carbono en fuste de las especies estudiadas | 28 |
| 4.3. Cuantificación de Biomasa y Carbono en fuste de las especies estudiadas | 29 |
| 4.4. Incrementos en Carbono de las especies estudiadas | 33 |
| 4.5. Producción de Oxígeno para las especies estudiadas..... | 35 |
| 4.6. Producción de Oxígeno acumulado en las especies estudiadas..... | 36 |
| 5. CONCLUSIONES | 38 |
| 6. LITERATURA..... | 39 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Características promedio del medio físico de donde se ubican las especies estudiadas..... | 18 |
| Cuadro 2. Densidad básica promedio de la madera de las especies estudiadas..... | 23 |
| Cuadro 3. Contenido de Carbono promedio (%) en las especies estudiadas según (CONAFOR, 2008). | 24 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 4. Características dasométricas de los árboles evaluados para cuantificar la producción de Oxígeno en fuste. | 27 |
| Cuadro 5. Estadísticos y parámetros de ajuste del modelo de Schumacher utilizado para estimar biomasa en fuste de Pinus Pseudostrobus, Pinus devoniana, Pinus greggii, Pinus halepensis y Pinus cembroides. | 31 |
| Cuadro 6. Estadísticos y parámetros de ajuste del modelo de Schumacher utilizado para estimar Carbono en fuste de Pinus pseudostrobus, Pinus devoniana, Pinus greggii, Pinus halepensis y Pinus cembroides. | 32 |
| Cuadro 7. Oxígeno producido a la edad de 20 años en especies de Pinus pseudostrobus, Pinus devoniana, Pinus greggii, Pinus halepensis y Pinus cembroides. | 36 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Relación de biomasa A) y Carbono B) estimados en Pinus pseudostrobus, Pinus devoniana, Pinus greggii, Pinus halepensis y Pinus cembroides. | 30 |
| Figura 2. Predicción de Carbono almacenado en fuste con el modelo de Schumacher (A, C, E, G, I) e incremento corriente anual (ICA) en Carbono (B, D, F, H, J), en Pinus pseudostrobus, Pinus devoniana, Pinus greggii, Pinus halepensis y Pinus cembroides. | 34 |
| Figura 3. Producción de Oxígeno en fuste de Pinus pseudostrobus, Pinus devoniana, Pinus greggii, Pinus halepensis y Pinus cembroides. | 36 |
| Figura 4. Oxígeno acumulado en Pinus pseudostrobus, Pinus devoniana, Pinus greggii, Pinus halepensis y Pinus cembroides. | 37 |

RESUMEN

Los bosques absorben dióxido de Carbono durante el proceso de fotosíntesis, transformándolo a biomasa y produciendo Oxígeno. El presente estudio tiene como objetivo evaluar la cantidad de Oxígeno (O_2) producido por plantaciones de *Pinus pseudostrobus* (*Pps*), *Pinus devoniana* (*Pd*), *Pinus greggii* (*Pg*), *Pinus halepensis* (*Ph*) y *Pinus cembroides* (*Pc*) usando 20 árboles de *Pps*, *Pd* y *Pg*; mientras que para *Ph* y *Pc* se usaron 45 y 30 respectivamente. El O_2 fue estimado a partir de la fórmula de la fotosíntesis. El volumen de cada edad del árbol se obtuvo mediante análisis troncales, después se transformó a biomasa usando la densidad básica de la especie, y ésta se transformó a Carbono. Para obtener el secuestro (incremento) de Carbono se utilizó el modelo de Schumacher tomando como variable independiente la edad y derivando $\partial y/\partial x = -b/x^2 \cdot \exp(a+b/x)$, donde: y = Carbono en fuste, x = edad y a y b = parámetros del modelo. Los resultados indican que el modelo de Schumacher se ajusta adecuadamente para estimar Carbono en fuste de las especies. A la edad de 20 años la especie que produce mayor cantidad de O_2 es *Pinus pseudostrobus* con 7.84 kg, por el contrario *Pinus cembroides* produce solo 0.18 kg. Existen grandes diferencias en la producción de O_2 entre especies, las cuales son directamente proporcionales con el crecimiento en incremento de diámetro y altura de las especies. Este estudio demuestra la importancia que tienen las especies en los servicios ambientales, mismo que contribuye con información para tomadores de decisiones del ámbito forestal, especialmente con fines de reforestación.

Palabras clave: Oxígeno, Carbono, plantación, fotosíntesis, incremento.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es hoy en día uno de los principales problemas ambientales más severos al que nos enfrentamos, el cual se debe al incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) como dióxido de Carbono (CO_2), clorofluorocarbonados, óxidos de nitrógeno y metano, que se derivan de actividades antropogénicas como el cambio de uso de suelo, deforestación, incendios forestales y producción de cemento, entre las principales. Es por esto la preocupación a nivel mundial de mitigar dichos gases y esto ha permitido reconocer la importancia de los ecosistemas terrestres y en particular el papel que tiene la vegetación para captar el CO_2 por medio de la fotosíntesis y de esta forma reducir la concentración de CO_2 en la atmósfera (Ordóñez, 2008).

Los bosques almacenan grandes cantidades de Carbono (C) en la vegetación y el suelo e intercambian C con la atmósfera. El dióxido de Carbono presente en la atmósfera es absorbido por las plantas, a través del proceso de fotosíntesis. Por este medio convierten la energía de la luz solar en energía química la cual es aprovechada por los organismos vivos (Gayoso, 2005).

Los ecosistemas forestales nos ofrecen diversos beneficios, como protección del suelo, regulación microclimática, cortina de vientos, mitigación de la movilidad en sustratos arenosos, hacen la función de pulmón en áreas urbanas, permiten la conservación de la biodiversidad y la captación y almacenamiento de agua, además de la fijación o captación de Carbono (Ordóñez, 2008). Uno de los más citados es el Oxígeno (O_2) ya que es indispensable para sobrevivir, este elemento lo podemos obtener en diferentes cantidades ya que depende de la especie y tamaño de los árboles pero sobre todo de la velocidad de

crecimiento. El O₂ es proporcional a la tasa de crecimiento e incremento de biomasa (Nowak *et al.*, 2007).

Se define la biomasa forestal como el peso seco de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo, normalmente se cuantifica en toneladas por hectárea de peso seco o verde; para determinar la biomasa es necesario separarla en componentes tales como fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta, la cantidad de biomasa de estos componentes varía según el tamaño de los árboles y las especies (Schlegel, *et al.*, 2000; Gayoso, 2001; Díaz *et al.*, 2007; Pimienta *et al.*, 2007; Pacheco *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011).

El crecimiento es el cambio de dimensión de un organismo en el tiempo, mientras que el incremento es la magnitud del cambio, esto depende de la especie, edad y otros factores. El procedimiento por el cual se puede conocer el crecimiento e incremento de los árboles durante su vida se llama análisis troncal, este consiste en derribar el árbol y tomar rodajas transversales, las cuales varían dependiendo de la altura del árbol (Klepac, 1976).

Los modelos de crecimiento son ecuaciones que se utilizan como herramientas que facilitan la toma de decisiones ya que describen el incremento experimentado por los individuos de una determinada población en función de una determinada variable independiente o explicativa (Valerio, 1997).

La FAO (2001), define a una plantación forestal como un bosque establecido mediante una plantación/siembra en un proceso de forestación o reforestación. En la actualidad las plantaciones forestales son una de las estrategias para aumentar la captura de carbono de una manera eficiente, esto se debe a que los árboles jóvenes tienen una mayor acumulación de carbono, ya que no han alcanzado su punto máximo de crecimiento, mientras que en

bosques maduros el incremento en la acumulación de carbono disminuye esto debido a que el crecimiento es nulo o casi nulo. De esta manera la forestación o reforestación es una alternativa para reducir la cantidad de CO₂ en la atmosfera (Ordóñez *et al.*, 2001).

El Oxígeno es uno de los muchos beneficios que nos ofrecen los ecosistemas forestales, por lo que es importante conocer las cantidades que nos proporcionan diferentes especies, en este caso del género *Pinus*, esto con el fin de contribuir al conocimiento y que se le dé un valor como servicio ambiental.

1.1. Objetivo general

Evaluar la producción de Oxígeno en cinco especies de coníferas en plantaciones forestales a través de modelos de crecimiento.

1.2. Objetivos específicos

Ajustar un modelo de crecimiento para estimar incrementos en biomasa, Carbono y Oxígeno en fuste de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana*, *P. greggii*, *P. halepensis* y *P. cembroides* provenientes de plantaciones forestales.

Cuantificar la producción de Oxígeno en fuste de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana*, *P. greggii*, *P. halepensis* y *P. cembroides* a través de análisis troncales y modelos de crecimiento.

1.3. Hipótesis

La producción de Oxígeno en fuste de las especies estudiadas, estimada mediante análisis troncales es similar entre especies.

1.4. Justificación

En la actualidad, a nivel mundial, se conoce la cantidad de captura de Carbono de las especies más utilizadas de coníferas, sin embargo, se desconoce la cantidad de producción de Oxígeno por los mismos, por lo que esto da pauta a realizar esta investigación, dado que es uno de los servicios ambientales que es de gran importancia, además de la producción de agua, hábitat para la fauna, regulación del microclima, captura de Carbono.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Gases de efecto invernadero

Son aquellos que se encuentran en la atmósfera; vapor de agua (H₂O), dióxido de Carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), óxido de nitrógeno (NO_x), ozono estratosférico (O₃), monóxido de carbono (CO) y los clorofluorocarbonos (CFC), siendo de todos estos el más importante el CO₂ ya que sus emisiones mundiales aumentaron un 80 % entre 1970 y 2004, esto se debe principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y en una parte menos a los cambios de uso de suelo (IPCC, 2013).

2.2. Servicios ambientales

Los ecosistemas forestales proporcionan múltiples beneficios como: retención de suelo, captación de agua, producción de Oxígeno, regulación microclimática, hacen la función de pulmón en zonas urbanas y uno de los más citados en la actualidad es la captura de Carbono.

Uno de los problemas ambientales más severos al que nos enfrentamos en el presente siglo es el cambio climático, el cual se debe al incremento en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, derivados del cambio en el uso de suelo, deforestación, incendios forestales y producción de cemento, entre las principales. Es por eso que existe un mercado por los servicios ambientales y el precio por fijación de carbono es variable y dependerá de las oportunidades del mercado que rige la oferta y la demanda o de las estrategias gubernamentales que se han desarrollado para este fin. El precio se paga por tonelada de Carbono fijado por hectárea, y existen cuotas mínimas de fijación para el

mercado establecido por los mecanismos de desarrollo limpio, donde muchas empresas emisoras y comunidades poseedoras de áreas con vegetación pueden ofrecer el servicio ambiental (Ordóñez *et al.*, 2008).

2.3. Estudios afines de cuantificación de biomasa y captura de carbono en plantaciones forestales

Ramírez *et al.*, (2012) evaluaron el potencial de captura y almacenamiento de CO₂ en el valle de Perote en *Pinus cembroides* subsp. *Orizabensis*, el método que se utilizó fue el propuesto por el (IPCC, 1994) el cual fue desarrollado para estimar el contenido de carbono en rodales naturales considerando el volumen real por hectárea y la superficie de los rodales; encontrando un total de carbono almacenado en la biomasa aérea de 2,126.90 kgC, con un promedio general de 4.44, un mínimo de 0.057 y máximo de 13.25 kgC en una superficie de 2945 m². Se determinó que en una hectárea se puede llegar a capturar un total de 7.22 toneladas de carbono.

Montoya, (2014) realizó un estudio de cuantificación de biomasa aérea, carbono y oxígeno en una plantación de *Pinus halepensis* Mill, en Arteaga, Coahuila, este estudio se realizó con la metodología del método destructivo para cuantificar biomasa aérea y realizar análisis troncal a 30 individuos. Con el modelo de Schumacher se estimó el incremento en carbono y producción de oxígeno. Teniendo como resultado un porcentaje de biomasa almacenado en hojas, ramas y fuste de 10, 20 y 61 % respectivamente; en cuanto a carbono almacenado a la edad de 25 años es de 2.30 kg C año⁻¹ y produce 6.14 kg O₂ árbol⁻¹ año⁻¹ lo que representa 19.23 t O₂ ha⁻¹ año⁻¹.

Iturbide (2014) realizó un estudio para cuantificar biomasa y carbono en *Pinus cembroides* Zucc, mediante un modelo alométrico en los Lirios Arteaga, Coahuila. Utilizó el método directo el cual consiste en derribar el árbol y pesar cada uno de sus componentes (hojas, ramas y fuste), para esto se seleccionaron 48 árboles y se midió diámetro a la base, diámetro de copa, altura total y altura del fuste limpio. La biomasa de cada componente fue calculada con el modelo alométrico de la forma lineal: $y = \log a + b \log x$; donde (y) es biomasa seca de cada componente; (x) el diámetro de la base y a y b parámetros del modelo. Los resultados obtenidos es biomasa promedio 21.30, 35.81 y 42.80 % en hojas, ramas y fuste respectivamente. El mejor ajuste se obtuvo con datos de biomasa total ($R^2 = 0.80$) y el más bajo de ramas ($R^2 = 0.57$).

Méndez et al., (2011) realizaron un estudio en Jerécuaro, Guanajuato, México, teniendo como objetivo ajustar ecuaciones alométricas para cuantificar la acumulación de biomasa (B), carbono (C) y carbono equivalente (CO₂e) en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrobus* Lindl., de 12 años de edad, la biomasa de cada árbol, hojas más ramas (*Bhr*), fuste (*Bf*) y total (*Bt*), fue calculada usando la relación peso seco y peso fresco, en 20 árboles de cada especie. Mediante análisis troncales y el modelo de Schumacher obteniendo la tasa de incremento anual de B, C y CO₂e, los resultados indican que las ecuaciones alométricas cuantifican eficientemente los componentes de biomasa, especialmente de *Bf* ($R^2 > 0.85$) en *P. pseudostrobus*, esta especie mostró los mayores incrementos en biomasa aérea El 60.2 y 58.4 % de la biomasa aérea total fue registrada en el fuste; 39.8 y 41.6 % en las hojas y ramas de *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*. Los valores calculados fueron 39.36 t B ha⁻¹, 19.68 t C ha⁻¹, después de 12 años de establecida la plantación. Según el modelo de Schumacher, la máxima productividad de biomasa aérea

(*B* y *Bhr*) se alcanza a los 20 años de edad, lo que representa 3.96, 1.98 y 7.27 t ha⁻¹ año⁻¹ de B, C y CO₂e respectivamente.

2.4. Estudios a fines de estimación de biomasa y carbono en bosque natural

Avendaño et al., (2009) realizaron un estudio de estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*, utilizaron datos de 26 árboles de un área en aprovechamiento forestal, con diámetro normal entre 6.5 y 79 cm, en el predio “El Innominado” en San Felipe Hidalgo Nanacamilpa, Tlaxcala, México. A cada árbol se le determinó la biomasa de sus componentes (fuste, ramas y follaje); de este material se seleccionaron al azar 10 submuestras de fuste, 10 de ramas y 6 de follaje, y todas se analizaron para determinar su concentración de carbono. La concentración de carbono en el fuste fue de 46.6 %, en las ramas fue de 46 % y en follaje 46.1 %, y la concentración promedio de carbono por árbol fue de 46.5 %. El mayor porcentaje de biomasa (84.5 %) se encontró en el fuste incluido el tocón, mientras que en las ramas y el follaje hubo 6.9 y 8.6 %, respectivamente.

Yerena et al., (2011) en un estudio realizado en el noreste de México, determinaron la concentración de Carbono en el fuste de 21 especies de coníferas, los sitios de muestreo tuvieron características como amplia diversidad de especies, individuos de diferentes diámetros y condiciones adecuadas para efectuar las mediciones correspondientes; se seleccionaron 70 individuos para las 21 especies. La metodología utilizada fue el método no destructivo que consistió en extraer una viruta del fuste del árbol a 1.30 m. El análisis de varianza determinó que existen diferencias significativas entre la concentración promedio de carbono de los fustes de las especies ($P < 0.0001$). En *Pinus remota* (Little) Bailey et Hawksw. y *Pinus culminicola* Andersen et Beaman se registraron los menores

porcentajes con 45.67 % y 46.13 %, respectivamente. En cambio, *Juniperus flaccida* Schltdl. resultó con el valor más alto (51.18 %), la media general fue de 48.39 %.

Gayoso et al., (2005) determinaron el contenido de carbono (C) en fuste, ramas, hojas y corteza de 16 especies del bosque nativo en Chile. Los contenidos promedio de C orgánico en las especies fluctuaron entre 34.9 y 48.3%, y el promedio simple alcanzó a $43.7 \pm 0.16\%$. Mientras, el C total mostró ser en promedio $5.5 \pm 0.76\%$ mayor que el contenido de C orgánico. Se encontraron diferencias significativas en el contenido de C orgánico entre grupos de especies y entre componentes del árbol. El Carbono del fuste ($44.4 \pm 0.16\%$), en general, para todas las especies resultó ligeramente mayor que en las ramas, hojas y corteza ($43.5 \pm 0.21\%$), siendo mayor la variabilidad en estos últimos. La especie con el mayor contenido de C orgánico en la biomasa del fuste resultó *Saxegothaea conspicua* (mañío hembra) con $47.8 \pm 0.38\%$. Por su parte, *Weinmannia trichosperma* (tineo) mostró el menor porcentaje, $42.6 \pm 0.54\%$.

Díaz et al., (2007) en un estudio realizado en el ejido Mariano de Matamoros, Tlaxco, Tlaxcala se seleccionaron 25 árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham., y determinaron su biomasa y Carbono en el estrato aéreo para ajustar el modelo $Y=b.X^k$, tomando como variable independiente el diámetro normal. Se obtuvieron muestras de cada uno de los siguientes componentes (fuste, ramas y follaje) de cada árbol, y en el campo se determinó el peso fresco, tanto de la muestra como del componente. Las muestras se llevaron al laboratorio para ser secadas y obtener su peso seco, para después estimar la biomasa total de cada árbol, usando para ello la relación peso seco: peso fresco de las muestras. Para determinar el carbono de los diferentes componentes se tomaron muestras de cinco árboles y fueron analizadas en el laboratorio, obteniendo así 52.21 % de carbono en el follaje,

49.47 % en las ramas y 49.26 % en el fuste, de esta forma la concentración promedio por árbol fue de 50.31 %. Para estimar la biomasa se ajustó y generó la ecuación $B = 0.0357 * DN^{2.6916}$, y para estimar el carbono la ecuación ajustada fue $CC = 0.021 * DN^{2.6451}$, con los coeficientes de determinación para ambas de 0.98.

Rodríguez et al., (2009) realizaron un estudio que tuvo como objetivo estimar y conocer la distribución del Carbono almacenado en un bosque de pino-encino que se encuentra resguardado dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. Las variables que se midieron fueron altura total, diámetro normal y altura al inicio de copa, y con estos datos se calculó el volumen, estimándose la biomasa con el modelo de la forma $B=a.D^b$ donde: B = biomasa (kg); D = diámetro normal del árbol (cm); a y b = parámetros de estimación, dicho valor se multiplicó por el porcentaje de C obtenido con el equipo Solids TOC Analyzer para cada especie obteniendo la cantidad de C almacenado por árbol, hojarasca y necromasa. Con el modelo se obtuvo para cada especie un coeficiente de determinación (R^2) superior al 0.95. Sin embargo, se estimaron 219.3 t ha^{-1} de biomasa. Así mismo, se estimó un total de 110 t C ha^{-1} almacenada de la forma siguiente: en fustes, ramas y hojas se encuentra el 75.3 %, en raíces el 15 %, en hojarasca el 9 % y en los renuevos y la necromasa se encuentra el 0.4 y 0.3 % respectivamente.

Fonseca et al., (2009) en un estudio realizado en la zona Caribe de Costa Rica que tuvo por objetivo construir modelos para estimar la biomasa del árbol en plantaciones de *Hieronyma alchorneoides*, *Vochysia guatemalensis* y para un grupo de 35 especies en bosque secundario. En cada plantación se extrajo un árbol de diámetro promedio a la altura del pecho (d) y en bosque secundario un árbol de d promedio de la especie de mayor índice de valor de importancia por clase diamétrica. Se utilizó un muestreo destructivo, separando

cada componente del árbol y tomando una muestra de campo para determinar la materia seca. Todos los modelos seleccionados tuvieron un R^2_{aj} superior al 82.6 %. Las especies arbóreas de bosque secundario mostraron R^2_{aj} inferiores. El fuste, raíz y biomasa total del árbol mostraron $R^2_{aj} > 91.3\%$, y las hojas y ramas, entre 82.6 y 94.1 %. El factor de expansión de biomasa en bosque secundario fue de 1.44 y en plantaciones de 1.56. Se estimó que la relación de biomasa radical respecto a biomasa aérea total y biomasa del fuste fue 0.25 y 0.37, respectivamente, en bosques secundarios; 0.26 y 0.39 en *V. guatemalensis*, y 0.3 y 0.52 en *H. alchorneoides*.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

Las plantaciones de *Pinus greggii*, *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis* se localizan 25° 23' LN, 100° 36' LO, en Coahuila, México, a 2270 msnm, en la Sierra Madre Oriental. Ambas plantaciones se establecieron en el año 1992, teniendo 23 años en la fecha de la evaluación. El suelo es feozem calcárico (García, 1987), el cual se caracteriza por presentar material cálcico entre los 20 y 50 cm de profundidad; el clima es templado Cb(X)(Wo)(e)g, con temperatura media anual de 13.3° C y precipitación promedio anual de 521 mm (García, 1998). El área de estudio se ubica dentro de la provincia de la Sierra Madre Oriental y se encuentra dentro de la región hidrológica Bravo-Conchos (RH24) y la cuenca hidrológica Rio Bravo- San Juan (24B) (INEGI, 2000).

La plantación de *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus* se localiza en el predio El Clarín, municipio de Jerécuaro, estado de *Guanajuato*, México, establecida en el año 1998, teniendo una edad de 11 a 13 años en la fecha de la evaluación. Se ubica en la exposición norte y cima del macizo montañoso Cerro de las Escobas, a una altitud superior a 2850 m, al sureste del estado. El clima es templado subhúmedo, C (W1), precipitación mayor a 700 mm y temperatura media anual de 15.0 °C (García, 1988). Se ubica en la región hidrológica Río Lerma-Santiago (RH12) y la cuenca Río Lerma-Toluca (RH12A) (INEGI, 2000).

Cuadro 1. Características promedio del medio físico de donde se ubican las especies estudiadas.

| Sitio | Especies | asnm | TM | PP | S | C |
|----------------|-------------------|------|------|-----|------------------|---------------|
| El Clarín, Gto | <i>Pd; Pps</i> | 2850 | 26.3 | 700 | Feozem háplico | C (w1) |
| UAAAN | <i>Pg; Pc; Ph</i> | 2270 | 13.3 | 521 | Feozem calcárico | Cb(X)(Wo)(e)g |

Pd = *Pinus devoniana*; *Pps* = *Pinus pseudostrobus*; *Pg* = *Pinus greggii*; *Pc* = *Pinus cembroides*; *Ph* = *Pinus halepensis*; asnm = altura sobre el nivel del mar (m); TM = temperatura media (°C); PP = precipitación media anual (mm); S = tipo de suelo; C = clima.

3.2. Descripción de las especies estudiadas

Pinus cembroides (*Pc*) es la especie con más distribución geográfica ya que se extiende en casi todo el norte y centro del país, abarca desde el oeste de Estados Unidos de América hasta México en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo. Crece sobre laderas, montañas, lomeríos, al pie de cerros, con pendientes, en lugares donde la precipitación media anual oscila de 350 a 700 mm, sus límites altitudinales entre 1500 y 3000 msnm (Rzedowski, 2006).

Algunos usos de *Pinus cembroides*. La resina es utilizada como materia prima en impermeabilizantes y como pegamento de ollas y canastas, leña para combustible doméstico. Es una especie importante comercialmente por su semilla comestible ya que tiene un alto contenido nutricional, alto porcentaje de grasas y proteínas (CONAFOR, 2015).

Pinus halepensis Mill (*Ph*) se distribuye naturalmente en la zona del mediterráneo desde África, Asia y Europa (De las Heras *et al.*, 2011) se encuentra desde los primeros metros sobre el nivel del mar hasta los 2200 msnm, puede alcanzar una altura de 15 a 20 metros y un diámetro de 70 cm. En México es una especie introducida que se puede encontrar en el noreste de la república, en suelos poco profundos arenosos, franco arenoso y con un buen drenaje, algunos de sus usos son de ornamento y protección y restauración de suelos (CONAFOR, 2015).

Pinus pseudostrobus (*Pps*) llega a tener alturas entre 30 y 40 metros a veces hasta 45 metros, diámetros de 40 a 80 cm, se encuentra en altitudes de 2,400 a 2,800 msnm es originario de México, Guatemala y Honduras, en México es encontrado en Jalisco, Michoacán, Edo. de México, Distrito Federal, Morelos, Puebla, Hidalgo, Tlaxcala, Veracruz, Oaxaca, Guerrero y Chiapas. Se distribuye escasamente en el norte de México se utiliza principalmente para restauración de suelos degradados (CONAFOR, 2015).

Pinus devoniana (*Pd*) se distribuye desde el centro de México hasta el centro de Guatemala; en México en los estados de Nayarit, Zacatecas, Jalisco, Colima, Michoacán, Hidalgo, México, Puebla, Morelos, Guanajuato, Tlaxcala, Guerrero, Oaxaca, Veracruz y Chiapas, llega a medir de 20 - 30 m de alto y 1 m de diámetro normal, se encuentra en altitudes de 1900 a 3000 msnm (CONAFOR, 2015).

Pinus greggii (*Pg*) es una especie endémica de México con gran importancia ecológica y económica. Este pino se distribuye en los estados de Puebla, Hidalgo, Querétaro, San Luis Potosí, Coahuila y Nuevo León (Ramírez *et al.*, 2005). Árbol pequeño de 10 a 25 m de altura, de crecimiento rápido, se desarrolla en suelos de origen volcánico, ubicados en las mesetas altas y pendientes bajas de las montañas, sitios donde se encuentran los mejores

ejemplares. También se pueden desarrollar en sitios secos o áridos, aunque bajo estas condiciones el crecimiento es lento y los árboles son de baja estatura y muy ramificados, presenta resistencia a heladas (CONAFOR, 2015).

3.3. Método directo para estimar biomasa

Para cuantificar biomasa en este estudio, se utilizó el método destructivo propuesto Schlegel et al., (2000). Se seleccionaron los árboles que serían estudiados, en este caso fueron 30 de *Ph* y 45 de *Pc* para el caso de *Pg*, *Pps* y *Pd* fueron 20 árboles. Se obtuvieron algunas medidas dasométricas de los árboles (diámetro a la altura del pecho, diámetro a la base y diámetro de copa). Posteriormente se derribó el árbol con ayuda de una motosierra, practicando el derribo direccionado, para no dañar árboles vecinos, después el árbol se desramó y posteriormente se midió la altura total del árbol.

3.4. Muestras para realizar análisis troncales

Para realizar análisis troncales, de cada árbol se obtuvieron al menos seis rodajas extraídas a diferentes alturas con un espesor de aproximadamente 5 cm. La primer rodaja corresponde a la base del árbol (5 cm sobre el suelo), la segunda rodaja se obtuvo a la altura de 1.3 m y las otras se obtuvieron a cada 0.5 m de distancia sobre el fuste. Con estos datos fue posible estimar diámetro, altura y volumen a las diferentes edades del árbol.

Para realizar el análisis troncal se procedió al secado de las rodajas, para esto se utilizó una estufa marca Blue M a 70 C° durante 15 días (Méndez *et al.*, 2011), posteriormente las muestras se lijaron con lijadora eléctrica de banda marca Makita con motor de 1010 w, modelo 9404, después se realizó la medición de los diámetros de todos los anillos

contenidos en cada rodaja con un microscópico estereoscópico binocular o de disección con zoom 2X a 4X de la marca NATIONAL de 120 v y regla graduada en 30 cm.

Los datos se almacenaron en una hoja de cálculo de Microsoft Office (Excel) para su análisis, el intervalo de edad fue consecutivo para mayor precisión, obteniendo así el diámetro en todas las edades (Mass, 1970). Se calculó el volumen total a diferentes edades de cada árbol, mediante la fórmula propuesta por Smalian:

$$V = (AB1 + AB2) * L \quad 1)$$

Donde:

V = volumen (m³)

AB1 = área basal menor (m²)

AB2 = área basal mayor (m²)

L = longitud de la troza (m)

Para obtener el volumen del tocón se utilizó la fórmula de un tipo dendrometrico neloide paraboloides expresado con la fórmula:

$$V = 0.7854 * (d^2) * L \quad 2)$$

Donde:

V = volumen (m³)

d = diámetro del tocón (m)

L = longitud o altura del tocón (m)

Para obtener el volumen de la punta del fuste se utilizó la fórmula de un tipo dendrométrico como truncado expresado en la siguiente ecuación:

$$V = \frac{1}{2} * \pi * r^2 * L \quad 3)$$

Donde:

V = volumen (m³)

R = radio (m)

L = longitud de la punta del fuste (m)

π = valor de pi (3.1416)

3.5. Obtención de biomasa en fuste de las especies estudiadas

La biomasa contenida en el fuste de cada árbol se obtuvo por el producto del volumen (m³) del fuste a diferentes edades por la densidad básica de la madera (kg/m³) de cada una de las especies, estas fueron obtenidas de diferentes trabajos que se han realizado, según la siguiente expresión:

$$B = Vol * PE \quad 4)$$

Donde:

B = biomasa (kg)

Vol = volumen del fuste (m³)

PE = densidad básica de la madera (kg / m³)

Cuadro 2. Densidad básica promedio de la madera de las especies estudiadas.

| Especie | Densidad básica (kg/m³) | Fuente |
|-------------------------|---|--------------------------|
| <i>P. pseudostrobus</i> | 463 | Wright y Wessels (1992) |
| <i>P. devoniana</i> | 430 | Hidayat y Simpson (1994) |
| <i>P. greggii</i> | 535 | López y Valencia (2001) |
| <i>P. halepensis</i> | 450 | Oliveras et al (2001) |
| <i>P. cembroides</i> | 406 | Patrick y Brad (2009) |

3.6. Obtención de Carbono en fuste de las especies estudiadas

El Carbono almacenado en el fuste de cada árbol se obtuvo a través del producto de la biomasa del fuste (B) por la fracción de carbono (FC) de cada especie contenido en la biomasa, acorde a la siguiente fórmula:

$$C = B * FC \quad 5)$$

Donde:

C = carbono (kg)

B = biomasa (kg)

FC = contenido de carbono (%)

Cuadro 3. Contenido de Carbono promedio (%) en las especies estudiadas según (CONAFOR, 2008).

| Especie | Contenido de Carbono (%) |
|-------------------------|---------------------------------|
| <i>P. pseudostrobus</i> | 50.35 |
| <i>P. devoniana</i> | 54.00 |
| <i>P. greggii</i> | 47.13 |
| <i>P. halepensis</i> | 50.00 |
| <i>P. cembroides</i> | 50.25 |

3.7. Predicción de biomasa, Carbono e incrementos anuales

Para predecir el Carbono acumulado en el fuste de los árboles, los datos de biomasa y Carbono se evaluaron con el modelo de crecimiento de Schumacher, acorde lo sugieren Méndez et al., (2011), utilizando como variable independiente la edad, modelo expresado de la siguiente manera:

$$Y = \exp (\beta_0 + \beta_1/E) \quad 6)$$

Donde:

Y = carbono y biomasa de fuste (kg)

β_0 y β_1 = parámetros de la regresión

exp = exponencial

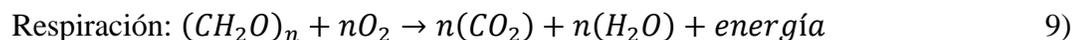
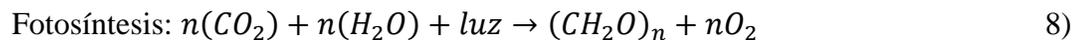
E = edad (años)

El incremento corriente anual (ICA) de biomasa y Carbono, se obtuvo derivando la ecuación antes mencionada:

$$ICA: \frac{Y}{E} = - \frac{\beta_0}{E^2} \exp (\beta_0 + \beta_1 / E) \quad 7)$$

3.8. Cuantificación de Oxígeno en fuste

La producción de Oxígeno de un árbol durante un año, está directamente relacionada con la cantidad de Carbono almacenado, mismo que se encuentra almacenado en la biomasa de los árboles y si la captación de Dióxido de Carbono durante la fotosíntesis excede la liberación de Dióxido de Carbono por la respiración durante el año, el árbol acumulará Carbono (Nowak *et al.*, 2007). De este modo, un árbol que tiene una acumulación neta de Carbono durante un año (crecimiento de los árboles) también tiene una producción neta de Oxígeno (Yolasigmaz y Keles, 2009). Salisbury y Ross (1978) mencionan que la producción neta de Oxígeno de los árboles se basa en la cantidad de Oxígeno producido durante la fotosíntesis menos la cantidad de Oxígeno consumido durante la respiración de las plantas.



De este modo la cantidad de Oxígeno producido se estima a partir de la captura de Carbono en base a los pesos atómicos: Producción neta de O₂ (kg/año) = Carbono secuestrado en la biomasa (kg/año)*(32/12).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características dasométricas de las especies estudiadas

El presente estudio se realizó con cinco especies de coníferas de dos diferentes sitios una ubicada en la Sierra de Arteaga, Coahuila y la otra en un predio denominado el Clarín en Jerécuaro, Guanajuato, evaluando la cantidad de árboles por especie de *Pinus pseudostrobus* = 20, *Pinus devoniana* = 20, *Pinus greggii* = 20, *Pinus halepensis* = 30 y *Pinus cembroides* = 45; con una edad promedio de los árboles analizados de 23 años para *Pinus cembroides*, *Pinus greggii* y *Pinus halepensis* y 12 años para *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus*.

A la edad de 12 años *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* presentan un diámetro y una altura promedio de 18.73 cm, 9.82 m y 18.33 cm, 9.12 m, respectivamente. En las especies de *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides* a la edad de 23 años presentan un diámetro promedio y una altura de 10.63 cm, 6.93 m; 10.1 cm, 2.6 m, 6.53 cm, 1.41 m, respectivamente. Návar et al., (2001) en el estudio de ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, analizaron cinco especies, *Pinus duranguensis* = 25, *Pinus cooperi* O. = 19, *Pinus arizonica* = 4, *Pinus cooperi* B. = 2 y *Pinus engelmannii* = 6 teniendo un total de 56 árboles, con diámetros de 11 a 16.3 cm. Díaz et al., (2007) en su estudio realizado en Tlaxco, Tlaxcala, México, denominado ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. Et Cham analizaron 25 árboles con diámetros que varían de 6.7 a 64.1; estos trabajos comparados con el presente estudio el número de árboles analizados son inferiores.

Cuadro 4. Características dasométricas de los árboles evaluados para cuantificar la producción de Oxígeno en fuste.

| Especie | Características dasométricas | | | |
|-------------------------|------------------------------|--------|--------|-------|
| | Variable | Máximo | Mínimo | Media |
| <i>P. pseudostrobus</i> | DN | 27 | 14.5 | 18.7 |
| | HT | 12.6 | 7.4 | 9.8 |
| | DC | 9.4 | 4.4 | 6.9 |
| <i>P. devoniana</i> | DN | 23 | 13 | 18.3 |
| | HT | 10 | 5.6 | 8.1 |
| | DC | 7.5 | 3.0 | 5.6 |
| <i>P. greggii</i> | DN | 15.3 | 4.9 | 10.6 |
| | HT | 8.7 | 4.2 | 6.9 |
| | DC | 4.1 | 1.2 | 2.8 |
| <i>P. halepensis</i> | DN | 22.5 | 4 | 10.1 |
| | HT | 11.3 | 5.1 | 8.3 |
| | DC | 5 | 1.2 | 2.6 |
| <i>P. cembroides</i> | DN | 8.9 | 4.3 | 6.5 |
| | HT | 3.4 | 1.7 | 2.6 |
| | DC | 2.6 | 0.8 | 1.4 |

DN = diámetro normal (cm); HT = altura total (m) y DC = diámetro de copa (m).

4.2. Estadísticos de ajuste del modelo de Schumacher para estimar biomasa y Carbono en fuste de las especies estudiadas

Para estimar la acumulación de biomasa el modelo que se utilizó fue el de Schumacher teniendo como variable independiente la edad, este modelo ha sido utilizado satisfactoriamente por Méndez et al., (2011) para estimar biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus pseudostrabus* y *Pinus devoniana*.

Al realizar el análisis de los estadísticos de ajuste (Cuadro 5) se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.80 para *Pinus Pseudostrabus* y *Pinus devoniana*; 0.86, 0.75, 0.73, para *Pinus greggi*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides* respectivamente en la estimación de biomasa de fuste.

Domínguez et al., (2009) en su estudio de biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León, específicamente en *Pinus pseudostrabus*, *Pinus teocote*, y *Quercus spp.*, ajustaron 15 modelos utilizando el diámetro normal como variable independiente, el modelo de mejor ajuste fue el de Michailoff con un coeficiente de determinación de 0.92, 0.89 y 0.93 para las tres especies respectivamente. Comparando estos resultados de estos autores con el presente estudio los coeficientes de determinación son superiores.

El coeficiente de variación indica la variabilidad de los datos de la muestra, en este caso se obtuvieron los siguientes valores: *Pinus pseudostrabus* = 66.59 %, *Pinus devoniana* = 42.32 %, *Pinus greggii* = 62.67 %, *Pinus halepensis* = 94.61 % y *Pinus cembroides* = 88.04 %. Como se puede observar la variación entre especies es significativa, comparando estos datos con los de Domínguez et al., (2009) en las especies de *Pinus pseudostrabus*, *Pinus*

teocote, y *Quercus spp.*, estos valores son altos ya que los datos que ellos obtuvieron fueron 25.51 %, 30.90 % y 23.56 % respectivamente.

Los estadísticos del modelo para estimar Carbono en fuste de las especies estudiadas también fueron obtenidos con el modelo de Schumacher, lo anterior para conocer las predicciones de biomasa y Carbono pero también para estimar incrementos anuales de ambas variables. El análisis de resultados demuestra que se tiene un coeficiente de determinación alto en *Pinus devoniana* con 0.90 y más bajo 0.73 en *Pinus cembroides*. En cuanto al coeficiente de variación el valor más alto se presenta en *Pinus greggii* con 98.56 % y el valor más bajo en *Pinus devoniana* con 42.35% (Cuadro 6).

4.3. Cuantificación de Biomasa y Carbono en fuste de las especies estudiadas

De acuerdo con el modelo utilizado (Ecuación 6) para estimar la acumulación de biomasa y Carbono los resultados muestran diferencias significativas ya que la especie que presenta mayor cantidad de biomasa a la edad de 20 años es *Pinus pseudostrobus* con 110.87 kg y 55.82 kg de Carbono, mientras que *Pinus cembroides* presenta la menor cantidad con 1.56 kg de biomasa y 0.78 kg de Carbono (Figura 1. A y B).

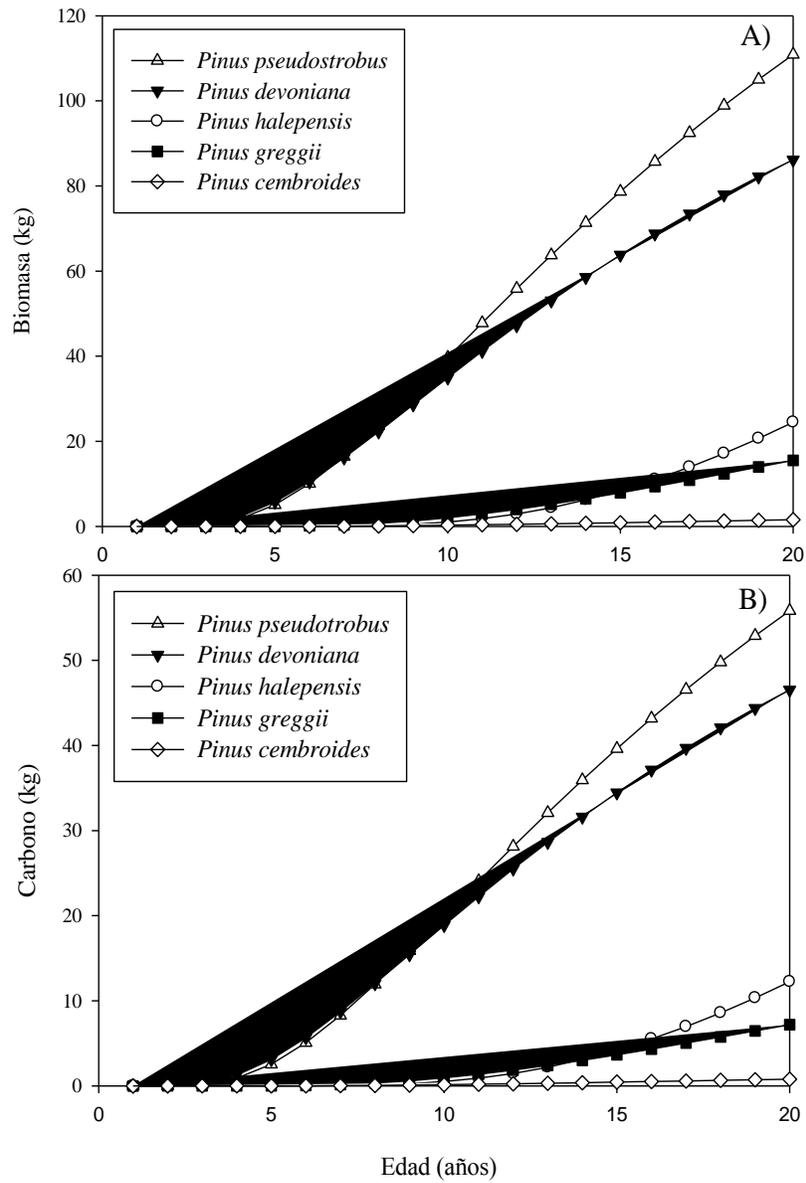


Figura 1. Relación de biomasa A) y Carbono B) estimados en *Pinus pseudostrobus*, *Pinus devoniana*, *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides*.

Cuadro 5. Estadísticos y parámetros de ajuste del modelo de Schumacher utilizado para estimar biomasa en fuste de *Pinus pseudostrobus*, *Pinus devoniana*, *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides*.

| <i>Sp</i> | β_0 | β_1 | CME | SCT | R^2_{aj} | Sxy | Media y | CV | F-Valor | Pr > F |
|------------|-----------------|-------------------|--------|---------|------------|---------|---------|----------|---------|--------|
| <i>Pps</i> | 5.7367 ± 0.1693 | -20.5652 ± 1.7424 | 187.2 | 233065 | 0.8080 | 13.6821 | 20.545 | 66.59579 | 503 | 0.0001 |
| <i>Pd</i> | 5.3581 ± 0.1062 | -18.0386 ± 1.0483 | 54.48 | 130408 | 0.8080 | 7.38106 | 17.4277 | 42.35248 | 1087.84 | 0.0001 |
| <i>Pg</i> | 4.7751 ± 0.1673 | -40.6510 ± 2.3665 | 2.5402 | 5805 | 0.8608 | 1.5938 | 2.543 | 62.67403 | 983.61 | 0.0001 |
| <i>Ph</i> | 6.3841 ± 0.1649 | -63.7459 ± 3.1588 | 37.987 | 90595.2 | 0.7513 | 6.16332 | 6.514 | 94.6165 | 895.96 | 0.0001 |
| <i>Pc</i> | 2.1949 ± 0.1222 | -34.8778 ± 1.8633 | 0.119 | 378.1 | 0.7347 | 0.34496 | 0.3918 | 88.04588 | 1166.91 | 0.0001 |

Sp = especie; *Pps* = *Pinus pseudostrobus*; *Pd* = *Pinus devoniana*; *Pg* = *Pinus greggii*; *Ph* = *Pinus halepensis*; *Pc* = *Pinus cembroides*; β_0 y β_1 = parámetros; CME = cuadrado medio del error; SCT = suma de cuadrados del total; R^2_{aj} = coeficiente de determinación; Sxy = error estándar; CV = coeficiente de variación; Pr>F = significancia estadística.

Cuadro 6. Estadísticos y parámetros de ajuste del modelo de Schumacher utilizado para estimar Carbono en fuste de *Pinus pseudostrobus*, *Pinus devoniana*, *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides*.

| <i>Sp</i> | β_0 | β_1 | CME | SCT | R ² aj | Sxy | Media y | CV | F-Valor | Pr > F |
|------------|-----------------|-------------------|--------|---------|-------------------|--------|---------|--------|---------|--------|
| <i>Pps</i> | 5.0505 ± 0.1693 | -20.565 ± 1.7424 | 47.457 | 59085 | 0.808 | 6.8889 | 10.3444 | 66.595 | 503.0 | 0.0001 |
| <i>Pd</i> | 4.7419 ± 0.1062 | -18.039 ± 1.0483 | 15.885 | 38027 | 0.9089 | 3.9856 | 9.4109 | 42.351 | 1087.8 | 0.0001 |
| <i>Pg</i> | 4.006 ± 0.1673 | -40.652 ± 2.3665 | 0.5459 | 1247.6 | 0.8608 | 0.7389 | 1.1787 | 62.684 | 983.67 | 0.0001 |
| <i>Ph</i> | 5.591 ± 0.1649 | -63.746 ± 3.1588 | 9.4966 | 22649 | 0.7513 | 3.0817 | 3.1265 | 98.566 | 895.96 | 0.0001 |
| <i>Pc</i> | 1.5067 ± 0.1222 | -34.8776 ± 1.8636 | 0.0301 | 95.4839 | 0.7346 | 0.1735 | 0.1969 | 88.113 | 1166.94 | 0.0001 |

Sp = especie; *Pps* = *Pinus pseudostrobus*; *Pd* = *Pinus devoniana*; *Pg* = *Pinus greggii*; *Ph* = *Pinus halepensis*; *Pc* = *Pinus cembroides*;

β_0 y β_1 = parámetros; CME = cuadrado medio del error; SCT = suma de cuadrados del total; R²aj = coeficiente de determinación; Sxy = error estándar; CV = coeficiente de variación; Pr>F = significancia estadística.

4.4. Incrementos en Carbono de las especies estudiadas

Las especies con mayor incremento en Carbono (a una edad base de 20 años) son *Pinus pseudostrobus* (Figura 2B) con 2.94 kg y *Pinus devoniana* (Figura 2D) con 2.15 kg, le sigue *Pinus halepensis* (Figura 2H) con 1.88 kg, *Pinus greggi* (Figura 2F) con 0.73 kg y por ultimo *Pinus cembroides* (Figura 2J) con 0.06 kg. Lo anterior demuestra diferencias importantes en crecimientos e incrementos en Carbono entre especies.

El mayor incremento en Carbono en *Pinus pseudostrobus* se da a la edad de 11 años con una cantidad de 4.10 kg, en *Pinus devoniana* a los 10 años con 4.10 kg, y en *Pinus greggi*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides* a la edad de 20 años con 0.73, 1.88 y 0.06 kg respectivamente.

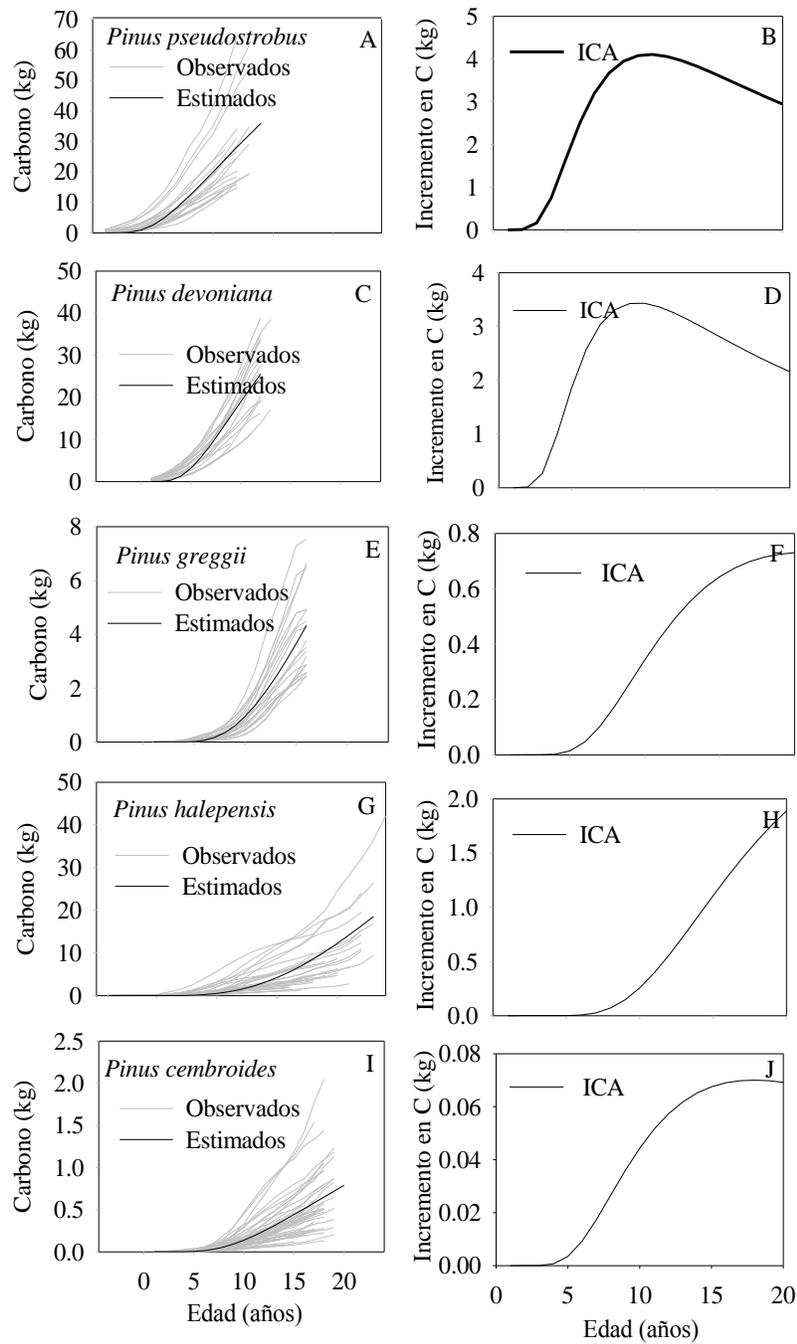


Figura 2. Predicción de Carbono almacenado en fuste con el modelo de Schumacher (A, C, E, G, I) e incremento corriente anual (ICA) en Carbono (B, D, F, H, J), en *Pinus pseudostrobus*, *Pinus devoniana*, *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides*.

4.5. Producción de Oxígeno para las especies estudiadas

El Oxígeno producido por las especies se calculó con el incremento corriente anual (ICA) de Carbono de fuste, multiplicado por la división de los pesos atómicos del Carbono y el Oxígeno. La producción de Oxígeno para *Pinus pseudostrobus* es de 7.84 kg, *Pinus devoniana* 2.75 kg, *Pinus greggi* 1.94 kg, *Pinus halepensis* 5.03 y *Pinus cembroides* 0.18 kg a la edad de 20 años.

Por la relación que existe entre el Carbono almacenado con el Oxígeno producido, se puede observar que las especies que producen mayor cantidad de éste son *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* esto también debido a que tienen un mayor incremento en Carbono por año.

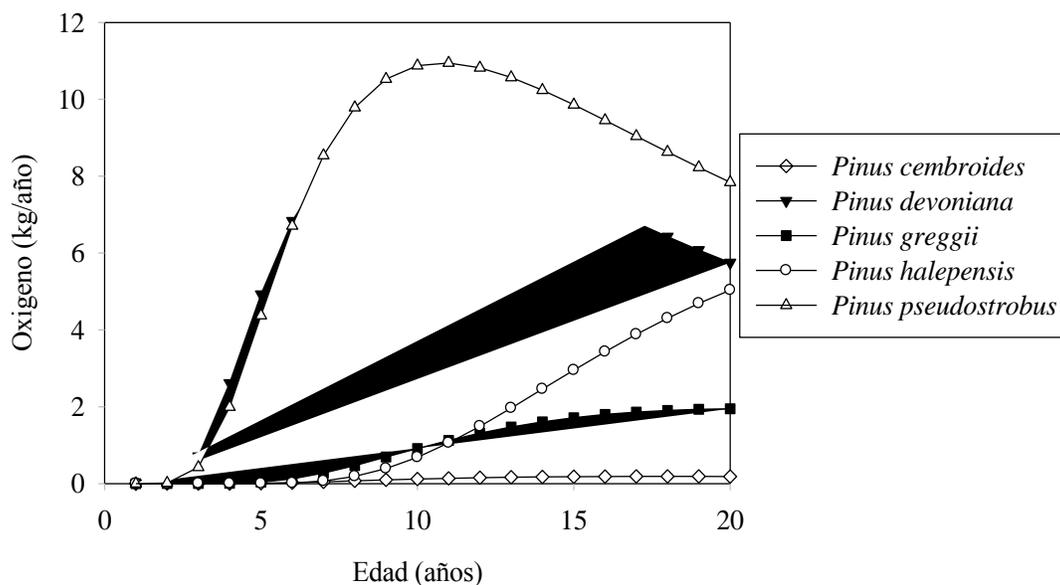


Figura 3. Producción de Oxígeno en fuste de *Pinus pseudostrobus*, *Pinus devoniana*, *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides*.

4.6. Producción de Oxígeno acumulado en las especies estudiadas

El Oxígeno acumulado (desde la edad 1 hasta 20 años) para las especies estudiadas a la edad base de 20 años es mayor en *Pinus pseudostrobus* (148.86 kg), seguido de *Pinus devoniana* (124.06 kg). *Pinus halepensis*, *Pinus greggii* y *Pinus cembroides* producen 32.61, 19.19 y 2.11 kg respectivamente (Figura 4).

Haciendo estimaciones de la producción de Oxígeno por las especies estudiadas y el consumo de Oxígeno por el ser humano se tiene: una persona consume aproximadamente 0.84 kg de Oxígeno por día (Perry y LeVan, 2003), lo que indica que una plantación de *Pinus halepensis* a la edad de 20 años con 3,133 árboles por hectárea estaría produciendo Oxígeno para 13,252 personas (Cuadro 7). La relación Oxígeno producido y consumo humano puede verse en el mismo cuadro.

Cuadro 7. Oxígeno producido a la edad de 20 años en especies de *Pinus pseudostrobus*, *Pinus devoniana*, *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides*.

| Especie | N | O ₂ (kg) | O ₂ acum (kg) | O ₂ kg.ha ⁻¹ | O ₂ ton.ha ⁻¹ | O ₂ g.día ⁻¹ | Personas |
|------------|------|---------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------|
| <i>Pps</i> | 555 | 7.84 | 148.86 | 4352.49 | 4.35 | 11924.63 | 3656.09 |
| <i>Pd</i> | 555 | 5.75 | 124.06 | 3192.13 | 3.19 | 8745.56 | 2681.38 |
| <i>Pg</i> | 2457 | 1.94 | 19.19 | 4784.79 | 4.78 | 13109.01 | 4019.22 |
| <i>Ph</i> | 3133 | 5.03 | 32.61 | 15777.08 | 15.77 | 43224.88 | 13252.75 |

Pc 3988 0.18 2.11 735.71 0.73 2015.62 617.99

Pps = *Pinus pseudostrobus*; *Pd* = *Pinus devoniana*; *Pg* = *Pinus greggii*; *Ph* = *Pinus halepensis*; *Pc* = *Pinus cembroides*; N = número de árboles por hectárea; O₂ = Oxígeno.

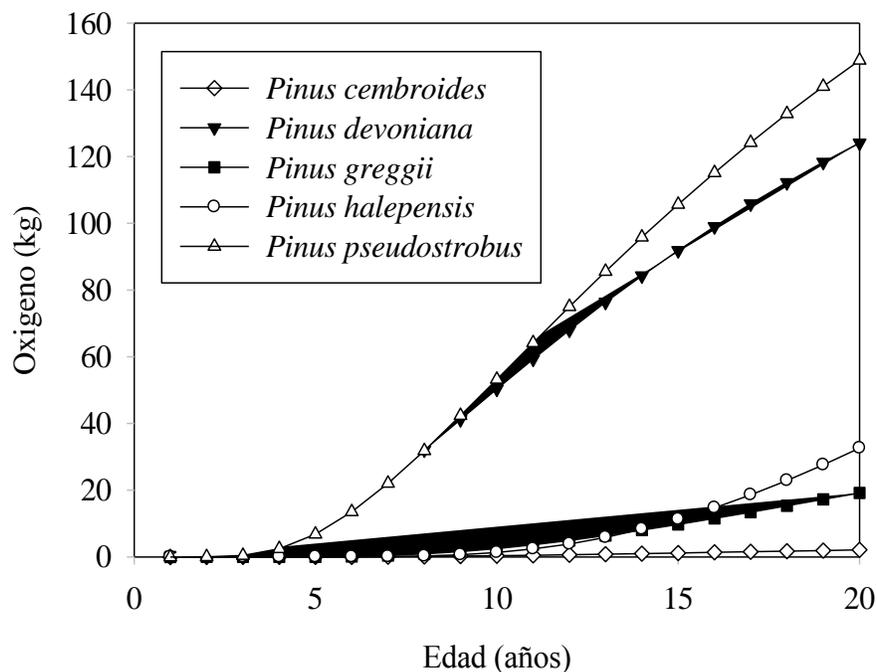


Figura 4. Oxígeno acumulado en *Pinus pseudostrobus*, *Pinus devoniana*, *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides*.

5. CONCLUSIONES

Los datos de biomasa y Carbono de todas las especies se ajustaron adecuadamente al modelo de Schumacher para estimar incrementos anuales en Carbono especialmente en fuste de *Pinus devoniana* ya que presenta un coeficiente de determinación alto ($R^2 = 0.90$), siendo recomendable utilizar este modelo para estimar captura de Carbono y producción de Oxígeno para estas especies. La producción de Oxígeno entre especies muestran diferencias importantes ya que *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* son las que producen mayor cantidad de Oxígeno, por el contrario *Pinus greggii*, *Pinus halepensis* y *Pinus cembroides* producen una menor cantidad, esto debido a que las primeras presentan un mayor incremento corriente anual (ICA) en biomasa y Carbono, así como en diámetro y altura. A una edad base de 20 años, *Pinus pseudostrobus* produce 7.84 kg de Oxígeno, esto representa 2, 2, 4 y 7 veces más que *Pinus devoniana*, *Pinus halepensis*, *Pinus greggii* y *Pinus cembroides* respectivamente. Estos resultados contribuyen con información para resaltar la importancia de las especies en servicios ambientales.

6. LITERATURA

- Avendaño H D M, Acosta M M, Carrillo A F, Etchevers B J D (2009).** Estimación de la Biomasa y Carbono en árboles de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana*. 32(3): 232-238.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) (2012).** Informe de avances del programa especial de Cambio Climático 2009-2012. Primera edición SEMARNAT. México.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2015).** Fichas Técnicas para la Reforestación. (En línea).
- CONAFOR (2008).** Catálogo de contenido de Carbono en especies forestales de tipo arbóreo del noreste de México. 44 p.
- De las Heras J, Alfaro S R., Hernández T E J, Hedo J, Moya D (2011).** Restauración y manejo de pino carrasco tras incendio en el sureste de la península Ibérica. Albacete, España. *CIDEU* 10: 63-79.
- Díaz F R, Acosta M M, Carrillo A F, Buendía R E, Flores A E, Etchevers B J D (2007).** Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. Et Cham. *Madera y Bosques*. 13(1): 25-34
- Domínguez C G, Aguirre C O, Jiménez P J, Rodríguez L R, Díaz B J (2009).** Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 15(1):59-64.

FAO (2001). Situación de los bosques del mundo. (En línea). Disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/y0900s/y0900s00.htm>. Citado el 10 de Diciembre del 2014.

Fonseca G W, Alice G F, Rey J M (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30(1): 36-47

García E (1987). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 213 pp.

García E (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), “Climas (Clasificación de Köppen modificado por García)”. Escala 1: 1 000 000. México.

Gayoso A J, Guerra C J (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos de Chile. *Bosque. (Valdivia)*. 26 (2): 33-38

Hidayat S, Simpson W (1994). Use of green moisture content and basic specific gravity to group tropical woods for kiln drying. Res. Note FPL-RN-0263. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 39 p.

INEGI (2000). Carta topográfica San Antonio de las Alazanas. G14C35. Escala 1:250 000. México.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007): Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II Y III al cuarto informe de evaluación de grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A.). IPCC, Ginebra, Suiza.

IPCC, (2013). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Iturbide Andrés Ilse (2014). Cuantificación de biomasa y carbono en *P. cembroides* Zucc., mediante un modelo alométrico. (Tesis de Licenciatura). Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 36 p.

Klepac D (1976). Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. 365 p.

López L M, Valencia M S (2001). Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. Madera y Bosques. 7(1): 37-46

Mass P J (1970). Instructivo para realizar análisis troncales, SAG, SFF e INIF, boletín divulgativo No. 23, 10 p.

Méndez G J, Luckie N S L, Capo A M A, Nájera L J A (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incremento en Biomasa Aérea y Carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. Y *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. Agrociencia. 45: 479-491.

Montoya V R (2014). Cuantificación de Biomasa Aérea, Carbono y Oxígeno en *Pinus halepensis* Mill. (Tesis de licenciatura). Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 39 p.

- Návar J, González N, Graciano J (2001).** Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia Chile. 12 p.
- Nowak J D, Hoehn R, Crane E D (2007).** Oxygen production by urban trees in the United States. *Arboriculture y Urban Forestry*. 33(3): 220-226.
- Oliveras I, Martínez J, Jiménez T, Lledó J, Escarré A, Piñol J. (2013).** Hydraulic properties of *Pinus halepensis*, *Pinus pinea* and *Tetraclinis articulata* in a dune ecosystem of Eastern Spain. *Plant Ecology* 169: 131-141.
- Ordóñez D J A B (2001).** Como entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Madera y bosques*. 90: 37-42
- Ordóñez D J A B, Masera O (2008).** Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y bosques*. 7(1): 3-12
- Pacheco E F C, Aldrete A, Gómez G A, Fierros G A, Cetina A V M, Vaquera H H (2007).** Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggi* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30 (3): 251-254.
- Patrick D M, Brad W S (2009).** Specific gravity and other properties of Wood and bark for 156 tree species found in North America. Res. Note NRS-38. Newtown Squaere, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 35 p.
- Perry J, LeVan C M D (2003).** Air Purification in Closed Environments: Overview of Spacecraft Systems. U.S. Army Natrick Soldier Center.

- Ramírez F, Fátima N, Mendizabal H L C, Alba J L (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.
- Ramírez H C, Vargas H J J, López U J (2005).** Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta botánica* 72:1-16.
- Rodríguez L R, Jiménez P J, Aguirre C O A, Treviño G J E, Razo Z R (2009).** Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Revista de Sociedad y Desarrollo Sustentable. Ra Ximhai*. 5: (3) 317-327
- Rzedowski J (2006).** Vegetación de México. 1era. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 308 pp.
- Salisbury F B, Ross C W (1978).** *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing Company, Belmont, CA. 422 pp.
- Schlegel, Gayoso y Guerra (2000).** Manual de procedimientos muestreo Biomasa Forestal. Medición de la capacidad de captura de Carbono en bosque de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto FONDEF D98I1076. Valdivia, Chile. 26 p.
- Valerio J (1997).** Informe de consultoría crecimiento y rendimiento. Proyecto BOLFOR. Bolivia. 34 p.
- Wright J, Wessels A (1992).** Laboratory scale pulping of *Pinus pseudostrobus*, *P. maximinoi* and *P. patula*. *IPEF, International*, Piracicaba 2: 39-44.

Yerena Y J I, J Jiménez P, O A Aguirre C, E J Treviño G, E Alanís R (2011). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*. 3(1): 49-56.

Yolasigmaz H, Keles S (2009). Changes in carbón storage and oxygen production in forest timber biomass of Balci Forest Management Unit in Turkey between 1984 and 2006. *African Journal of Biotechnology*. 8 (19): 4872-4883