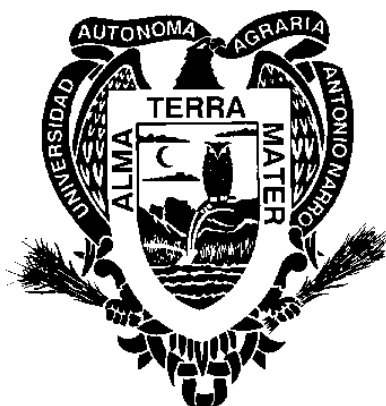


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA



Cuantificación de Biomasa, Carbono y Producción de Oxígeno en *Pinus cembroides* Zucc.

en Mazapil, Zacatecas, México

Por:

LESLY PAMELA GUERRERO SILVA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Cuantificación de Biomasa, Carbono y Producción de Oxígeno en *Pinus cembroides* Zucc.

en Mazapíl, Zacatecas, México

Por:

LESLY PAMELA GUERRERO SILVA

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada:



Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal



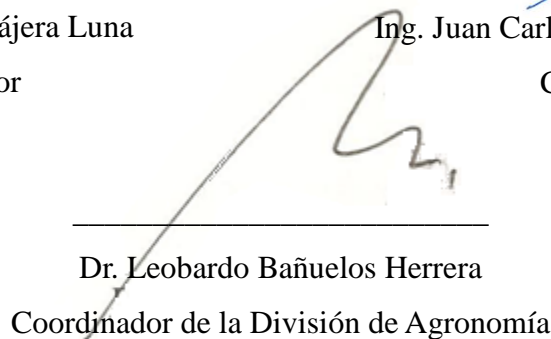
Dr. Juan Abel Nájera Luna

Coasesor



Ing. Juan Carlos Ramírez Martínez

Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2013

DEDICATORIA

A Dios por darme vida y salud para conocer este mundo tan hermoso, familia para compartir los buenos y malos ratos y guiarme en todo momento.

A mi abuelo Genáro Cortez Silva, que aunque no me acompaña en vida, se que donde quiera que este lo hace.

A mi compañera Fatima Méndez Encina que en paz descance.

A mi madre Hilda Silva por confiar en mi y su apoyo incondicional.

A mi padre Noe Guerrero por sus pláticas y consejos.

A mis hermanos Alan por su sencillez, Ivan por su cariño, Cristal por acompañarme en mis noches de desvelo y Diego por las lecciones compartidas.

A mis compañeros de tesis en especial a mi amiga y compañera Yessica Elizabeth Castañuela Ramos, gracias por apoyarme siempre en la realización de mi tesis de licenciatura y Eleazar Aminadaf Jiménez Alcalá

A mis amigos, Lourdes de la Mora, Adi Ovando, Ana Rdz., Alejandra Rdz y Karina por su tiempo, confianza y experiencias compartidas.

Al equipo representativo de la UAAAN “negro”, por brindarme su apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por abrirme sus puertas cinco años, durante los cuales adquirí conocimientos, gané amigos y muchas experiencias.

A mi asesor, el Dr. Jorge Méndez González, por aceptar guiarme durante el desarrollo de mi tesis con paciencia, esmero y dedicación, gracias por todos los conocimientos compartidos.

A los profesores del departamento forestal que en algún momento de mi carrera influyeron en mi formación profesional.

A la compañía minera Peñasquito Goldcorp por permitir desarrollar el proyecto de investigación en sus terrenos.

El presente estudio se realizó con el apoyo de la compañía minera Peñasquito Goldcorp, dentro del proyecto 3613-7160 - Funciones para estimar biomasa aérea e incrementos anuales de la fijación de carbono en plantaciones forestales de importancia ecológica.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO	I
INDICE DE CUADROS	III
INDICE DE FIGURAS	III
RESUMEN	IV
INTRODUCCIÒN	1
REVISIÒN DE LITERATURA	4
Conceptos.....	4
Producci3n de ox3geno.....	5
Captura de carbono en <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	5
Dendrocronolog3a en <i>Pinus cembroides</i> Zucc	6
MATERIALES Y M3TODOS	7
Caracterizaci3n del 3rea de estudio	7
M3todo destructivo para obtener biomasa de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	7
Obtenci3n de peso verde de cada componente	8
Obtenci3n de peso seco de cada componente	8
Modelo alom3trico para cuantificar biomasa de <i>Pinus cembroides</i>	9
Muestras para estimar edad.....	11
Cuantificaci3n de incremento en biomasa de <i>Pinus cembroides</i>	11
Obtenci3n de carbono y di3xido de carbono	12
Obtenci3n de oxigeno producido por <i>Pinus cembroides</i>	13
RESULTADOS Y DISCUSIÒN	14
Biomasa seca de <i>Pinus cembroides</i>	16

Crecimientos en biomasa de <i>Pinus cembroides</i>	21
Oxígeno, carbono y dióxido de carbono	22
CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	27

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea total, de ramas-hojas y de fuste de <i>Pinus cembroides</i> , en Mazapil, Zacatecas, México.	10
Cuadro 2. Características dendrométricas promedio y desviación estándar de los arboles analizados de <i>Pinus cembroides</i> , en Mazapil, Zacatecas, México.	16
Cuadro 3. Concentración de biomasa en los arboles analizados de <i>Pinus cembroides</i> , en Mazapil, Zacatecas, México.	17
Cuadro 4. Modelo alométrico para cuantificar biomasa total, de ramas-hojas y de fuste en <i>Pinus cembroides</i> , en Mazapil, Zacatecas, México.	19
Cuadro 5. Modelo de crecimiento en biomasa total, de ramas-hojas y de fuste de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	21

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación biomasa total y altura (A), biomasa de ramas – hojas y diámetro de copa promedio (B), biomasa de fuste y diámetro de copa promedio (C); residuales del modelo (D, E y F); en <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Mazapil, Zacatecas, México.	20
Figura 2. Relación biomasa total y edad (A); residuales del modelo (D); relación biomasa de ramas – hojas y edad (B); residuales del modelo (E); relación biomasa de fuste y edad (C); residuales del modelo (F); en <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Mazapil, Zacatecas, México.	24
Figura 3. Relación incrementos de biomasa total, en carbono, CO ₂ y O ₂ con edad (A); relación incrementos de ramas – hojas, en carbono, CO ₂ y O ₂ con edad (B); relación incrementos de biomasa en fuste, en carbono, CO ₂ y O ₂ con edad (C); en <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Mazapil, Zacatecas, México.....	25

RESUMEN

La preocupación mundial por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera de la Tierra, ha llevado a los países, a aplicar políticas que puedan reducir esta tasa de incremento. Entre las estrategias para capturar el carbono, se encuentra la fijación del CO₂ por las plantas, a través del proceso de la fotosíntesis. La presente investigación tuvo como objetivos probar el modelo alométrico exponencial en su forma lineal para cuantificar biomasa aérea, carbono y dióxido de carbono en *Pinus cembroides* Zucc. en Mazapil, Zacatecas, México y estimar la producción de oxígeno en *Pinus cembroides* Zucc. La biomasa aérea total de *Pinus cembroides* se obtuvo mediante el método destructivo en 30 árboles, representativos de las categorías diamétricas del área de estudio. Aplicando el modelo Shumacher se obtuvo crecimiento e incremento en biomasa, carbono, CO₂ y producción de oxígeno. Los resultados indican que el componente de biomasa que mejor se ajustó fue *Bt* ($R^2 = 0.9875$), usando como variable independiente la altura de *Pinus cembroides*, el componente con menor ajuste fue la *Brh* ($R^2 = 0.51$) y utiliza como variable independiente el diámetro de copa promedio. El modelo de Shumacher ($R^2 > 0.90$) predice el máximo incremento en *Bt* se alcanzará a la edad de 238 años, y será de 8.01 kg árbol⁻¹ año⁻¹, que equivalen a 4.03 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de carbono, 14.79 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de CO₂ y una producción de 10.72 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de O₂. De acuerdo al incremento corriente anual en *Bt*, a partir de los 67 años de edad un árbol de *Pinus cembroides*, es capaz de producir O₂ al menos para un día de vida de un adulto, tomando como consumo de O₂ promedio 0.84 kg día⁻¹.

Palabras clave: *Pinus cembroides* Zucc, modelo alométrico, componente de biomasa, modelo de crecimiento, producción, oxígeno.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la humanidad se caracteriza por la gran influencia negativa de las personas sobre el ambiente (Lakyda, 2011), lo que ha traído como consecuencia el cambio climático, que se ve reflejado en el calentamiento global (IPCC, 2007), de acuerdo a Hansen *et al.* (2013), el año 2012 fue el noveno más caluroso desde 1880; la preocupación mundial por la acumulación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera de la Tierra, ha llevado a los países, a aplicar políticas nacionales e internacionales que puedan reducir esta tasa de incremento, la cual influye sobre el cambio climático global (Gayoso y Schlegel, 2001).

La OMM (2009) señala que los principales GEI de larga duración, son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), sin embargo el CO_2 es el que más afecta el balance radiativo de la Tierra, de acuerdo a Lakyda (2011) este gas es el responsable hasta en un 80 % del desequilibrio radiativo; el CO_2 ha aumentado su concentración en el último período de 100 años, en un 40 % debido principalmente a la quema de combustibles fósiles, producción de cemento, cambios en el uso del suelo y la disminución de la superficie forestal (Heinrich y Hergt, 1998).

Entre las estrategias para capturar el carbono, se encuentra la fijación del CO_2 como biomasa, principalmente por las plantas, que son las que lo utilizan en el proceso de la fotosíntesis (Díaz *et al.*, 2007). La determinación adecuada de biomasa de un bosque, es un elemento de gran importancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono y otros elementos químicos existentes en cada uno de sus componentes (Schlegel *et al.*, 2000). Para estimar biomasa, lo más aconsejable es emplear modelos que hayan sido construidos bajo condiciones similares, a las encontradas donde se desean aplicar (Andrade e Ibrahim,

2003). Es también importante correlacionar el mayor número de características dendrométricas (altura, diámetro de copa, diámetro a la altura del pecho entre otras) así como sus combinaciones, para obtener un modelo con mejor estimación de biomasa.

Por otro lado, en las grandes ciudades, cuando la temperatura del aire es alta y la actividad del viento es baja, la concentración de oxígeno es del 17 al 18 %, en lugar de 20 a 21 % (Lakyda, 2011). La quema de combustibles fósiles también consume oxígeno y produce CO₂, en consecuencia, se ha documentado que el contenido de oxígeno de la atmósfera está disminuyendo; entre 1989 y 1994, el oxígeno contenido de la atmósfera se redujo a una tasa anual de 2 ppm de 210.000 ppm (Broecker, 1996).

Los árboles pueden mitigar muchos de los impactos ambientales, atemperan el clima, conservan la energía, bióxido de carbono y agua; mejoran la calidad del aire, disminuyen la escorrentía pluvial y las inundaciones, reducen los niveles de ruido, y suministran el hábitat para la fauna silvestre (Nowak *et al.*, 1997); además, es bien sabido que los árboles producen oxígeno (Lakyda, 2011). Se ha documentado, que la vegetación forestal produce de 10 a 15 veces más oxígeno que cualquier otro terrestre fitocenosis (Vasilyev, 1971).

Pinus cembroides Zucc. pertenece al grupo de pinos "piñoneros" (Farjon *et al.*, 1997), su área de distribución es amplia, entre los 18° y los 32° de latitud norte, abarca desde el oeste de Estados Unidos de América, hasta México, haciéndose presente en Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo (Perry, 1991), en territorios donde la precipitación media anual oscila entre 350 y 700 mm (Rzedowski, 1978); tiene alta tolerancia a la sequía (Gilman y Watson 1994), aunque en el norte de México su crecimiento responde a la precipitación estacional invierno – primavera, es decir a patrones de circulación

(fenómeno El niño) que afectan el clima en este período del año (Constante *et al.*, 2009) llegando a tener hasta 500 años de edad (Villanueva *et al.*, 2010).

Gómez *et al.*, (2012) mencionan que *Pinus cembroides*, es una de las especies de mejor supervivencia (90 %), en sitios degradados. Dada su longevidad, *Pinus cembroides* es capaz de almacenar carbono y CO₂ por periodos prolongados, así como de producir abundante oxígeno durante este periodo; sin embargo no existen trabajos para cuantificar la biomasa, carbono ni la producción de oxígeno, por ello la presente investigación se planteó como objetivos 1) probar el modelo alométrico exponencial en su forma lineal para cuantificar biomasa aérea, carbono y dióxido de carbono en *Pinus cembroides* Zucc. en Mazapil, Zacatecas, México, 2) cuantificar mediante modelos de crecimiento el oxígeno producido de forma acumulada y anual en *Pinus cembroides* Zucc. Se plantea como hipótesis que las variables medidas en campo y la combinación entre estas, puede generar modelos alométricos confiables para estimar la biomasa de *Pinus cembroides* Zucc.

REVISIÓN DE LITERATURA

Conceptos

De acuerdo al IPCC (2007) se definen los siguientes conceptos:

Cambio climático: es la variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. Puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra.

Efecto invernadero: los gases de efecto invernadero absorben eficazmente la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a esos mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica es emitida en todas direcciones, en particular hacia la superficie de la Tierra. Por ello, los gases de efecto invernadero retienen calor en el sistema superficie-troposfera. Este fenómeno se denomina efecto invernadero. Un aumento de la concentración de gases de efecto invernadero da lugar a una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera y, por consiguiente, a una radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor a una temperatura menor. Ello origina un forzamiento radiativo que intensifica el efecto invernadero, suscitando así el denominado efecto invernadero intensificado.

Gas de efecto invernadero (GEI): es un componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad da lugar al efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el Ozono (O₃)

son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre.

Dióxido de carbono (CO₂): es un gas que existe espontáneamente y también como subproducto del quemado de combustibles fósiles procedentes de depósitos de carbono de origen fósil, como el petróleo, el gas o el carbón, de la quema de biomasa, o de los cambios de uso de la tierra y otros procesos industriales. Es el gas de efecto invernadero antropógeno que más afecta al equilibrio radiativo de la Tierra. Es también el gas de referencia para la medición de otros gases de efecto invernadero y, por consiguiente, su Potencial de calentamiento mundial es igual a 1.

Fotosíntesis: es el proceso en virtud del cual las plantas verdes, las algas y ciertas bacterias toman dióxido de carbono del aire (o bicarbonato del agua) para elaborar hidratos de carbono. Hay varias vías de fotosíntesis posibles, con diferentes respuestas a las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera.

Producción de oxígeno

Hoy en día el tema de la productividad de oxígeno en los bosques ha sido poco estudiada y la mayoría de las investigaciones han sido realizados en zonas urbanas (Nowak *et al.*, 2007; Lakyda, 2011). Para *Pinus cembroides* Zucc no existen estudios realizados para estimar la producción de O₂.

Captura de carbono en *Pinus cembroides* Zucc.

Las concentraciones atmosféricas de CO₂ (379 ppm) y CH₄ (1774 ppmm) en 2005 exceden con mucho el intervalo natural de valores de los últimos 650.000 años (IPCC, 2007), sin embargo los árboles pueden reducir el CO₂ atmosférico almacenándolo directamente en su biomasa, con lo que el árbol crece (Nowak *et al.*, 1997). El componente aéreo (fuste,

ramas y hojas) del estrato arbóreo constituye uno de los principales almacenes de biomasa, y por lo tanto de carbono (Acosta *et al.*, 2002).

En cuanto a estudios sobre almacenamiento de carbono y CO₂ en *Pinus cembroides* Zucc. no se han realizado, sin embargo existe un estudio en *Pinus cembroides* subsp. *Orizabensis* en Los Molinos, Municipio de Perote, Veracruz, realizado por Flores *et al.*, (2012).

Dendrocronología en *Pinus cembroides* Zucc.

Constante *et al.*, (2009) en su estudio de dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila, mencionan que *Pinus cembroides* Zucc. tiene un excelente potencial para estudios dendrocronológicos y su sensibilidad climática superó a la especie de referencia (*Pseudotsuga menziesii*), además indican que el crecimiento del pino piñonero respondió a la precipitación estacional invierno – primavera, lo que implica que patrones de circulación que afectan el clima en este período del año, tienen una fuerte influencia en su desarrollo.

En el área natural protegida “Zapalinamé”; Villanueva *et al.* (2010) mencionan que individuos de *Pinus cembroides* con 400 años de edad, también se han observado en Sierra de Parras y Sierra de Jimulco, Coahuila y en otros sitios de muestreo se han encontrado árboles de *Pinus cembroides* de menos de 200 años de edad en Santiago Papasquiro y Sierra de Órganos, Durango, así como en rodales de los estados de Nuevo León, Guanajuato y Tlaxcala, por lo que no se descarta la posibilidad de que existan lugares con individuos que superen los 500 años de edad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

El presente estudio se realizó en terrenos de la compañía minera “Peñasquito” perteneciente al grupo Goldcorp, ubicada en el municipio de Mazapil, Zacatecas, localizado en la región noreste del estado, en las coordenadas geográficas 101° 36´ de longitud y 24° 18´ de latitud; altitud de 2230 m.s.n.m. El área, presenta temperaturas desde los 19 hasta a 25 °C entre los meses de abril a octubre, precipitación pluvial promedio de 400 mm, climas secos (b), semisecos B50 y climas secos 50, presentándose incluso un clima BW considerándose muy seco (García, 1998).

Método destructivo para obtener biomasa de *Pinus cembroides* Zucc.

Para obtener la biomasa aérea de *Pinus cembroides*, se utilizó el método destructivo propuesto por Schlegel *et al.* (2000), analizando 30 árboles representativos de las categorías diamétricas existentes en el área (Méndez *et al.*, 2011). De cada árbol, se registró el número de individuo, se midió el diámetro a la altura del pecho (*Dap*) y el diámetro a la base (*Db*), usando cinta diamétrica para estas dos últimas, modelo 283D/160 (Flores *et al.*, 2010), obteniendo también el diámetro de copa de norte a sur y de este a oeste, usando un longímetro de 50 m, para obtener el diámetro de copa promedio (*Dcp*).

El árbol fue derribado con una motosierra marca Truper con espada de 20”, enseguida, se le determinó su altura total (*H*) con un longímetro, se desramó y seccionó el fuste en trozas de dimensiones variables 1 a 1.5 m. Posteriormente de cada árbol, se obtuvieron muestras de ramas-hojas, contrario a lo que menciona Schlegel *et al.* (2000)

quienes sugieren que se debe separar el componente de ramas del de hojas. Durante el troceo del fuste, se obtuvieron de 3 a 5 rodajas de aproximadamente cinco centímetros de espesor a lo largo del fuste, siendo esta muestra, para obtener el contenido de humedad (Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011).

Obtención de peso verde de cada componente

Una vez separados los componentes, se pesaron en su totalidad las ramas-hojas y el fuste de cada árbol, usando una báscula romana (marca COR), de 10 y 120 kg de capacidad y 0.1 y 0.5 kg de precisión (Méndez *et al.*, 2011), el peso verde total de los componentes de fuste (P_{vf}) y de ramas hojas (P_{vhr}) se sumaron para obtener el peso verde total (P_{vt}) del árbol. Las muestras de ramas-hojas y fuste, también fueron pesadas por separado para obtener el peso verde total de cada muestra (P_{vm}), se colocaron en bolsas de papel, previamente identificadas y se trasladaron a laboratorio.

Obtención de peso seco de cada componente

Las muestras de ramas-hojas y de fuste se colocaron en un horno de secado modelo Grieve con capacidad de 2.2 m³, durante 8 días a 80 °C (Raev *et al.*, 1997; Pacheco *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011), se monitorearon diariamente, pesándose en una báscula modelo PCE-BSH 6000 con precisión a un gramo; cuando se observó que el peso era constante se determinó que la muestra ya estaba en su estado anhidro y se registró el peso seco de las muestras (P_{sm}) de ramas-hojas y del fuste, posteriormente se determinó el contenido de humedad, de acuerdo a la siguiente fórmula (Schlegel *et al.*, 2000).

$$CH = \frac{P_{vm} - P_{sm}}{P_{sm}} * 100$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

Pvm = Peso verde de la muestra (kg)

Psm = Peso seco muestra (kg)

La biomasa seca de los componentes de ramas-hojas y de fuste se obtuvo mediante la relación entre peso seco y peso fresco de las muestras (Schlegel *et al.*, 2000; Díaz *et al.*, 2007) para ello, se empleó el contenido de humedad de cada componente, empleando la siguiente ecuación:

$$B = \frac{Pvtc}{1 + (CH/100)}$$

Donde:

B = Biomasa seca total del componente (kg)

$Pvtc$ = Peso verde total del componente (kg)

CH = Contenido de humedad de la muestra (%)

Para conocer la biomasa aérea total de cada árbol, se sumó la biomasa seca de las ramas-hojas (Brh) y del fuste (Bf).

Modelo alométrico para cuantificar biomasa de *Pinus cembroides*

La biomasa seca total, de hojas-ramas y de fuste se estimó con la aplicación del modelo alométrico exponencial ($Y = \beta_0 x^{\beta_1}$) en su forma lineal ($\ln Y = \beta_0 + \beta_1 * \ln X$) y probando como variables independientes al diámetro a la altura del pecho, diámetro de copa promedio y altura total, así como sus combinaciones (Cuadro 1), para finalmente seleccionar

el modelo de mejor ajuste de acuerdo al mayor R^2 , menor error, significancia del modelo y de coeficientes de regresión ($P \leq 0.05$).

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea total, de ramas-hojas y de fuste de *Pinus cembroides*, en Mazapil, Zacatecas, México.

Modelo	Ecuación	Modelo	Ecuación
1	$\ln Bst = \beta_0 + \beta_1 * H$	7	$\ln Bsrh = \beta_0 + \beta_1 * Dap$
2	$\ln Bst = \beta_0 + \beta_1 * Dcp$	8	$\ln Bsrh = \beta_0 + \beta_1 * (H*Dap)$
3	$\ln Bst = \beta_0 + \beta_1 * Dap$	9	$\ln Bsf = \beta_0 + \beta_1 * H$
4	$\ln Bst = \beta_0 + \beta_1 * (H*Dap)$	10	$\ln Bsf = \beta_0 + \beta_1 * Dcp$
5	$\ln Bsrh = \beta_0 + \beta_1 * H$	11	$\ln Bsf = \beta_0 + \beta_1 * Dap$
6	$\ln Bsrh = \beta_0 + \beta_1 * Dcp$	12	$\ln Bsf = \beta_0 + \beta_1 * (H*Dap)$

\ln = Logaritmo natural; Bst = biomasa seca total (kg); $Bsrh$ = biomasa seca en ramas-hojas (kg); Bsf = biomasa seca en fuste (kg); β_0 y β_1 = parámetros del modelo de regresión; H = altura total (m); Dcp = diámetro de copa promedio (m); Dap = diámetro a la altura del pecho (cm); $H*Dap$ = altura por diámetro a la altura del pecho (m*cm).

A los datos estimados de biomasa de cada componente, se les aplicó el factor de corrección para modelos con logaritmos (Sprugel, 1983), el cual se calculó con la fórmula siguiente:

$$FC = \exp\left(\frac{EE^2}{2}\right)$$

Donde:

FC = Factor de corrección

exp = Exponencial

EE = Error estándar en unidades logarítmicas

Muestras para estimar edad

Las rodajas obtenidas de la base de cada uno de los árboles de *Pinus cembroides* fueron lijadas para posteriormente contar sus anillos anuales de crecimiento y obtener así la edad de cada individuo, con la cual se probaron modelos de crecimiento en biomasa total, de ramas-hojas y de fuste.

Cuantificación de incremento en biomasa de *Pinus cembroides*

La biomasa seca total, de hojas-ramas y del fuste de *Pinus cembroides*, se evaluó con el modelo de Schumacher, mismo que ha sido utilizado eficientemente por Méndez *et al.* (2011) para cuantificar biomasa aérea en función de la edad, el cual viene expresado como:

$$B = exp (\beta_0 + \beta_1 / E)$$

Donde:

B = Biomasa (kg)

exp = exponencial

E = Edad (años)

β_0 y β_1 = Parámetros del modelo

A partir del modelo anterior, se calculó el incremento corriente anual (*ICA*) y el incremento medio anual (*IMA*) de biomasa total, biomasa de ramas-hojas y biomasa de fuste, mismos que se obtuvieron derivando la ecuación del modelo de Schumacher acorde a las

formulas siguientes:

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

$$IMA : -\frac{\partial Y}{\partial \beta_1} = -\frac{1}{E} \exp (\beta_0 + \beta_1 / E)$$

Obtención de carbono y dióxido de carbono

De acuerdo a la CONAFOR (2007) y Yerena *et al.*, (2011) el contenido de carbono en la parte aérea de *Pinus cembroides*, es de 50.25 %, por lo que para calcular el carbono en la biomasa seca total, de ramas-hojas y de fuste se aplicó la siguiente fórmula:

$$C = B * FC$$

Donde:

C = Carbono almacenado (kg)

B = Biomasa (kg)

CC = Contenido de carbono (0.5025)

El CO_2 que es fijado en la biomasa seca de cada componente (total, de ramas-hojas y fuste), se obtuvo con el producto del carbono almacenado por componente y del factor resultante de la relación entre el peso de la molécula de CO_2 y el peso del átomo de carbono (Raev *et al.*, 1997; Méndez *et al.*, 2011).

$$CO_2 = C * F$$

Donde:

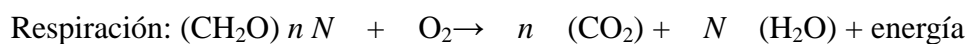
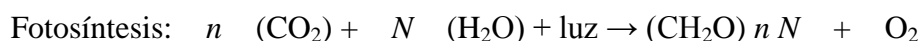
CO_2 = Carbono equivalente (kg)

$$F = 44/12 (3.67)$$

C = Carbono almacenado (kg)

Obtención de oxígeno producido por *Pinus cembroides*

El importe neto de oxígeno producido por un árbol durante un año, está directamente relacionado con la cantidad de carbono secuestrado por el árbol, que está ligado a la acumulación de biomasa de los árboles (Nowak *et al.*, 2007). De acuerdo a Yolasıgımaz y Keles (2009) si la absorción de CO₂ durante la fotosíntesis excede la liberación de dióxido de carbono por la respiración durante el año, el árbol acumula carbono, lo que indica que también tiene una producción neta de oxígeno. La producción neta de oxígeno por árboles se basa en la cantidad de oxígeno producido durante la fotosíntesis menos la cantidad de oxígeno consumido durante la respiración de la planta (Salisbury y Ross, 1978), de esta manera:



De donde la cantidad de oxígeno producido se calcula a partir de la captura de carbono basado en los pesos atómicos:

$$\text{Liberación neta de O}_2 \text{ (kg año}^{-1}\text{)} = \text{secuestro neto de Carbono (kg año}^{-1}\text{)} \times 32/12$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para estimar la biomasa total, de ramas-hojas y de fuste, en el presente estudio se utilizaron 30 árboles de *Pinus cembriodes* Zucc.; Díaz *et al.* (2007) determinaron ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* en el Ejido Mariano de Matamoros, Tlaxco, Tlaxcala y utilizaron 25 árboles; Méndez *et al.* (2011) generaron ecuaciones alométricas y estimaron biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus*, en Guanajuato, México, utilizando 20 árboles para cada especie; Muñóz *et al.* (2005) en un análisis de biomasa del vuelo de un rodal adulto de *Pinus radiata*, ubicado entre las ciudades de Santa Juana y Nacimiento, VIII Región, Chile utilizaron solo 12 árboles de *Pinus radiata*; Návar *et al.*, (2001) analizaron 25 árboles de *Pinus durangensis*, 19 árboles de *Pinus cooperi*, 4 árboles de *Pinus arizonica* y 5 árboles de *Pinus engelmannii* en su estudio de ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México; Pacheco *et al.* (2007) analizaron 20 árboles de *Pinus greggii* para estimar el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii*.

En los árboles analizados para el presente estudio, el diámetro a la altura del pecho mínimo fue de 4 cm, el máximo de 29 cm y el promedio de 10.98 cm (Cuadro 2), estos valores son menores a los obtenidos por Muñóz *et al.* (2005) quienes analizaron la biomasa de *Pinus radiata* de clase de copa dominante, en los cuales el diámetro a la altura del pecho mínimo fue de 57 cm, el máximo de 65.6 cm y el promedio de 61.6 cm, en la clase de copa codominante el diámetro a la altura del pecho fue de 43.5, 54.3 y 48.6 cm como mínimo, máximo y promedio respectivamente; para la clase de copa intermedia el diámetro a la altura

del pecho mínimo fue de 29.5, el máximo de 41.2 cm y el promedio de 35.4 cm.

Los árboles analizados en el presente estudio tienen una altura mínima de 2.02 m, una máxima de 4.01 m y 2.97 m en promedio (Cuadro 2). El valor de altura promedio (2.97 m), es inferior a los encontrados por Muñoz *et al.* (2005), en individuos de clase de copa dominante, codominante e intermedia de *Pinus radiata* con 37.2, 45.0 y 49.8 m de altura promedio respectivamente; Méndez *et al.* (2011) que obtuvieron 8.9 m de altura promedio en *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus*; Návar *et al.* (2001) en plantaciones forestales de Durango, México, encontraron valores de altura promedio de 5.91, 6.27, 5.48 y 3.46 m para *Pinus durangensis*, *Pinus cooperi*, *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* respectivamente.

La edad promedio de los árboles analizados en el presente estudio, fue de 86 años, existiendo mucha variación en la edad (± 46 años) (Cuadro 2), esta edad fue superior a la de los árboles de *Pinus radiata* analizados por Muñoz *et al.* (2005) que tenían de 42 años de edad promedio; Návar *et al.* (2001) analizó árboles de *Pinus durangensis* (14 años), *Pinus cooperi* (14 años), *Pinus arizonica* (20 años) y *Pinus engelmannii* (9.4 años) más jóvenes a los de *Pinus cembroides* analizados en el presente estudio. El diámetro de copa promedio de *Pinus cembroides* máximo es de 1.66 m y el mínimo de 5.90 m, el promedio de 3.02 m y presenta una desviación estándar de 0.85 m (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características dendrométricas promedio y desviación estándar de los arboles analizados de *Pinus cemboides*, en Mazapil, Zacatecas, México.

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	D.E.
<i>H (m)</i>	2.02	5.36	2.97	0.72
<i>Dap (cm)</i>	4.00	29.00	10.98	4.97
<i>Dcp (m)</i>	1.66	5.90	3.02	0.85
<i>Edad (años)</i>	56.00	144.00	86.00	15.90
<i>Pvt (kg)</i>	20.00	460.00	63.60	80.86
<i>Pvrh (kg)</i>	10.00	240.00	34.77	42.07
<i>Pvf (kg)</i>	7.00	220.00	28.83	39.30
<i>CHt</i>	34.90	97.96	59.59	13.50
<i>CHrh</i>	30.92	127.98	59.48	17.94
<i>CHf</i>	21.97	106.99	60.97	20.57

Donde: *H* = altura; *Dap* = diámetro a la altura del pecho; *Dcp* = diámetro de copa; *Pvt* = peso verde total; *Pvrh* = peso verde ramas-hojas; *Pvf* = peso verde del fuste; *Bt* = biomasa total; *Brh* = biomasa ramas-hojas; *Bf* = biomasa fuste; *CHt* = contenido de humedad de biomasa total; *CHrh* = contenido de humedad de biomasa de ramas-hojas; *CHf* = contenido de humedad de biomasa de fuste; *D.E.* = desviación estándar.

Biomasa seca de *Pinus cembroides*

En el presente estudio la mayor concentración de biomasa (Cuadro 3) se observó en el componente de ramas-hojas (55.83 %), el resto de la biomasa corresponde al componente del fuste (44.17 %). Návar *et al.* (2001) para *Pinus durangensis* y *Pinus cooperi*, estimaron que

el fuste contiene 64 y 67 % de la biomasa total del árbol, la madera de ramas 22.5 y 22.4 % y el follaje 13.5 y 10.6 %, respectivamente. La biomasa total promedio de un árbol de *Pinus cembroides* es de 38.95 kg este promedio es superior al obtenido por Pacheco *et al.* (2007) que obtuvo 8 kg de biomasa por árbol en *Pinus greggii*.

Cuadro 3. Concentración de biomasa en los arboles analizados de *Pinus cembroides*, en Mazapil, Zacatecas, México.

Componente	Promedio (kg)	D.E.	Total (kg)	%
Biomasa total	38.95	46.11	1168.59	100
Biomasa de ramas-hojas	21.75	25.41	652.36	55.83
Biomasa de fuste	17.21	21.13	516.23	44.17

Donde: D.E. = desviación estándar; % = porcentaje.

La ecuación que mejor ajuste tuvo para estimar la biomasa total, de ramas-hojas y de fuste de *P. cembroides*, quedó expresada como:

$$\ln B = \beta_0 + \beta_1 * (H*Dap)$$

Donde:

B = Biomasa en ramas-hojas, fuste y total (kg)

\ln = Logaritmo natural

$H*Dap$ = Altura por diámetro a la altura del pecho (m*cm)

β_0 y β_1 = Parámetros del modelo de regresión

De acuerdo con los estadísticos de ajuste de las ecuaciones alométricas para estimar biomasa, el componente de los árboles analizados que mejor se ajustó fue biomasa total, con

un R^2 de 0.9879 (Cuadro 4), este valor es superior al de Nívar *et al.* (2001) quienes en promedio obtuvieron R^2 de 0.87, e igual al de Díaz *et al.* (2007) en *Pinus patula* quienes obtuvieron R^2 de 0.98. La biomasa de ramas-hojas de *Pinus cembroides* presentó el menor coeficiente de determinación ($R^2 = 0.5047$); algunos autores como Nívar *et al.* (2010) también reportaron R^2 bajos en los componentes de biomasa foliar (0.38) y ramas (0.66) de *Pinus durangensis*; por el contrario, Flores *et al.* (2011) quienes generaron modelos para estimar biomasa de madera de ramas individuales y de acículas de ramas de *Abies religiosa*, obtuvieron mayores R^2 de 0.90 y 0.83 respectivamente. La variable independiente que mejor estima la biomasa total de *Pinus cembroides*, es la altura (Cuadro 4), sin embargo, para estimar biomasa de ramas-hojas y biomasa de fuste, el diámetro de copa promedio es el que mejor la estima (Cuadro 4; Figura 1). Díaz *et al.* (2007), Flores *et al.* (2011) y Méndez *et al.* (2011) utilizaron como variable independiente en su modelo alométrico el diámetro normal para predecir biomasa y Pacheco *et al.* (2007) elevado al cuadrado por la altura.

El promedio del parámetro β_1 del modelo de regresión del componente de biomasa total es de 1.4351 y es superior en 43.17 % con respecto a la β_1 mínimo (0.8156) e inferior en 4 % comparado con el β_1 máximo (2.0572). El β_1 máximo (2.0572) se presentó en el componente de fuste y el mínimo (0.7398) en los componentes de biomasa de ramas-hojas y de fuste. El valor máximo de F calculada (1.190) se presentó en el componente de ramas-hojas y la mínima en el componente de biomasa total (Cuadro 2). El error estándar mayor (34.90 kg) y menor (5.15 kg) se presentaron en el componente de biomasa total. Méndez *et al.* (2011) obtuvieron un error estándar en árboles dominantes de *Pinus devoviana* de 4.09 y 12.78 kg en árboles dominantes de *Pinus pseudostrobus*. El coeficiente de variación mayor (94.25 %) se presentó en el componente de ramas-hojas con el diámetro a la

altura del pecho como variable independiente y el menor (13.23 %) en el componente de biomasa total con la altura como variable independiente.

Cuadro 4. Estadísticos y parámetros del modelo alométrico para cuantificar biomasa total, de ramas-hojas y de fuste en *Pinus cembroides*, en Mazapil, Zacatecas, México.

Y	X	R ²	Sxy	CV	FC	Pr > F	β_0	β_1
<i>Bt</i>	<i>H</i>	0.9879	5.15	13.23	1.141	0.0002	1.4746	1.7946
	<i>Dcp</i>	0.6454	27.94	71.74	1.076	<.0001	1.1794	2.0572
	<i>Dap</i>	0.4467	34.90	89.61	1.108	<.0001	0.9173	1.0730
	<i>H*Dap</i>	0.5723	30.69	78.78	1.096	<.0001	0.6417	0.8156
<i>Brh</i>	<i>H</i>	0.3741	20.46	94.07	1.190	0.0024	1.0569	1.6253
	<i>Dcp</i>	0.5047	18.20	83.68	1.101	<.0001	0.5521	2.0849
	<i>Dap</i>	0.3716	20.50	94.25	1.161	0.0002	0.5474	0.9738
	<i>H*Dap</i>	0.4786	18.67	85.86	1.151	<.0001	0.2988	0.7398
<i>Bf</i>	<i>H</i>	0.4469	15.99	92.93	1.136	<.0001	0.3236	2.0831
	<i>Dcp</i>	0.6154	13.33	77.49	1.093	<.0001	0.2693	2.1185
	<i>Dap</i>	0.5394	14.59	84.80	1.085	<.0001	-0.3712	1.2663
	<i>H*Dap</i>	0.5978	13.64	79.24	1.151	<.0001	0.2988	0.7398

Donde: Y = variable dependiente; X = variable independiente; *Bt* = Biomasa total (kg); *Brh* = biomasa de ramas-hojas (kg); *Bf* = biomasa de fuste (kg); *H* = altura total (m); *Dcp* = diámetro de copa promedio (m); *Dap* = diámetro a la altura del pecho (cm); R² = coeficiente de determinación; Sxy = error estándar (kg); CV = coeficiente de variación (%); FC = Factor de corrección; β_0 y β_1 = parámetros del modelo de regresión.

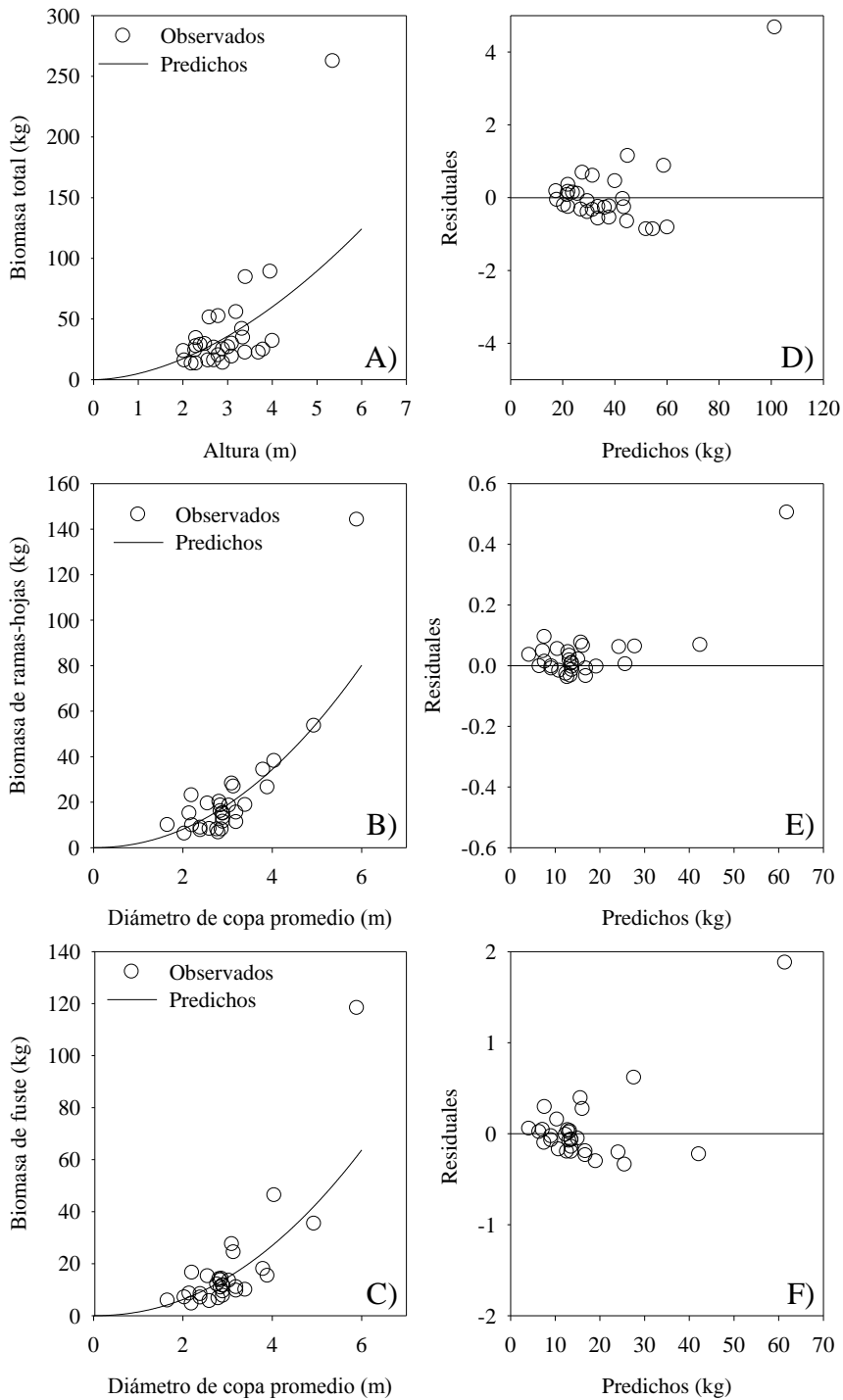


Figura 1. Relación biomasa total y altura (A), biomasa de ramas – hojas y diámetro de copa promedio (B), biomasa de fuste y diámetro de copa promedio (C); residuales del modelo (D, E y F); en *Pinus cembroides* Zucc en Mazapil, Zacatecas, México.

Crecimiento en biomasa de *Pinus cembroides*

Para los componentes de biomasa total, de ramas-hojas y de fuste se aplicó el modelo de predicción de Shumacher, para estimar incremento corriente anual (*ICA*) e incremento medio anual (*IMA*). Este modelo de crecimiento se ajustó mejor que los modelos alométricos al predecir el crecimiento en el componente del fuste ($R^2 = 0.932$) y el componente de biomasa de ramas-hojas presentó el R^2 mas bajo (0.896) aunque no difiere mucho de los componentes biomasa total y biomasa del fuste (Cuadro 5; Figura 2); Méndez *et al.* (2011), al utilizar este modelo también obtuvo mejor ajuste en el componente del fuste de árboles dominantes, con un R^2 de 0.95 en *P. devoniana* y de 0.82 en *P. pseudostrobus*. El error estándar en el componente de fuste de *Pinus cembroides* (7.28 kg), es superior al de *Pinus devoniana* (4.09 kg) e inferior al de *Pinus pseudostrobus* (12.78 kg) ambos en árboles dominantes (Méndez *et al.*, 2011).

Cuadro 5. Modelo de crecimiento en biomasa total, de ramas-hojas y de fuste de *Pinus cembroides* Zucc.

Componente	R^2	R^2 Ajustada	Sxy	CV	β_0	β_1
<i>Bt</i>	0.922	0.919	17.28	0.4436	8.8608	-476.300
<i>Brh</i>	0.896	0.892	11.05	0.5082	8.2384	474.200
<i>Bf</i>	0.932	0.930	7.28	0.3446	8.0910	-478.8000

Donde: *Bt* = Biomasa total; *Brh* = biomasa ramas-hojas; *Bf* = biomasa fuste; R^2 = Coeficiente de determinación; R^2 Ajustada = Coeficiente de determinación ajustado; CV = coeficiente variación; Sxy = error estándar; β_0 y β_1 = Parámetros modelo.

Oxígeno, carbono y dióxido de carbono

Los árboles utilizados para este estudio tenían una edad promedio de 86 años (Cuadro 2), de acuerdo al modelo de crecimiento en biomasa total un árbol de *Pinus cembroides* a esa edad ha producido 37.06 kg árbol⁻¹ de oxígeno además tiene almacenados 13.93 kg árbol⁻¹ de carbono y 51.73 kg árbol⁻¹ de CO₂ (Figura 2A) y su incremento corriente anual en producción de oxígeno es de 2.44 kg árbol⁻¹ año⁻¹ y almacena 0.92 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de carbono y 3.36 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de CO₂ (Figura 3A); el modelo de crecimiento en biomasa de ramas-hojas estima que a los 86 años de edad ha producido 20.38 kg árbol⁻¹ de oxígeno además tiene almacenados 7.66 kg árbol⁻¹ de carbono y 28.12 kg árbol⁻¹ de CO₂ (Figura 2B) y su incremento corriente anual en producción de oxígeno es de 1.33 kg árbol⁻¹ año⁻¹ y almacena 0.50 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de carbono y 1.84 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de CO₂ (Figura 3B); en cuanto al modelo de crecimiento en biomasa de fuste estima que ha producido 16.67 kg árbol⁻¹ de oxígeno además tiene almacenados 6.27 kg árbol⁻¹ de carbono y 23 kg árbol⁻¹ de CO₂ (Figura 2C) y su incremento corriente anual en producción de oxígeno es de 1.10 kg árbol⁻¹ año⁻¹ y almacena 0.41 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de carbono y 1.52 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de CO₂ (Figura 3C).

El máximo incremento corriente anual en el componente de biomasa de total es de 8.01 kg árbol⁻¹ año⁻¹, que equivalen a 4.03 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de carbono, 14.79 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de CO₂ y una producción de 10.72 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de O₂ (Figura 3A), de acuerdo al modelo de predicción; en el componente de biomasa de ramas-hojas, el máximo incremento corriente anual es de 4.31 kg árbol⁻¹ año⁻¹, que equivalen a 2.17 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de carbono, 7.96 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de CO₂ y una producción de 5.77 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de O₂, de acuerdo al modelo de predicción (Figura 3B); y para el componente de fuste, el máximo incremento corriente anual

es de $3.69 \text{ kg arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que equivalen a $1.85 \text{ kg arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de carbono, $6.79 \text{ kg arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de CO_2 y una producción de $4.92 \text{ kg arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de O_2 , de acuerdo al modelo de predicción (Figura 3C), los tres componentes de biomasa tienen su máximo incremento corriente anual a la edad de 238 años.

De acuerdo Perry y LeVan (2003), una persona consume en promedio $0,84 \text{ kg}$ de oxígeno por día, lo que indica que un árbol con 86 años de edad proporcionaría O_2 para una persona adulta durante 44.12 días lo que es igual 6.3 semanas. De acuerdo al incremento corriente anual en biomasa total, a partir de los 67 años de edad un árbol de *Pinus cembroides*, es capaz de producir O_2 al menos para un día de vida de un adulto.

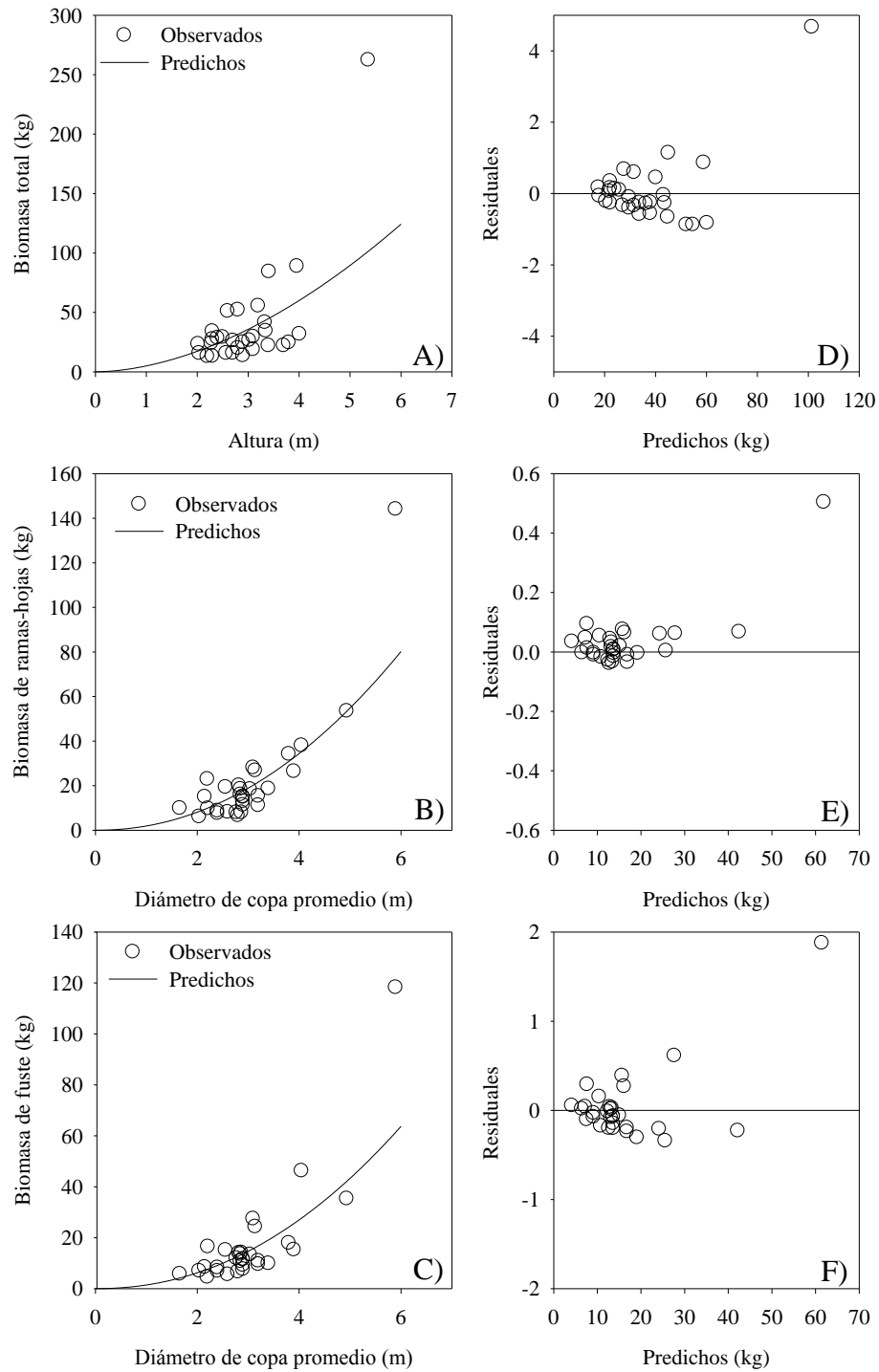


Figura 2. Relación biomasa total y edad (A); residuales del modelo (D); relación biomasa de ramas – hojas y edad (B); residuales del modelo (E); relación biomasa de fuste y edad (C); residuales del modelo (F); en *Pinus cembroides* Zucc en Mazapil, Zacatecas, México.

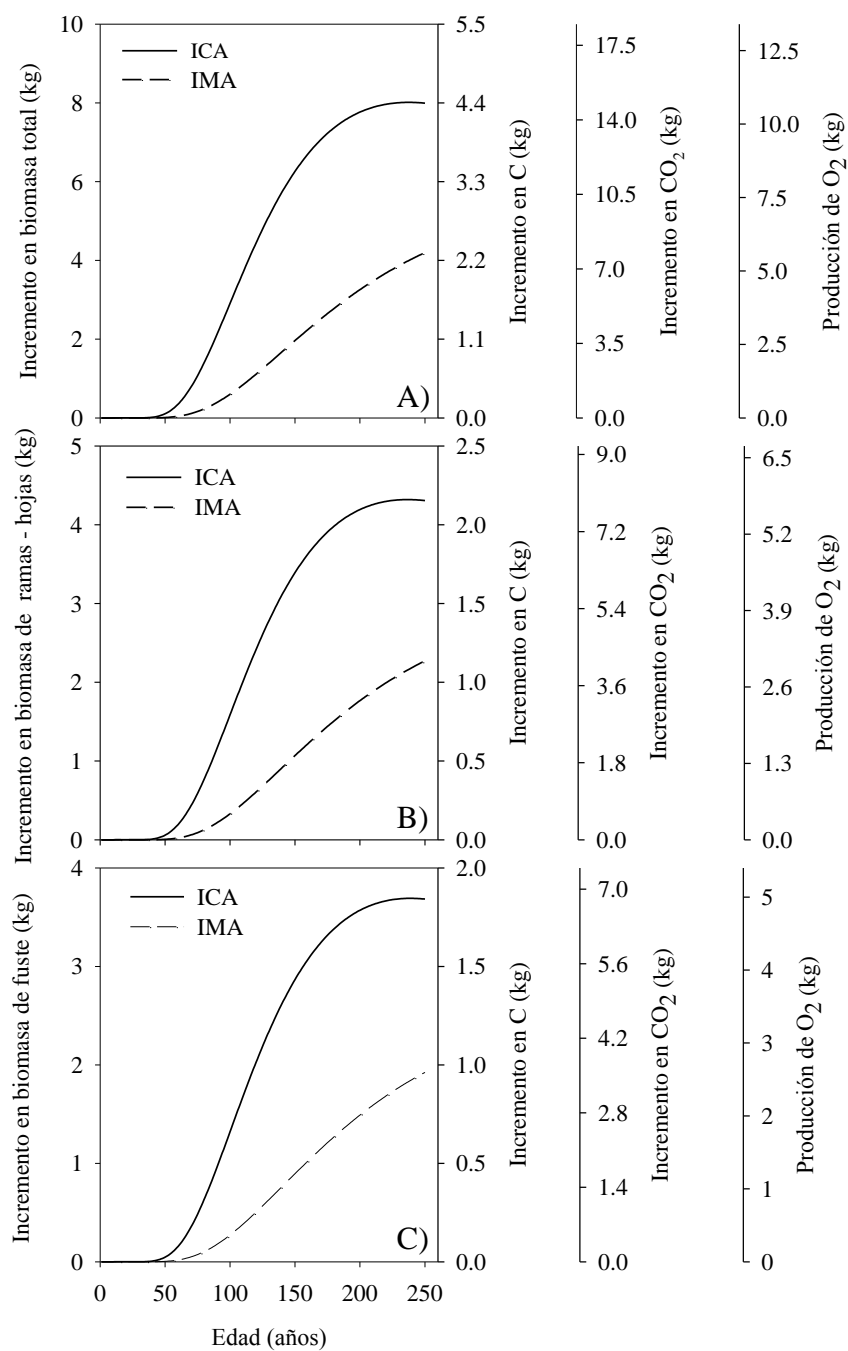


Figura 3. Relación incrementos de biomasa total, en carbono, CO₂ y O₂ con edad (A); relación incrementos de ramas – hojas, en carbono, CO₂ y O₂ con edad (B); relación incrementos de biomasa en fuste, en carbono, CO₂ y O₂ con edad (C); en *Pinus cembroides* Zucc en Mazapil, Zacatecas, México.

CONCLUSIONES

- Con los modelos alométricos se estimó cada componente de biomasa de *Pinus cembroides* (*Bt*, *Bhr*, *Bf*), sin embargo el que mejor se ajustó fue el componente de biomasa seca total, la biomasa seca de hojas-ramas fue la que tuvo un ajuste más bajo, por lo que es preferible cuantificar biomasa total.
- La variable de altura por diámetro a la altura del pecho explica mejor los componentes de biomasa seca de hojas-ramas y de fuste, aunque para la biomasa seca total la variable que mejor explica este componente es la altura. Los modelos alométricos para estimar biomasa que utilizaban el diámetro a la altura del pecho como variable independiente tuvieron los ajustes más bajos.
- A través del modelo de crecimiento fue posible estimar el incremento corriente anual e incremento medio anual en producción de oxígeno, captura de carbono y CO₂, con lo que se determinó el turno absoluto, lo cual nos permite saber por cuánto tiempo *Pinus cembroides* es capaz de mantener almacenado el carbono y dióxido de carbono.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta M M, J Vargas H, A Velázquez M y J D Etchevers B (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36 (8): 725-736.

<http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2002/nov-dic/art-10.pdf>

Andrade H J y M Ibrahim (2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. *Agroforestería en las Américas*, 10: 39-40.

<ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/lead/x6378s/x6378s00.pdf>

Brown S (1997). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Congreso Forestal Mundial. Antalya Turquía, (1): 107-116.

<http://www.chacaltaya.edu.bo/downloads/bosques.pdf>

Broecker W S (1970). Man's oxygen reserve. *Ettu, O₂? 21st C, The World of Research at Columbia University. Special Issue: Biospheres. Science*, 168: 1537-1538

<http://www.columbia.edu/cu/21stC/issue-2.1/broecker.htm>

CONAFOR (2007). Catálogo de contenido de carbono en especies forestales de tipo arbóreo del noreste de México, 1-41.

http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/fichas_de_contenido_de_carbono1.pdf

Constante G V, J Villanueva D, J Cerano P, E H Cornejo O y S Valencia M (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Agrociencia*, 34 (106): 17-39.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-35862009000200002&script=sci_artrtext

Díaz F R, M Acosta M, F Carrillo A, E Buendía R, E Flores A y J D Etchevers B (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y bosques*, 13 (1): 25-34.

http://www1.inecol.edu.mx/myb/resumeness/13.1/MB_2007_13-1_025-034.pdf

Farjon A, J A Pérez B T Styles (1997). A field guide to the pines of Mexico and Central America. The Royal Botanic Gardens Kew Publishing House. London, UK, 147 p.

Flores N P, M A López L, G Ángeles P, M de L de la Isla S y G Calva V (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltldl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2 (8): 9-20.

Flores R N F, L C Mendizábal H, J Alba 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.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49724122003>

García E (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la

Biodiversidad (CONABIO). Climas (Clasificación de Koppen, modificado por García).
Cartografía: escala 1:1 000 000. México.

http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&indent=no

Gayoso J y B Schlegel (2001). Proyectos forestales para la mitigación de gases efecto invernadero. Una tarea pendiente. *Ambiente y Desarrollo*, 1: 41-49.

http://www.cipma.cl/web/200.75.6.169/RAD/2001/1_Gayoso_Schlegel.pdf

Gilman E y D G Watson (1994). Hoja ST – 457. *Pinus cembroides*, piñonero mexicano. Departamento de Horticultura Ambiental, Servicio de Extensión Cooperativa, Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas, Universidad de Florida, 2 p.

http://translate.google.com.mx/translate?hl=es&sl=en&u=http://hort.ifas.ufl.edu/database/documents/pdf/tree_fact_sheets/pincema.pdf&prev=/search%3Fq%3Dpinus%2Bcembroides%2Bpdf%26sa%3DX%26hl%3Des%26biw%3D888%26bih%3D486

Gómez R M, J C Soto C, J A Blanco G, C Sáenz R, J Villegas y R Lindig C (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46: 795-807.

<http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2012/nov-dic/art-5.pdf>

Hansen J, M Sato, R Ruedy (2013). Global Temperature Update Through 2012. http://www.nasa.gov/pdf/719139main_2012_GISTEMP_summary.pdf

Heinrich D, M Hergt (1998). Dtv-Atlas Ecology. 4 Transporte de 1998. (En alemán), 296 pp.

IPCC (2007). Cambio climático 2007, Informe de síntesis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>

Lakyda I (2011). Carbon-sequestering and oxygen-producing functions of urban forests of Kyiv city and pre-urban forests of Stockholm city. Swedish University of Agricultural Sciences. Master Thesis N° 165. Suecia, Sverige. 1: 56.

http://stud.epsilon.slu.se/2490/1/Lakyda_I_110414.pdf

Méndez G J, S L Luckie N, M A Capó A, J A Nájera L (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* lindl. y *P. pseudostrobus* lindl., en Guanajuato, México. Agrociencia, 45: 479-491.

<http://scielo.unam.mx/pdf/agro/v45n4/v45n4a7.pdf>

Muñoz R C, J Cancino C, M Espinosa B (2005) Análisis de biomasa del vuelo de un rodal adulto de *Pinus radiata*. Bosque, 26 (3): 33-44.

<http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v26n3/art04.pdf>

Návar J, N Gonzáles y J Graciano (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, 1-12.

http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/31_Navar.PDF

Nowak D J, J F Dwyer¹ y G Childs (1997). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. Banco Interamericano de Desarrollo. Impreso en México, 17-38.

<http://sustainableforestbusiness.org/spanish/tools/09/files/docs/002.pdf>

Nowak D, R Hoehn y D E Grúa (2007) La producción de oxígeno por los árboles urbanos en los Estados Unidos. Arboricultura Urbana y Forestal, 33 (3): 220-226.

OMM (2009). Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero. Los principales gases de efecto invernadero llegan al nivel más alto jamás alcanzado desde la era preindustrial. http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/868_es.pdf

Pacheco E F C, A Aldrete, A Gómez G, A M Fierros G, V M Cetina A y H Vaquera H (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. Revista Fitotecnia Mexicana, 30: 251-254.

<http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/30-3/5a.pdf>

Perry J P (1991). The pines of Mexico and Central America. Timber Press. Inc. Portland, OR. USA, 231 p.

Raev I, ü, Asan, y O Grozev (1997). Acumulación de CO₂ en la parte aérea de la biomasa de los bosques de Turquía y Bulgaria, en las últimas décadas. *In*: XI Congreso Forestal Mundial. Antalya, Turquía, 1: 4.

<http://www.chacaltaya.edu.bo/downloads/bosques.pdf>

Rzedowski J (1978). Vegetación de México. LIMUSA. México, D. F. México, 432 p.

Salisbury F y C Ross (1978). Fisiología vegetal. Wadsworth publishing company, Belmont, CA, 422 p.

Schlegel B, J Gayoso y J Guerra (2000). Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. FONDEF- UACH- INFOR. Valdivia, Chile, 20 p.

<http://callecalle.uach.cl/proforma/carbono/manmuesbio.PDF>

Sprugel, D G (1983). Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*, 64 (1): 209-210.

http://research.eeescience.utoledo.edu/lees/papers_pdf/Sprugel_1983_Ecology.pdf

Vasilyev P V (1971). Facing new problems of forestry intensification. *In*: Lesnoekhozyaystvo, (in Russian).

Villanueva D J, J Cerano P, D W Stahle, V Constante G, L Vázquez S, J Estrada Á y J de D Benavides S (2010). Ensayo árboles longevos de México. Revista Mexicana Ciencias Forestales, 1 (2): 7-30.

<http://revistascientificas.lcg.com.mx/journal/index.php/rmcf/article/view/60/57>

Yerena Y J I, J Jiménez P, O A Aguirre C, E J Treviño G y E Alanís R (2011). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 3 (13): 50-56.

<http://www.revistasinifap.org.mx/index.php/Forestales/article/view/2364>

Yolasıgımaz H y S Keles (2009). Changes in carbon 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.