

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Cuantificación de Carbono y Producción de Oxígeno en una Plantación de Tres Procedencias
de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México

Por:

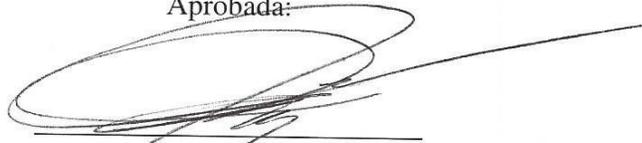
JOSÉ LUIS DE LA CRUZ GARCÍA

TESIS

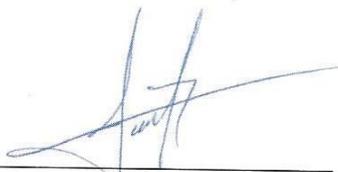
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada:



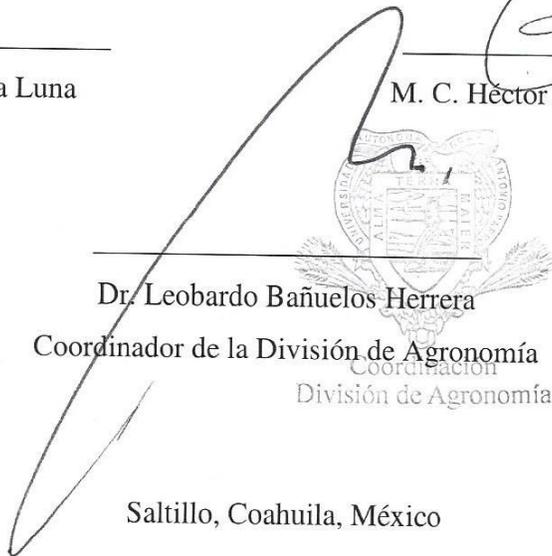
Dr. Jorge Méndez González
Asesor Principal



Dr. Juan Abel Nájera Luna
Coasesor



M. C. Héctor Darío González López
Coasesor



Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Coordinador de la División de Agronomía
Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio 2014

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, fuerza, salud y sabiduría para lograr culminar esta etapa de mi carrera profesional.

A mi abuelita:

Luisa López Sánchez por todo el amor y consejos que en todo momento recibí y por todo su apoyo que siempre me brindó.

A mis padres:

A mi madre Cerilda García Gutiérrez por todo ese amor incansable e incomparable que siempre y en todo momento me ha regalado, por todos sus sabios consejos que fueron la base donde construí mis sueños, a ti dedico este logro que es más tuyo que mío mamá.

A mi padre Francisco De la Cruz López por todo su amor interminable que siempre me ha brindado, por darme lo mejor de él y por todos los sabios consejos que me guiaron durante mi carrera profesional, a ti dedico este logro que es más tuyo que mío papá.

A mis hermanos:

A mis hermanos Gaudencio Cruz García, María del Rosario Cruz García, Juan G. De la Cruz García, Ramona De la Cruz García y Emmanuel de J. De la Cruz García por ser los mejores amigos, por todos sus consejos y apoyo que nunca me negaron y por haberme escuchado en los momentos en que el mundo se volvía sordo ante mí.

A mis Tíos:

A mis tíos Enrique De la Cruz, Crisóforo De la Cruz, Diego De la Cruz, Aristarco López y a mis tías Gudelia De la Cruz, Elena De la Cruz, Cecilia De la Cruz, por todo su apoyo y consejos brindados.

A ILSE ITURBIDE ANDRÉS:

Gracias por todo el amor que me has regalado, pero sobre todo gracias porque de entre el mundo me elegiste a mí para compartir tu corazón, tu amor y tu alegría, gracias por la felicidad que me has contagiado con tu presencia... Te amo chiquilla linda.

A mis amigos:

A mis grandes amigos Luis Bartolo Pérez Gutiérrez, Alfredo Díaz Rodríguez, Santos Cruz Ortiz, Juan Hernández Pachuca, José Luis Pérez Díaz, Gabriel Cervantes, Rodrigo Montoya, Aníbal Prestegui, Jesús Ángel López, J. Gerardo Pérez, Iván de Jesús R. y a todos mis compañeros de la generación.

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 este proyecto de tesis con paciencia, esmero y dedicación, gracias por todos los conocimientos compartidos.

A mis coasesores al Dr. Juan Abel Nájera Luna, M. C. Héctor Darío González López y M. C. José Aniceto Díaz Balderas por sus conocimientos compartidos y por todo el apoyo brindado.

A los profesores del Departamento Forestal que en algún momento de mi carrera influyeron en mi formación profesional.

El presente estudio se realizó con el apoyo de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) dentro del proyecto de investigación 3613 - 2260 Métodos directos e indirectos para estimar biomasa de ramas y árboles completos en plantaciones de *Pinus combroides* Zucc., y *Pinus halepensis* Mill.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
RESUMEN.....	V
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Definiciones	4
Impulsores del cambio climático	6
Ciclo del carbono y el cambio climático	6
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
Descripción del área de estudio	7
Generalidades de la especie <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	7
Obtención de biomasa de árboles de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	7
Obtención de muestras para realizar análisis troncales.....	8
Cuantificación de oxígeno acumulado en el fuste de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	8
Análisis troncales para evaluar la biomasa de fuste de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	9
Cuantificación de biomasa en fuste de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	11
Obtención de carbono en fuste de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	11
Determinación del crecimiento e incremento en diámetro y altura de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	12

Estimación del contenido carbono y carbono equivalente en el fuste de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	13
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
Estadísticos de ajuste del modelo de Schumacher al estimar el carbono de fuste de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	17
Carbono, producción y acumulación de oxígeno en árboles de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	19
Producción de oxígeno en <i>Pinus cembroides</i> Zucc., por unidad de superficie.....	20
Diferencias en producción de oxígeno entre procedencias de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	22
Captura de carbono en función del diámetro de la base de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	23
Crecimiento e incremento en diámetro y altura de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.	28
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
BIBLIOGRAFÍA	35

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características dendrométricas de una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México.	16
Cuadro 2. Estadísticos y parámetros de ajuste del modelo de Schumacher utilizado para estimar la captura de carbono en una plantación constituida por tres procedencias de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México.....	18
Cuadro 3. Prueba de medias con ajuste de Bonferroni para obtener diferencias en producción de oxígeno entre procedencias de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila, México	23
Cuadro 4. Estadísticos de regresión del modelo alométrico para estimar el carbono almacenado en el fuste de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.	25
Cuadro 5. Estadísticos del modelo de Schumacher para estimar el crecimiento e incremento en diámetro de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.....	28
Cuadro 6. Estadísticos del modelo de Schumacher para estimar el crecimiento e incremento en altura de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación de carbono (A, D y G), producción de oxígeno (B, E y H) y oxígeno acumulado (C, F e I) en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México. Procedencia de Mazapil, Zacatecas (A, B y C); Santa Victoria, Coahuila (E, F y G); Concepción del Oro, Zacatecas (G, H e I).	21
Figura 2. Cuantificación de carbono en tres procedencias de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., en Arteaga, Coahuila, México. Procedencias: A) Mazapil, B) Santa Victoria y C) Concepción del Oro.	27
Figura 3. Crecimiento (A, C y E) e incremento medio anual en diámetro (B, D y F), en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México. Procedencia = Mazapil (A y B), Santa Victoria (C y D) y Concepción del Oro (E y F).	31
Figura 4. Crecimiento (A, C y E) e incremento medio anual en altura (B, D y F), en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México. Procedencia = Mazapil (A y B), Santa Victoria (C y D) y Concepción del Oro (E y F).	33

RESUMEN

Las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero, a saber, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), han aumentado desde 1750 debido a la actividad humana. Los bosques secundarios y las plantaciones en crecimiento representan las mejores alternativas para reducir el efecto invernadero y el calentamiento global del planeta. Esta investigación se realizó en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., compuesta de tres procedencias Mazapil (MZ), Santa Victoria (SV) y Concepción del Oro (CO) establecida en Arteaga, Coahuila y tuvo como objetivos: a) estimar el carbono total que acumula *Pinus cembroides* Zucc., a diferentes edades, según su procedencia, b) cuantificar el oxígeno total producido por *Pinus cembroides* Zucc., a diferentes edades. Se utilizó el método destructivo en 16 árboles por procedencia, para estimar la captura de carbono y cuantificar la producción de oxígeno se empleó el modelo de Schumacher utilizando como variable independiente la edad. El modelo se ajustó mejor en la procedencia CO ($R^2 = 0.68$), SV ($R^2 = 0.63$), MZ ($R^2 = 0.65$). Un árbol de *Pinus cembroides* Zucc., de la procedencia MZ almacena 1.19 kg árbol⁻¹ de carbono en el fuste y produce 4.93 kg árbol⁻¹ de oxígeno en conjunto de sus componentes, por otro lado un árbol de la procedencia SV almacena 0.81 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de carbono y produce 3.31 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de oxígeno, y un árbol de la procedencia CO ha capturado 0.54 kg árbol⁻¹ de carbono en el fuste y produce 2.30 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de oxígeno en conjunto de sus componentes.

Palabras clave: *Pinus cembroides* Zucc, método, almacenado, carbono, oxígeno.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales son un reservorio considerable de carbono y contienen más del 80 % del carbono global de la superficie terrestre (Gutiérrez *et al.*, 2010). Se sabe que los bosques secundarios y las plantaciones en crecimiento representan mejores alternativas para reducir la contaminación del aire, el efecto invernadero y el calentamiento global del planeta; sin embargo, cuando los bosques están maduros no ocurre asimilación neta de carbono, debido a que se encuentran saturados y sus tasas de crecimiento disminuyen notablemente a consecuencia de la existencia de un balance entre la respiración y la producción de oxígeno (y entre incremento y muerte de biomasa); los árboles mueren e incorporan CO₂ al suelo y al aire por descomposición, la función de fijación de carbono de un bosque viejo es escasa; aunque extraordinaria como sumidero o depósito de este elemento (Luna, 2005).

Los bosques proporcionan una gran variedad de beneficios naturales que incluye la purificación del aire, protección de cuencas hidrográficas y la conservación de la biodiversidad siendo a la vez fuentes de alimento, fibra y medicina; los árboles y otras plantas forestales remueven grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), un gas de efecto invernadero (GEI), de la atmósfera a medida que crecen, almacenando el carbono en la biomasa de sus hojas, ramas, tallos y raíces (Walker *et al.*, 2011).

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero más importante producido por las actividades humanas, en los últimos 150 años, se ha incrementado las concentraciones de CO₂ en la atmósfera de la tierra y actualmente, cerca de un 20 % de las emisiones de CO₂ resultan de la eliminación y degradación de los ecosistemas forestales; a través de la reforestación y

manejo sustentable, es posible recapturar el CO₂, disminuir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y reducir el calentamiento global (Schlegel, 2001).

En México, los bosques de coníferas y latifoliadas ocupan el 15.4 % del territorio nacional (Gutiérrez *et al.*, 2010). El bosque no puede, por sí solo, compensar las emisiones de CO₂ producidas por la combustión de combustibles fósiles, pero puede ofrecer opciones de mitigación; las opciones de mitigación de carbono son cualquier acción capaz de reducir la emisión neta de dióxido de carbono, bien por aumentar la fijación, a través de un incremento de la vegetación, una mejor gestión de la misma, o por la sustitución que la vegetación puede hacer de los combustibles fósiles (Maser, 1995).

Acosta *et al.* (2002; 2008) y Luna (2005) mencionan que las plantas utilizan CO₂ y liberan O₂ durante el proceso de la fotosíntesis; a diferencia de las especies anuales, los árboles almacenan los fotoasimilados en componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que se les debe considerar como reservas naturales de carbono (Pimienta *et al.*, 2007). La quema de combustibles fósiles consume oxígeno y produce CO₂, se consumen alrededor de 140 moléculas de O₂ por cada 100 átomos de carbono de los combustibles fósiles quemados (Broecker, 1996).

El CO₂ ha sido clasificado como el GEI más abundante en el planeta, y debido al aumento de la contaminación atmosférica, ocasionada principalmente por la quema de combustibles fósiles, ha creado serios problemas al medio ambiente, generando un incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero; a raíz de esta problemática se han buscado alternativas de solución para minimizar este efecto. Para mitigar las concentraciones CO₂ en la atmósfera, se ha considerado a la cobertura vegetal como una forma viable de compensación de los daños provocados por la acumulación de este gas, debido a la capacidad de las plantas

de capturar el dióxido de carbono (Solís *et al.*, 2010). Otra forma de mitigar la acumulación de CO₂ en la atmósfera es utilizar las opciones de mitigación como la conservación, la gestión sostenible de los recursos naturales y la reforestación (Maserá, 1995).

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2013) las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero, a saber, el dióxido de carbono (CO), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (NO), han aumentado desde 1750 debido a la actividad humana y en 2011, las concentraciones de estos gases de efecto invernadero eran de 391 ppm, 1803 ppm y 324 ppm, respectivamente, valores que excedían los niveles preindustriales en aproximadamente el 40 %, el 150 % y el 20 %, respectivamente, cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde 1850; en el hemisferio norte, es probable que el período comprendido entre 1983 y 2012 haya sido el período de 30 años más cálido de los últimos 1400 años a consecuencia de los GEI.

Esta investigación se realiza con la finalidad de aportar información que ayude mitigar los efectos del cambio climático global, por ello se plantea los siguientes objetivos: a) estimar el carbono total que acumula *Pinus cembroides* Zucc., a diferentes edades, según su procedencia, b) cuantificar el oxígeno total producido por *Pinus cembroides* Zucc., a diferentes edades. Para este estudio se plantea la siguiente Hipótesis: la producción de oxígeno es similar entre procedencias en la plantación de *Pinus cembroides* Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México.

REVISIÓN DE LITERATURA

Definiciones

García (2011) define:

Cambio climático: Es un cambio en el clima que es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad observada a lo largo de períodos de tiempo comparables. Por lo general, cambio climático hace referencia a las interferencias humanas, mientras que variabilidad climática se refiere a los cambios naturales.

Efecto invernadero: La fuente energética elemental que influye en el clima es la radiación solar (radiación de onda corta). Alrededor de un tercio de la radiación solar entrante es reflejada de nuevo al espacio, en particular por las nubes. El resto es absorbido por la atmósfera, tierra, océano y superficies heladas. La Tierra y la atmósfera emiten radiación que sale en forma de ondas largas infrarrojas. Una parte de esa radiación saliente queda atrapada por los GI producidos de forma natural (vapor agua, dióxido de carbono, ozono, metano y óxido nitroso) y por las nubes. Esa intervención de los GI mantiene la superficie terrestre más caliente de lo que, de otro modo, hubiera estado.

Gases de efecto invernadero: Son todos aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y reflejan radiación infrarroja. Hablamos del vapor agua, dióxido carbono, óxido nitroso, metano y clorofluorocarbonos (CFCs).

Fotosíntesis: Es el proceso en el cual las plantas verdes, las algas y ciertas bacterias toman dióxido de carbono del aire para elaborar hidratos de carbono y liberar oxígeno. Hay varias

vías de fotosíntesis posibles, con diferentes respuestas a las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera.

Carbono (C): El carbono es uno de los elementos químicos más abundantes del planeta Tierra y está presente en todos los seres vivos. Es también un componente que se encuentra naturalmente en la atmósfera de la Tierra. Representado por el símbolo C, el carbono se encuentra en grandes cantidades en las hojas, ramas, tallos y raíces de los árboles. Además de estar compuesta de hasta 50 % de agua, la biomasa de un árbol vivo contiene aproximadamente 25 % de carbono. El 25 % restante está formado de otros elementos en diferentes cantidades incluyendo el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y otros elementos en cantidades mínimas (Walker *et al.*, 2011).

Masera (1995) menciona que para mitigar el cambio climático se considera viable cualquier acción que tenga como resultado una reducción en las emisiones de los GEI o la sustitución de los combustibles fósiles por biocombustibles. Por otra parte, se reconocen dos opciones básicas para amortiguar el cambio climático en el sector forestal: a) la conservación, que consiste en la preservación de áreas naturales protegidas; el fomento de aplicar manejo sostenible a los bosques naturales y la protección de las áreas arboladas para reducir los incendios, así como prevenir las plagas y las enfermedades; y b) el aumento de la extensión de las áreas arboladas, ya sea mediante la reforestación dedicada a recuperar áreas degradadas con acciones como: la protección de cuencas, la reforestación urbana, la restauración, el desarrollo de plantaciones comerciales para producir madera, pulpa para papel, hule, etc.; así como, mayor número de las plantaciones energéticas y sistemas agroforestales. Acciones como las anteriores tienen por objetivo mejorar la fijación de carbono y mantener estables sus depósitos.

Impulsores del cambio climático

Los impulsores del cambio climático son las sustancias y los procesos naturales y antropógenos que alteran el balance energético de la Tierra. El forzamiento radiativo permite cuantificar las modificaciones en los flujos de energía, provocados por el aumento de estos impulsores. Cuando el forzamiento radiativo es positivo, se produce un calentamiento en superficie, y cuando es negativo, un enfriamiento. El forzamiento radiativo puede señalarse mediante cambios en la concentración de cada sustancia, o también puede señalarse por la emisión de un componente, lo que ofrece una relación más directa con la actividad humana. Este incluye las contribuciones de todas las sustancias afectadas por esa emisión. El forzamiento radiativo antropógeno total de los dos métodos es idéntico cuando se consideran todos los impulsores. La velocidad y la magnitud del cambio climático mundial están determinadas por el forzamiento radiativo, las retroalimentaciones climáticas y el almacenamiento de energía por el sistema climático (IPCC, 2013).

Ciclo del carbono y el cambio climático

El IPCC (2013) advierte que el cambio climático afectará a los procesos del ciclo del carbono de un modo que agudizará el aumento de CO₂ en la atmósfera. Las nuevas incorporaciones de carbono en los océanos provocarán una mayor acidificación de estos. Hay un nivel de confianza alto en cuanto a que la retroalimentación entre el clima y el ciclo del carbono será positiva en el siglo XXI; es decir, el cambio climático compensará parcialmente los aumentos en los sumideros de carbono terrestres y oceánicos que se produzcan, aumentando el CO en la atmósfera, con lo que quedará retenido en ella una mayor proporción del CO₂ antropógeno emitido (IPCC, 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El presente estudio se realizó en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., establecida en junio del año de 1992, constituida por tres procedencias: Mazapil, Zacatecas (MZ), Santa Victoria, Coahuila (SV) y Concepción del Oro, Zacatecas (CO), ubicada en la Sierra de Arteaga, Coahuila, México (25° 23' N y 100° 36' O), a una altitud de 2276 msnm; clima templado con temperatura media anual de 13.6 °C y precipitación anual promedio de 521.2 mm (García, 1987). La plantación se realizó con un espaciamiento entre plantas de 1.8 m, dando un total de 3,988 árboles ha⁻¹.

Generalidades de la especie *Pinus cembroides* Zucc.

Pinus cembroides es la especie más ampliamente distribuida, pues su área de distribución geográfica conocida se extiende por casi todo el norte y centro del país, abarca desde el oeste de Estados Unidos de América hasta México, donde está presente en Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo (Narave, 1997; Rzedowski, 2006), entre los 18° y los 32° de latitud norte. *Pinus cembroides* crece sobre laderas de montañas, lomeríos, al pie de cerros, con pendientes, secas y rocosas en territorios donde la precipitación media anual oscila de 350 a 700 mm, sus límites altitudinales conocidos son 1 500 y 3 000 m.s.n.m (Rzedowski, 2006).

Obtención de biomasa de árboles de *Pinus cembroides* Zucc.

La determinación adecuada de la 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. Para la realización de este estudio se utilizó el

método destructivo propuesto por Schlegel et al. (2000), que consiste en derribar el árbol; se analizaron 48 árboles representativos (16 árboles por procedencia), a cada árbol se midió algunas características dasométricas (altura total, diámetro a la base, diámetro de copa), posteriormente se desramó con una motosierra marca TRUPER con espada de 20". Se procedió a la obtención del peso total en verde de las partes del árbol (hojas, ramas y fuste) para ello se utilizó una báscula marca Torrey modelo L-EQ con capacidad de 4 kg. Se tomó una submuestra de cada componente para posteriormente trasladarlas al laboratorio para su secado.

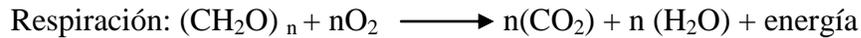
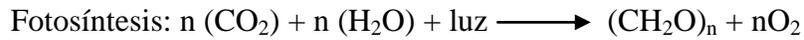
Obtención de muestras para realizar análisis troncales

Se obtuvo en promedio seis rodajas por árbol a diferentes alturas, con un espesor aproximado de 5 cm cada una. La primera rodaja corresponde a la base del árbol (5 cm sobre suelo) y luego en intervalos de 0.5 m de espacios entre rodajas, para posteriormente obtener el volumen individual sin corteza a diferentes edades.

Cuantificación de oxígeno acumulado en el fuste de *Pinus cembroides* Zucc.

De acuerdo con Nowak et al. (2007) la producción neta de oxígeno de un árbol durante un año, está directamente relacionado con la cantidad de carbono almacenado por el árbol, 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 (secuestro de carbono). 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:

$$\text{Producción neta de O}_2 \text{ (kg/año)} = \text{Carbono secuestrado en la biomasa (kg/año)} \times (32/12).$$

Se obtuvo el oxígeno acumulado en cada componente a través de la suma del oxígeno producido en la edad anterior, más el oxígeno producido en el año actual, y el oxígeno total producido por el árbol durante su vida con la suma del oxígeno producido por todos sus componentes (Fuste, Hojas y Ramas). El oxígeno producido en estos dos últimos, se obtuvo por el producto del porcentaje de biomasa que ocupa cada componente en la biomasa total por el oxígeno neto producido por el fuste en el mismo año.

Análisis troncales para evaluar la biomasa de fuste de *Pinus cembroides* Zucc.

Para realizar el análisis troncal se procedió al secado de las rodajas, en el cual se utilizó una estufa marca Blue M a 70 °C durante 15 días (Pacheco *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011), posterior a esto se lijaron las rodajas de cada árbol con una lijadora eléctrica de banda marca Makita con motor de 1010 w, modelo 9404, posteriormente se realizó la medición de los diámetros de todos los anillos contenidos en cada rodaja con un microscopio 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 base de datos de Excel para su análisis, el intervalo de edad fue consecutivo para mayor precisión, obteniendo así el diámetro en todas

las edades (Mas, 1970). Se realizó el cálculo del volumen (Ecuación 1) total a diferentes edades de cada árbol, usando similitud a una troza los intervalos en que se obtuvieron las rodajas 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 las troza (m).

Para obtener el volumen del tocón se utilizó la fórmula de un tipo dendrométrico neiloide paraboloides expresado en la fórmula siguiente:

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

Donde:

V = volumen (m³).

d = diámetro del tocón (m).

L = longitud o altura del tocón (m).

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

$$V = 1/2 * \pi * r^2 * L \quad 3)$$

Donde:

$V = \text{volumen (m}^3\text{)}$.

$r = \text{radio (m)}$.

$L = \text{longitud de la punta del fuste (m)}$.

$\pi = \text{valor de pi (3.1416)}$.

Cuantificación de biomasa en fuste de *Pinus cembroides* Zucc.

La biomasa contenida en el fuste de *Pinus cembroides* se obtuvo por el producto del volumen del fuste a diferentes edades por el peso específico de la madera de la especie (0.430 kg m^3) Patrick y Brad (2009), metodología utilizada satisfactoriamente por Pimienta et al. (2007) (Ecuación 4).

$$B = \text{Vol} * \text{PE} \quad 4)$$

Donde:

$B = \text{biomasa (kg)}$.

$\text{Vol} = \text{volumen (m}^3\text{)}$.

$\text{PE} = \text{peso específico de la madera (0.430 kg m}^3\text{)}$.

Obtención de carbono en fuste de *Pinus cembroides* Zucc.

El carbono contenido en el fuste de *Pinus cembroides* se obtuvo a través del producto de la biomasa del fuste por la fracción de carbono (50.25 %) contenido en la biomasa de esta especie (Yerena et al., 2012) (Ecuación 5).

$$C = B * \text{FC} \quad 5)$$

Donde:

C = carbono (kg).

B = biomasa (kg).

FC = contenido de carbono (0.5025).

Para predecir el carbono acumulado en el fuste de *Pinus cembroides* se probaron tres modelos (Logístico, Scumacher y Gompertz) con la finalidad de obtener el más alto coeficiente de determinación (R^2). Los datos se analizaron el paquete estadístico SAS 9.0; el modelo utilizado para estimar carbono en fuste de *Pinus cembroides* fue el de Schumacher utilizando como variable independiente la edad, el cual viene expresado como:

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

Donde:

C = carbono (kg).

exp = exponencial.

E = edad (años).

β_0 y β_1 = parámetros del modelo.

Determinación del crecimiento e incremento en diámetro y altura de *Pinus cembroides*

Zucc.

Con la derivada del modelo Schumacher (Ecuación 6) y utilizando los datos correspondientes a diámetros basales sin corteza tomados a diferentes edades se procedió a determinar la tendencia del incremento corriente anual (ICA) y el incremento medio anual (IMA) en diámetro y altura, de acuerdo a las fórmulas siguientes:

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

$$\text{IMA: } \frac{\partial Y}{\partial \beta_1} = -\frac{1}{E} \exp(\beta_0 + \beta_1 E) \quad 8)$$

Donde:

ICA = incremento corriente anual.

IMA = incremento medio anual.

exp = exponencial.

E = edad.

β_0 y β_1 = parámetros del modelo.

Estimación del contenido carbono y carbono equivalente en el fuste de *Pinus cembroides*

Zucc.

Para estimar el carbono almacenado en el fuste de *Pinus cembroides* Zucc., se utilizó el modelo alométrico en su forma lineal (Ecuación 9) usando como variable independiente el diámetro a diferentes edades en su base logarítmica (Sprugel, 1983), contenidos en la primer rodaja de cada árbol.

$$\log y = \log a + b \log x \quad 9)$$

Donde:

log = logaritmo natural.

y = carbono (kg).

x = diámetro normal (cm).

a y b = parámetros del modelo.

Al contenido de carbono estimado en el fuste de *Pinus cembroides* Zucc., mediante el modelo alométrico en su forma lineal (Ecuación 9) se les aplicó el factor de corrección para modelos con logaritmos con la finalidad de corregir el sesgo y de mejorar las estimaciones de carbono en el fuste de *Pinus cembroides* Zucc., (Sprugel, 1983), el cual se calculó con la fórmula siguiente:

$$FC = \exp \frac{EE^2}{2} \quad 10)$$

Donde:

FC = factor de corrección.

exp = exponencial.

EE = error estándar en unidades logarítmicas.

El CO₂e fijado en la biomasa se obtuvo con el producto del contenido de carbono y el coeficiente resultante de la relación entre el peso de la molécula de CO₂ (44) y el peso del átomo de carbono (12) (Pacheco *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011; Walker *et al.*, 2011) (Ecuación 11).

$$CO_2e = C * F \quad 11)$$

Donde:

CO₂e = Carbono equivalente (kg)

F = 44/12 (3.67)

C = Carbono almacenado (kg)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente estudio se realizó en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., constituida por tres procedencias (Proc): Mazapil (MZ); Santa Victoria (SV); Concepción del Oro (CO). Para ello se utilizó una muestra de 48 árboles representativos (16 árboles por procedencia) superior a la muestra utilizada por Sierra et al. (1992) utilizando únicamente un árbol en el estudio denominado distribución de biomasa aérea y crecimiento de un individuo de *Pinus pinaster* Ait en Arenas de San Pedro en la provincia de Avila, Chile; Návar et al. (2001) en su estudio denominado ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México, utilizaron 56 árboles de cinco especies diferentes (*Pinus durangensis* = 25, *Pinus cooperi* O = 19, *Pinus arizonica* = 4, *Pinus cooperi* B = 1 y *Pinus engelmannii* = 5 árboles); Díaz et al. (2007) utilizaron 25 árboles para generar ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* en el Ejido Mariano de Matamoros, Tlaxco, Tlaxcala; Solís et al. (2010) utilizaron 43 árboles en su estudio ecuaciones de biomasa y carbono en plantaciones forestales del género *Pinus* en la región de el Salto, Durango, México; Méndez et al. (2011) para estimar biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus*, en Guanajuato, México utilizaron 40 árboles.

Los resultados de este estudio indican que desde la fecha de plantación a la actualidad el diámetro máximo a la base de *Pinus cembroides* Zucc corresponde a la procedencia MZ con 9.3 cm y el mínimo de 3.8 cm; para SV un máximo de 9 cm y mínimo de 4.6 cm; y CO presentó un diámetro máximo de 8.5 cm y mínimo de 4.5 cm (Cuadro 1). Los diámetros basales de *Pinus cembroides* Zucc., utilizados en este estudio son inferiores a los analizados por Sierra et al. (1992) quienes analizaron la biomasa aérea de un individuo de *Pinus pinaster* Ait con diámetro a 1.30 m de 33.4 cm; Návar et al. (2001) en su estudio ecuaciones para

estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango analizaron árboles con diámetros a 1.30 m de: *Pinus durangensis* = 13.4 cm, *Pinus cooperi* O = 12.4 cm, *Pinus arizonica* = 11.0 cm, *Pinus cooperi* B = 16.3 cm y *Pinus engelmannii* = 12.1 cm de diámetro; Rodríguez et al. (2009) en el estudio denominado estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México utilizaron árboles con diámetros a la altura del pecho (1.30 m) desde 5.0 cm hasta 30.0 cm; Méndez et al. (2011) estimaron biomasa utilizando árboles con diámetro normal desde 13.0 cm hasta 23.0 cm para *P. devoniana*, mientras que en *P. pseudostrobus* estos valores fueron 14.5 a 27.0 cm.

La altura máxima promedio de los árboles de *Pinus cembroides* utilizados en este estudio se registró en la procedencia MZ (2.77 m), y la menor para SV (2.49 m) (Cuadro 1); Sierra et al. (1992) analizaron la biomasa aérea de un individuo de *Pinus pinaster* Ait con una altura de 21.5 m; Návar et al. (2001) utilizaron arboles con alturas de: *Pinus durangensis* = 5.91 m, *Pinus cooperi* O = 6.27 m, *Pinus arizonica* = 5.48 m, *Pinus cooperi* B = 4.00 m y *Pinus engelmannii* = 3.46 m para estimar biomasa en plantaciones forestales en Durango, México; Méndez et al. (2011) estimaron biomasa utilizando árboles con alturas mínimas de de 5.6 y máxima de 10.0 m para *Pinus devoniana*, mientras que en *Pinus pseudostrobus* estos valores fueron 7.4 a 12.6 m de altura total.

Cuadro 1. Características dendrométricas de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México.

Proc	Estadístico	DB	DC	HT
MZ	Media	6.63	1.69	2.77
	Mínimo	3.80	0.80	1.93
	Máximo	9.30	3.86	4.05

SV	Media	6.67	1.34	2.49
	Mínimo	4.60	0.93	1.63
	Máximo	9.00	2.44	3.08
CO	Media	6.31	1.21	2.61
	Mínimo	4.50	0.83	1.73
	Máximo	8.50	1.62	3.30

Donde: Proc = procedencia, MZ = Mazapil, SV = Santa Victoria, CO = Concepción del Oro, DB = diámetro a la base (cm), DC = diámetro de copa (m), HT = altura total (m).

Estadísticos de ajuste del modelo de Schumacher al estimar el carbono de fuste de *Pinus cembroides* Zucc.

El modelo que mejor se ajustó para estimar la acumulación de carbono fue el de Schumacher (Ecuación 6) utilizando 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 devoniana* y *Pinus pseudostrobus*.

Al realizar el análisis se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.65, 0.63, 0.68 para MZ, SV y CO respectivamente, es visible que la procedencia en la que mejor se ajustó el modelo para predecir el carbono secuestrado es la de Concepción del Oro (Cuadro 2). Los coeficientes de determinación de las tres procedencias (MZ, SV y CO) son inferiores a los encontrados Méndez et al. (2011), ellos estimaron biomasa aérea en una plantación mixta con un coeficiente de determinación de 0.95 en árboles dominantes (AD) y 0.81 en árboles codominantes (ACD) en *Pinus devoniana* y 0.82 en AD y 0.65 en ACD en *Pinus pseudostrobus* utilizando como variable independiente el diámetro normal.

Al obtener los estadísticos del modelo de Schumacher, utilizado para estimar la captura de carbono en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., es posible observar que los valores de los parámetros que utiliza el modelo (Ecuación 6) varían desde 0.8439 para CO, hasta 2.1338

con el valor máximo para MZ, para el parámetro β_0 ; y desde -28.9733 para SV, hasta -41.2453 con el valor máximo para MZ, para el parámetro β_1 (Cuadro 2); Méndez et al. (2011) al estimar biomasa y carbono en una plantación a 12 años de establecida encontraron valores de $\beta_0 = 5.5303$ y 6.0226 y β_1 con valores de -17.7098 y -19.78709 en *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus* respectivamente.

El error estándar al estimar el carbono almacenado en el fuste de *Pinus cembroides* Zucc., es aceptable al estar muy cercano a 0, el valor más alejado a éste es para MZ, procedencia en que se presentó el error máximo (0.20 kg) y el valor más cercano a 0 corresponde a CO (0.09kg) (Cuadro 2), estos valores son inferiores a los de *Pinus devoniana* (4.09 kg) y *Pinus pseudostrobus* (12.78 kg) ambos en árboles dominantes al estimar biomasa (Méndez et al., 2011), debido a que los árboles analizados en el presente estudio presentan menor biomasa por árbol indicado.

El coeficiente de variación indica la variabilidad de los datos de la muestra, expresado a través del modelo indicando que existe mayor variación en la predicción del carbono para la procedencia de MZ (85.53 %); la menor variación se presentó en la procedencia CO (72.34 %), tomando como variable independiente la edad (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estadísticos y parámetros de ajuste del modelo de Schumacher utilizado para estimar la captura de carbono en una plantación constituida por tres procedencias de *Pinus cembroides* Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México.

Proc	Parám	Coef	Error estándar	t	P	VIF	R ²	Sxy	CV
MZ	β_0	2.1338	0.22	9.81	<0.0001	42.1602	0.65	0.20	85.53
	β_1	-41.2453	3.38	-12.19	<0.0001	42.1602			

SV	β_0	1.1702	0.17	7.04	<0.0001	28.2123	0.63	0.17	74.53
	β_1	-28.9733	2.51	-11.53	<0.0001	28.2123			
CO	β_0	0.8439	0.17	5.05	<0.0001	30.4380	0.68	0.09	72.34
	β_1	-30.7316	2.45	-12.55	<0.0001	30.4380			

Donde: Proc = procedencia; MZ = mazapil; SV = santa victoria; CO = concepción del oro; Parám = parámetros; Coef = coeficiente; t = valor de t; P = probabilidad; VIF = factor de inflación de la varianza; R^2 = coeficiente de determinación; Sxy = error estándar (kg); CV = Coeficiente de variación (%).

Carbono, producción y acumulación de oxígeno en árboles de *Pinus cembroides* Zucc.

De acuerdo al modelo utilizado (Ecuación 6) para estimar la acumulación de carbono; un árbol de *Pinus cembroides* Zucc., de la procedencia MZ a los 20 años de edad almacena 1.19 kg árbol⁻¹ de carbono (Figura 1A), y su máximo incremento en producción de oxígeno lo alcanza a la edad de 20 años con 0.30 kg árbol⁻¹ año⁻¹, únicamente en el fuste (Figura 1B). En general un árbol de esta procedencia a los 21 años de edad produce 4.93 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de oxígeno en conjunto de todos sus componentes fuste (F), hojas (H) y ramas (R) (Figura 1C), y durante toda su vida ha producido 31.53 kg árbol⁻¹ de oxígeno.

Un árbol de la misma especie, de la procedencia SV en la edad de 20 años y en las mismas condiciones ambientales acumula un total de 0.81 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de carbono (Figura 1D), y su máximo incremento en producción de oxígeno lo alcanza a la edad de 15 años con 0.16 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de oxígeno, solo en el fuste (Figura 1E). Un individuo de 21 años de edad de esta procedencia produce 3.31 kg árbol⁻¹ año⁻¹ de oxígeno en conjunto con sus componentes (F, H y R) (Figura 1F), y durante toda su vida ha producido 25.50 kg árbol⁻¹ de oxígeno.

Por otro lado un árbol de la procedencia CO a la misma edad (20 años) captura $0.54 \text{ kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de carbono (Figura 1G), su máximo incremento en producción de oxígeno ocurre a la edad de 15 años con $0.11 \text{ kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Figura 1H), únicamente en el fuste. Un árbol de esta procedencia a la edad de 21 años produce $2.30 \text{ kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de oxígeno en conjunto de todos sus componentes (F, H y R) (Figura 1I), y durante toda su vida ha producido $17.18 \text{ kg árbol}^{-1}$ de oxígeno.

Producción de oxígeno en *Pinus cembroides* Zucc., por unidad de superficie

Una plantación de 21 años de edad de *Pinus cembroides* Zucc., con la misma densidad de plantación ($3,988 \text{ árboles ha}^{-1}$) y plántulas provenientes de Mazapil acumularía $0.44 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de carbono únicamente en el componente fuste, y se producirían un total de $1.84 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de oxígeno en conjunto de todos sus componentes (Derivado de la Figura 1B), por otra parte si la plantación se realizara con plántulas provenientes de SV se acumularían $0.22 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de carbono en el componente fuste, y produciría $0.88 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de oxígeno (Derivado de la Figura 1E); y si se utilizaran plántulas provenientes de CO se acumularía $0.15 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de carbono, únicamente en el fuste, y produciría $0.65 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de oxígeno en conjunto de todos sus componentes (Derivado de la Figura 1H).

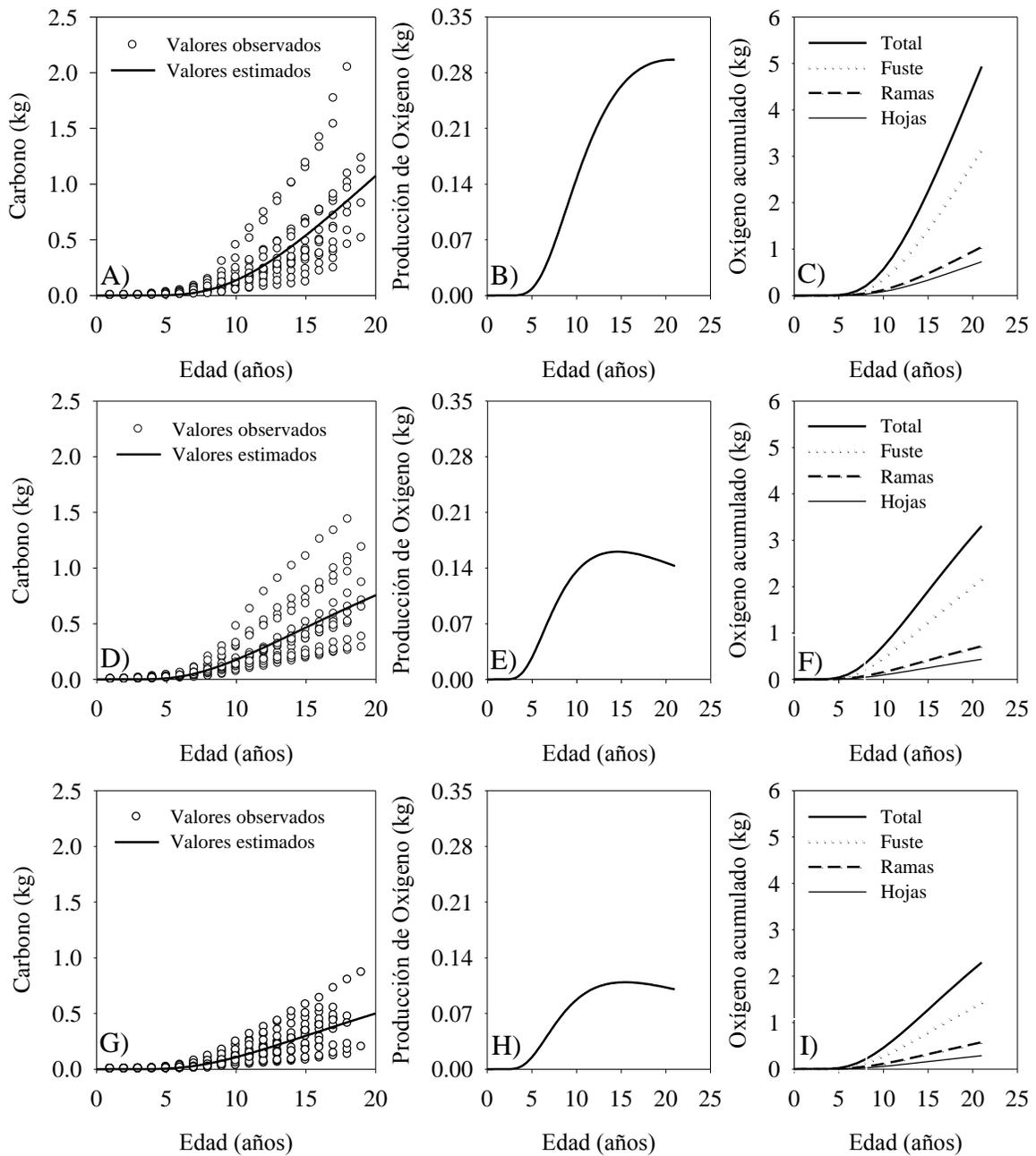


Figura 1. Relación de carbono (A, D y G), producción de oxígeno (B, E y H) y oxígeno acumulado (C, F e I) en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México. Procedencia de Mazapil, Zacatecas (A, B y C); Santa Victoria, Coahuila (E, F y G); Concepción del Oro, Zacatecas (G, H e I).

De acuerdo Perry y LeVan (2003), una persona consume en promedio 0,84 kg de oxígeno por día, lo que indica que un árbol de *Pinus cembroides* a la edad de 21 años y con la procedencia MZ ha producido O₂ para una persona adulta durante 37.54 días, SV 30.36 días y CO 20.45 días de vida.

Diferencias en producción de oxígeno entre procedencias de *Pinus cembroides* Zucc.

Se realizó un análisis estadístico mediante ANOVA (95 %), usando el oxígeno producido cada cinco años para probar la similitud o diferencia de producción de oxígeno entre procedencias. En los primeros 10 de edad años no existe diferencia significativa ($P > 0.05$) entre procedencias, pero al realizar el análisis en el intervalo de edad de 10 a 15 años la diferencia en la producción de oxígeno en fuste de *Pinus cembroides* Zucc., entre procedencias es altamente significativa ($P > 0.0001$). MZ presenta la mayor producción de oxígeno (0.215 kg árbol⁻¹), SV (0.154 kg árbol⁻¹) y la menor producción de oxígeno corresponde a CO (0.102 kg árbol⁻¹); la procedencia MZ presenta una diferencia de medias en la producción de oxígeno de 0.113 kg árbol⁻¹ sobre la procedencia CO y 0.061 kg árbol⁻¹ sobre la procedencia SV; se presenta la diferencia mínima de 0.052 entre CO y SV (Cuadro 3).

A partir de los 15 a los 21 años, edad de la plantación, la diferencia en la producción de oxígeno sigue siendo altamente significativa ($P > 0.0001$) y MZ nuevamente es la procedencia en la que se presenta mayor producción de oxígeno (0.287 kg árbol⁻¹) seguida de la procedencia SV (0.153 kg árbol⁻¹), y la procedencia que menor producción de oxígeno presenta es CO (0.106 kg árbol⁻¹) (Cuadro 3).

El método utilizado para analizar la similitud en cuanto a producción de oxígeno en el fuste de *Pinus cembroides* Zucc., indica que la procedencia MZ es superior en 0.181 kg árbol⁻¹ y 0.134

kg árbol⁻¹ sobre CO y SV respectivamente; la diferencia mínima pero visible se presentó entre la procedencia CO y SV, siendo superior SV con 0.047 kg árbol⁻¹ de oxígeno (Cuadro 3).

Cuadro 3. Prueba de medias con ajuste de Bonferroni para obtener diferencias en producción de oxígeno entre procedencias de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México

Edad	Prod. Prom	Media	Comparación	Dif. de medias	Valor- T	P - Bonferroni
10 a 15 Años	MZ	0.215	CO vs MZ	0.113	6.825	0.000*
	SV	0.154	CO vs SV	0.052	11.758	0.000*
	CO	0.102	MZ vs SV	0.061	3.681	0.019*
15 a 21 Años	MZ	0.287	CO vs MZ	0.181	42.350	0.000*
	SV	0.153	CO vs SV	0.047	17.093	0.000*
	CO	0.106	MZ vs SV	0.134	28.215	0.000*

Donde: MZ = Mazapil; SV = Santa Victoria; CO = Concepción del Oro; Proc = procedencia; Produc. Prom = producción promedio (kg); Dif. de medias = diferencia de medias (kg); Valor-T = valor del estadístico T; *significancia.

Captura de carbono en función del diámetro de la base de *Pinus cembroides* Zucc.

Al utilizar el diámetro de la base de *Pinus cembroides* Zucc., para estimar el contenido de carbono los coeficientes de determinación (R^2) se incrementan. La procedencia que presentó el mejor ajuste fue SV ($R^2 = 0.99$), CO ($R^2 = 0.71$) y MZ ($R^2 = 0.70$) (Cuadro 4).

Los valores de los coeficientes de determinación de *Pinus cembroides* Zucc., son inferiores, (excepto para la procedencia SV) a los obtenidos por Díaz et al. (2007) quienes encontraron un coeficiente (R^2) de 0.98 al estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. en el Ejido Mariano de Matamoros, Tlaxco, Tlaxcala; Pimienta et al. (2007) encontraron un coeficiente

(R^2) de 0.99 al estimar carbono en *Pinus cooperi* Blanco en Pueblo Nuevo, Durango, este coeficiente es similar al obtenido en la procedencia SV ($R^2 = 0.99$) e inferior a los obtenidos en CO y MZ; Rodríguez et al. (2009) al estimar carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, México, obtuvieron los coeficientes (R^2) más altos en el género *Pinus* con valores superiores a 0.99 excepto para *Pinus patula* con 0.98, y el resto de las especies presentes en el bosque de pino-encino fue superior a 0.95 utilizando como variable independiente el diámetro normal; Jiménez et al. (2010) estimaron biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.98 en ambos casos usando el diámetro normal como variable independiente; Solís et al. (2010) estimaron biomasa y carbono en *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis* y *Pinus engelmannii* encontrando un coeficiente (R^2) superior a 0.90 utilizando como variable independiente el diámetro normal.

El error estándar del modelo alométrico fue: MZ = 0.09 kg, SV = 0.04 kg y CO = 0.09 kg al utilizar como variable independiente el diámetro a la base (Cuadro 4). Estos valores son inferiores a los obtenidos con el modelo de Schumacher utilizando como variable independiente la edad MZ = 0.20 kg, SV = 0.17 kg y CO = 0.09 kg (Cuadro 2), incluso son menores al de *Pinus devoniana* (4.09 kg) y *Pinus pseudostrobus* (12.78 kg) ambos en árboles dominantes al estimar biomasa (Méndez et al., 2011), debido a que los árboles de *Pinus cembroides* Zucc., utilizados en este estudio presentan diámetros menores y por consiguiente un menor contenido de biomasa en el fuste.

De igual manera el coeficiente de variación disminuyó en gran medida; se obtuvo para MZ y CO la máxima variación (CV = 42.7 %) al utilizar el diámetro basal como variable independiente en el modelo alométrico (Ecuación 9); la menor variación se presentó en la

procedencia CO (72.34 %) (Cuadro 2), al estimar la captura de carbono utilizando como variable independiente la edad en el modelo de Schumacher (Ecuación 6).

Los valores de los parámetros del modelo alométrico (Ecuación 9) a y b varían desde -4.7870 para la procedencia SV hasta -4.8863 para CO y desde 2.4583 para CO hasta 2.5138 para la procedencia SV (Cuadro 4). Se obtuvo un FC de 1.029 en la procedencia MZ, 1.011 en la procedencia SV y 1.025 en la procedencia CO, este factor fue mayor en Mazapil y menor en Santa Victoria (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estadísticos de regresión del modelo alométrico para estimar el carbono almacenado en el fuste de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.

Proc	Parám	Coef	Error estándar	T	R	R ²	Sxy	CV	FC
MZ	a	-4.7971	0.02	-278.60	0.831	0.70	0.099	42.772	1.029
	b	2.4866	0.01	173.46					
SV	a	-4.7870	0.01	-395.08	0.996	0.99	0.042	18.297	1.011
	b	2.5138	0.01	243.79					
CO	a	-4.8863	0.02	-320.45	0.831	0.71	0.099	42.772	1.025
	b	2.4583	0.01	177.68					

Donde: Proc = procedencia; MZ = Mazapil; SV = Santa Victoria; CO = Concepción del Oro; Parám = parámetro; a y b = parámetros del modelo; Coef = coeficiente; T = estadístico de t; R = coeficiente de correlación; Sxy = error estándar (Kg); CV = coeficiente de variación (%); FC = factor de corrección.

El modelo alométrico (Ecuación 9) utilizado para estimar la captura de carbono en la biomasa de *Pinus cembroides* Zucc., a la edad de 21 años de ser establecida la plantación estima que un

árbol de la procedencia Mazapil con un diámetro a la base de 6.00 cm almacena un total de 0.71 kg árbol⁻¹ de C y ha acumulado 2.61 kg árbol⁻¹ de CO₂ en la biomasa del fuste (Figura 4A). Por otro lado un árbol de la procedencia Santa Victoria con el mismo diámetro a la base almacena 0.75 kg árbol⁻¹ de C y aproximadamente 2.76 kg de CO₂ en la biomasa del fuste (Figura 4B). Mientras que un árbol de la procedencia Concepción del Oro a un diámetro a la base de 6.00 cm ha acumulado 0.63 kg árbol⁻¹ de carbono y aproximadamente 2.31 kg árbol⁻¹ de CO₂ en la biomasa del fuste (Figura 4C).

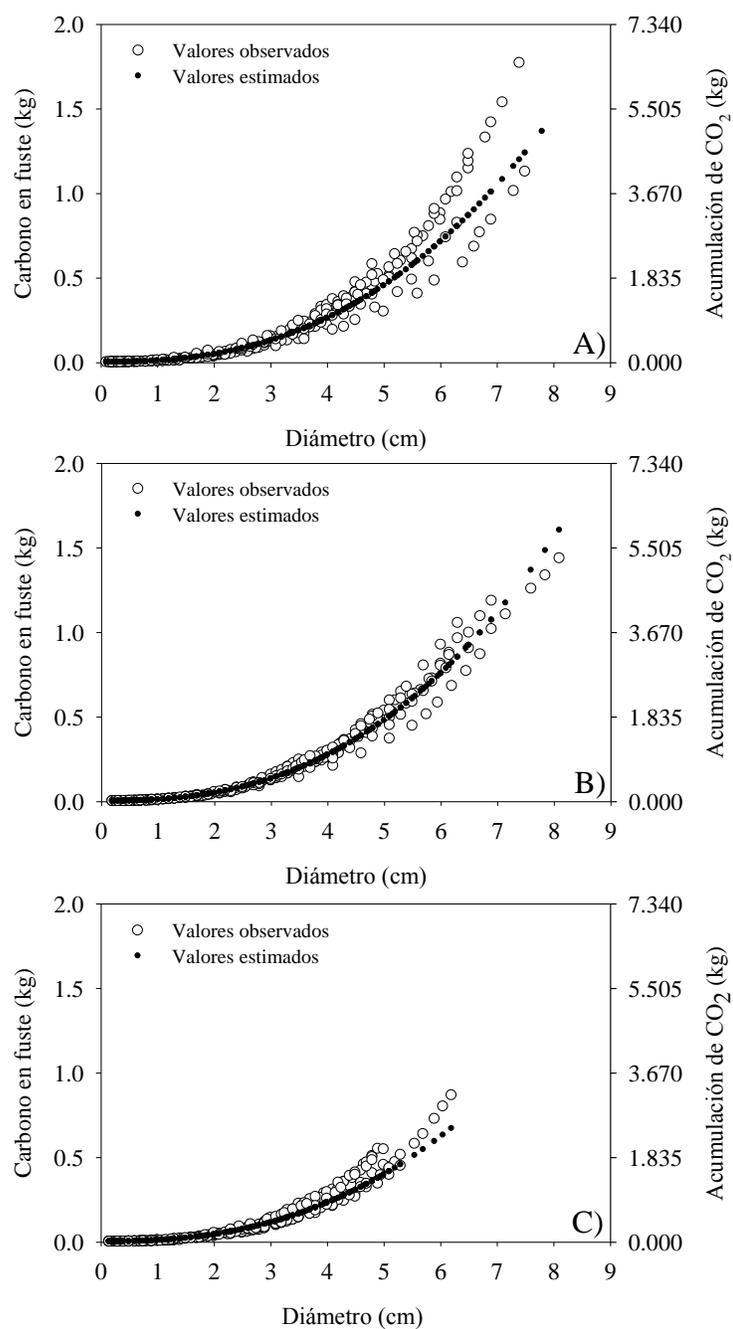


Figura 2. Cuantificación de carbono en tres procedencias de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México. Procedencias: A) Mazapil, B) Santa Victoria y C) Concepción del Oro.

Crecimiento e incremento en diámetro y altura de *Pinus cembroides* Zucc.

Para estimar el incremento máximo en diámetro de *Pinus cembroides* Zucc., se utilizó la derivada del modelo de Schumacher (Ecuación 6). Los valores de los coeficientes de determinación (R^2) presentaron poca variación entre procedencias, el valor máximo se obtuvo en la procedencia CO ($R^2 = 0.86$) y el menor corresponde a SV ($R^2 = 0.82$) (Cuadro 5).

Los valores de los parámetros que arrojó el modelo de Schumacher varían desde 2.13 en CO hasta 2.42 en MZ para β_0 y β_1 obtuvo valores desde -10.09 en SV hasta -12.48 en MZ. Se presentó el máximo error en la procedencia MZ con 0.79 cm y el menor en la procedencia CO con 0.58 cm, esta misma procedencia demostró tener menor variación (CV= 24.17 %), la máxima variación se presentó en la procedencia MZ (C.V = 28.09 %) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Estadísticos del modelo de Schumacher para estimar el crecimiento e incremento en diámetro de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.

Proc	Param	Coef	Error estándar	T	P	VIF	R^2	Sxy	CV
MZ	β_0	2.42	0.05	51.19	<0.0001	11.1497<	0.84	0.79	28.09
	β_1	-12.48	0.59	-21.22	<0.0001	11.1497<			
SV	β_0	2.22	0.04	55.70	<0.0001	8.9457<	0.82	0.78	26.15
	β_1	-10.09	0.49	-20.80	<0.0001	8.9457<			
CO	β_0	2.13	0.04	54.41	<0.0001	9.8639<	0.86	0.58	24.17
	β_1	-10.77	0.46	-23.22	<0.0001	9.8639<			

Donde: Proc = procedencia; MZ = Mazapil; SV = Santa Victoria; CO = Concepción del Oro; Param = parámetros; Coef = coeficiente; T = estadístico de t; VIF = factor de inflación de la

varianza; P = probabilidad; R^2 = coeficiente de determinación; S_{xy} = error estándar (cm); CV = coeficiente de variación (%).

Con una confiabilidad del 99 % se dice que un árbol de *Pinus cembroides* Zucc., de la procedencia MZ alcanzan su máximo incremento en diámetro a la edad de 6 años con un incremento de $0.4886 \text{ cm año}^{-1}$ y su turno absoluto se encuentra a la edad de 12 años; un árbol en las mismas condiciones naturales de la procedencia SV alcanza su máximo incremento a la edad de 5 años con un incremento de $0.4954 \text{ cm año}^{-1}$ y su turno es a la edad de 10 años; por otro lado un árbol de la procedencia CO en las mismas condiciones naturales alcanza su máximo crecimiento a la edad de 5 años con un incremento de $0.4237 \text{ cm año}^{-1}$ y su turno es a la edad de 10 años (Figura 3).

Se estimó el incremento máximo en altura de *Pinus cembroides* Zucc., a través de la derivada del modelo de Schumacher (Ecuación 6) los valores de los coeficientes de determinación son mayores en las procedencias MZ ($R^2 = 0.84$) y SV ($R^2 = 0.70$) y menor en la procedencia CO ($R^2 = 0.67$) (Cuadro 6). Los valores de los parámetros que arrojó el modelo varían desde 1.44 en CO hasta 2.03 en MZ para β_0 y β_1 obtuvo valores desde -14.94 (CO) hasta -21.01 (SV). El máximo error de regresión se presentó en la procedencia SV con 0.39 m y el menor en las procedencias MZ y CO con 0.35 m en ambas, esta última procedencia demostró tener mayor variación ($CV = 32.81 \%$) (Cuadro 6).

Con una confiabilidad del 99 % se dice que un árbol de *Pinus cembroides* Zucc., de la procedencia MZ alcanzan su máximo incremento en altura a la edad de 9 años con un incremento de $0.2335 \text{ m año}^{-1}$ y su turno absoluto ocurre a la edad de 17 años; un árbol en las mismas condiciones naturales de la procedencia SV alcanza su máximo incremento en altura a la edad de 15 años con un incremento de $0.1570 \text{ m año}^{-1}$ y su turno absoluto es a la edad de 21

años; por otro lado un árbol de la procedencia CO en las mismas condiciones naturales alcanza su máximo crecimiento en altura a la edad de 12 años con un incremento de $0.1286 \text{ m año}^{-1}$ y su turno es a la edad de 15 años (Figura 4).

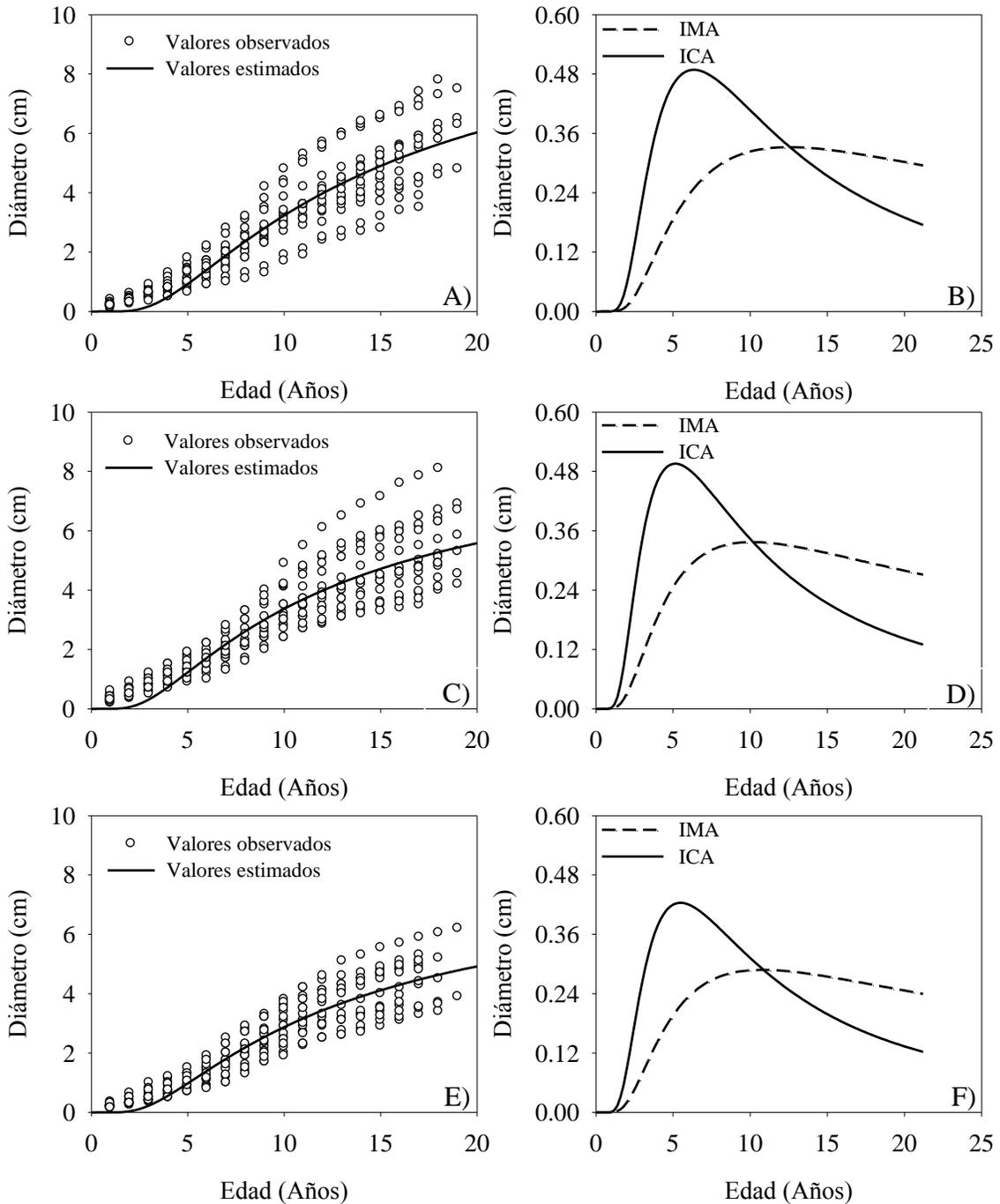


Figura 3. Crecimiento (A, C y E) e incremento medio anual en diámetro (B, D y F), en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México. Procedencia = Mazapil (A y B), Santa Victoria (C y D) y Concepción del Oro (E y F).

Cuadro 6. Estadísticos del modelo de Schumacher para estimar el crecimiento e incremento en altura de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, México.

Proc	Param	Coef	Error estándar	T	P	VIF	R ²	Sxy	CV
MZ	β_0	2.03	0.10	19.44	<0.0001	20.8100<	0.84	0.35	24.22
	β_1	-17.73	1.39	-12.78	<0.0001	20.8100<			
SV	β_0	1.81	0.15	11.68	<0.0001	20.3240<	0.70	0.39	32.13
	β_1	-21.01	2.37	-8.88	<0.0001	20.3240<			
CO	β_0	1.44	0.13	10.94	<0.0001	12.2645<	0.67	0.35	32.81
	β_1	-14.94	1.72	-8.67	<0.0001	12.2645<			

Donde: Proc = procedencia; MZ = Mazapil; SV = Santa Victoria; CO = Concepción del Oro; Param = parámetros; Coef = coeficiente; T = estadístico de t; VIF = VIF = factor de inflación de la varianza; P = probabilidad; R² = coeficiente de determinación; Sxy = error estándar (cm); CV = coeficiente de variación (%).

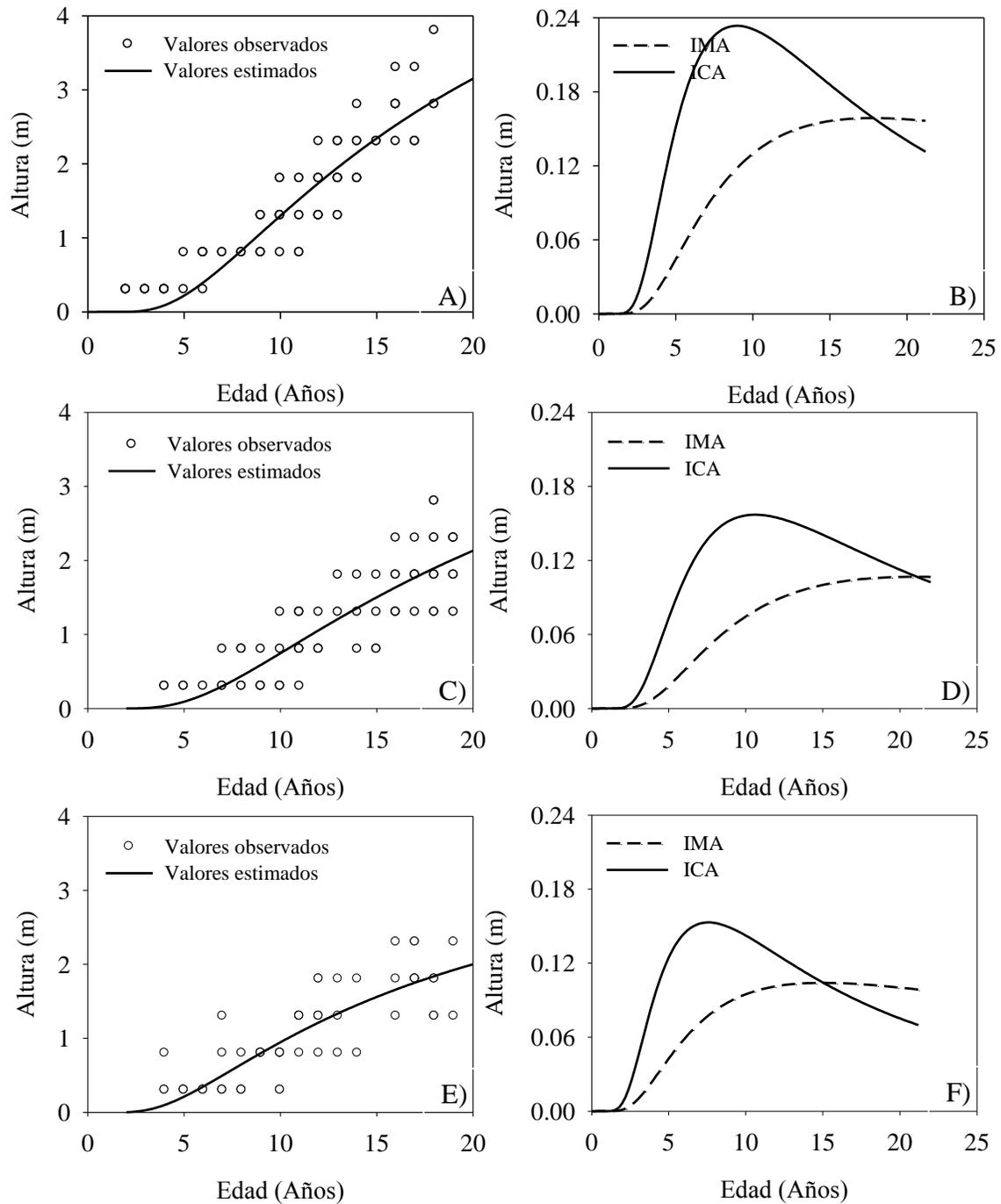


Figura 4. Crecimiento (A, C y E) e incremento medio anual en altura (B, D y F), en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., establecida en Arteaga, Coahuila, México. Procedencia = Mazapil (A y B), Santa Victoria (C y D) y Concepción del Oro (E y F).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los datos en los que mejor se ajustó el modelo de Schumacher para estimar la captura de carbono en fuste de *Pinus cembroides* Zucc., fue Concepción del Oro y Aunque los coeficientes de determinación no fueron altos es recomendable utilizar este modelo para estimar el crecimiento en biomasa y captura de carbono en esta especie.

Los árboles de *Pinus cembroides* Zucc., procedentes de Mazapil mostró tener mayor carbono almacenado y por ende ha producido mayor cantidad de oxígeno.

La producción de oxígeno por *Pinus cembroides* Zucc., es similar entre procedencias en los primeros años de establecida plantación; sin embargo conforme aumenta la edad existen diferencias significativas ($P > 0.001$), siendo los árboles procedentes de Mazapil los que producen mayor cantidad de oxígeno, por lo cual se rechaza la hipótesis planteada.

El modelo alométrico utilizado para estimar la captura de carbono obtuvo un mejor ajuste con el más alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.99$) en árboles de *Pinus cembroides* Zucc., en la procedencia Santa Victoria.

El mejor ajuste del modelo de Schumacher para estimar el incremento en diámetro corresponde a los árboles de *Pinus cembroides* Zucc., de la procedencia Concepción del Oro ($R^2 = 0.86$); en altura el máximo coeficiente fue para la procedencia Mazapil ($R^2 = 0.84$).

El turno absoluto en el diámetro de *Pinus cembroides* Zucc., es más longevo en la procedencia de Mazapil a la edad de 12 años, y en altura corresponde a la procedencia Santa Victoria a los 15 años.

Con los resultados obtenidos en este estudio es posible elaborar tablas de almacén de O₂, C y CO₂ para cada procedencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta M M, Carrillo A F (2008)** Método para medir la biomasa y el carbono en árboles mediante ecuaciones alométricas. 3^{ra} Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal Yucatán 2008. Pp 132.
- Acosta M M, Vargas H J, Velázquez M A, Etchevers B J D (2002)** Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36: 725-736.
- 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.
- 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.
- 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 F C (2011)** El cambio climático: Los aspectos científicos y económicos más relevantes. *Nómadas. Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas*. 32 (4).
- Gutiérrez V B, Gutiérrez V M, Gómez C M, Prieto-Ruíz J A, Sánchez M V, Reynoso S R, Jiménez C L A, INIFAP (2010)** Captura de carbono y biomasa en rodales naturales de *Pinus oocarpa* en Chiapas, México. 5^{ta} Reunión Nacional de Innovación Forestal Campeche 2010. Pp 100.

IPCC, (2013) “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M.Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Jiménez C C del R, Acosta M M y Carrillo A F (2010) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl. 5^{ta} Reunión Nacional de Innovación Forestal Campeche 2010.

Luna L A (2005) Los bosques tropicales ayudan a moderar el clima global. Revista forestal venezolana. 49(1), 97-100.

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

Masera O (1995) Carbon mitigation scenarios for Mexican forest: Methodological considerations and results. Interciencia. 20(6): 388-395.

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.

Narave F (1997) Flora de Veracruz. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México. 26 pp.

- 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.
- Nowak D, Hoehn R y Crane D (2007)** Oxygen Production by Urban Trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry* 2007. 33(3):220–226 pp.
- Pacheco E, F C, Aldrete A, Gómez G A, Fierros G A, Cetina A V M, y Vaquera H H (2007)** Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii Engelm.* *Rev. Fitotec. Méx.* 30: 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 Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 35 pp.
- Perry J y LeVan C M D (2003)** Air Purification in Closed Environments: Overview of Spacecraft Systems. U.S. Army Natrick Soldier Center.
- Pimienta de la T D de J, Domínguez C G, Aguirre C O, Hernández F J, Jiménez P J (2007)** Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosque.* 13(1), 35-46.
- Rodríguez L R, Jiménez P J, Aguirre C Ó A, Treviño G E J, 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, Cultura y Desarrollo Sustentable.* 5(3). pp. 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, y Ross C W (1978)** Plant Physiology. Wadsworth Publishing Company, Belmont, CA. 422 pp.
- SAS® Software Inc (1989)** Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. Versión 9.1, Cary, N.C.
- Schlegel B (2001)** Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Pp 13.
- Schlegel B, Gayoso J y Guerra J (2000)** Manual de procedimientos muestreos 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. 21 pp.
- Sierra R, Alia R, Prada M A (1992)** Distribución de biomasa aérea y crecimiento de un individuo de *Pinus pinaster* Ait. Rev. Montes. II Congreso Hispano-luso de Fisiología vegetal.
- Solís G S, Daniel M S, Hernández F J, Graciano L J J (2010)** Ecuaciones de biomasa y carbono en plantaciones forestales del género *Pinus* en la región de el Salto, Durango, México. 5^{ta} Reunión Nacional de Innovación Forestal Campeche, 2010.

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

Walker W, Baccini A, Nepstad M, Horning N, Knight D, Braun E, y Bausch A (2011)
Guía de Campo para la Estimación de Biomasa y Carbono Forestal. Versión 1.0.
Woods Hole Research Center, Falmouth, Massachusetts, USA.

Yerena Y J I, J Jiménez P, O A Aguirre C, E J Treviño G y E Alanís R (2012)
Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Rev. Mex. Ciencias Forestales*. 3(1):49-56.

Yolasigmaz H y Keles S (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.