



# UNIVERSIDAD VERACRUZANA

---

## INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FORESTALES

Estimación del contenido de carbono en la biomasa aérea del predio forestal Agua  
del Conejo, Acajete, Veracruz

TESIS

Para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA FORESTAL

Presenta:

ING. KARLA MARÍA JUÁREZ GABRIEL

DIRECTOR: Dr. Héctor Viveros Viveros

COORDIRECTOR: Dr. Miguel Acosta Mireles

Xalapa, Ver., 30 de enero de 2018

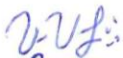




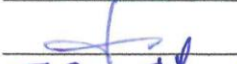

## ACTA DE VOTOS APROBATORIOS



**UNIVERSIDAD VERACRUZANA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FORESTALES  
MAESTRIA EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA FORESTAL**

Aprobación del documento final de tesis de grado: Estimación del contenido de carbono en la biomasa aérea del predio forestal Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

Realizada por el alumno Karla María Juárez Gabriel, bajo la dirección del Comité particular de tesis y aprobada por el Comité Revisor. Ha sido aceptada como requisito parcial para obtener el grado de: **Maestro en Ciencias en Ecología Forestal**.

	Nombre	Firma
<b>Director(a) de tesis</b>	Dr. Héctor Viveros Viveros	
<b>Codirector (a)</b>	Dr. Miguel Acosta Mireles	
<b>Asesores</b>	Dra. Beatriz del S. Bolívar Címé	
	Dr. Sergio Francisco Juárez Cerrillo	
<b>Comisión Revisora</b>	Dra. Yareni Perroni Ventura	
	Dr. Juan Elio González de la Torre	
	Dr. Fernando Carrillo Anzures	

Xalapa, Ver. Enero del 2018.

## DECLARACIÓN


---

### DECLARACIÓN

Excepto cuando es explícitamente indicado en el texto, el trabajo de investigación contenido en esta tesis fue efectuado por Karla María Juárez Gabriel como estudiante de la carrera de Maestra en Ciencias entre agosto de 2015 y julio de 2017, bajo la supervisión del Dr. Héctor Viveros Viveros y el Dr. Miguel Acosta Mireles.

Las investigaciones reportadas en esta tesis no han sido utilizadas anteriormente para obtener otros grados académicos, ni serán utilizadas para tales fines en el futuro.

Candidato:	Karla María Juárez Gabriel
Director y Co-	Dr. Héctor Viveros Viveros
Director de	
tesis:	Dr. Miguel Acosta Mireles



## AGRADECIMIENTOS

Al programa de postgrado del Instituto de Investigaciones Forestales, Universidad, Veracruzana; gracias por el apoyo recibido y por la oportunidad de realizar un postgrado y al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)*, por el financiamiento otorgado durante mis estudios.

A los copropietarios de Rancho Ecológico El Mirador, Dr. Luis Bello Estrada y Arturo Orozco Marthen, gracias por las facilidades otorgadas para la realización del trabajo en campo, su apoyo, cariño y por creer en este proyecto. A los trabajadores (Silvano, Marcos, Alberto y Martín) gracias por su ayuda.

Dr. Héctor Viveros Viveros, no alcanzaría esta cuartilla para agradecer todas esas horas, días, semana y meses que estuvo guiándome en entender conceptos, aclarar dudas; mil gracias por la paciencia y la ayuda en campo. Es un gran ser humano y excelente profesionalista. Dr. Miguel Acosta Mireles, gracias por todas sus enseñanzas, el apoyo en los trabajos de campo, el tiempo para asistir a los seminarios, por sus comentarios y sugerencias para enriquecer este trabajo. Dra. Beatriz Bolívar Cimé, gracias por sus palabras de ánimo cuando más lo necesitaba, por las veces que reviso este documento, el tiempo que me dedicó y sus observaciones. Dr. Sergio Juárez es un excelente estadístico y ser humano, me quedaba asombrada en la forma que resolvía mis dudas y la manera de trabajar. Gracias Drs. por el apoyo en estos años de estudio, llevo conmigo esos gratos momentos de trabajar con cada uno de ustedes.

Dra. Yareni Perroni Ventura, Dr. Juan Elio González de la Torre y Dr. Fernando Carrillo Anzures, agradezco el tiempo que tomó cada uno de ustedes para la revisión al documento, sus aportaciones fueron de gran importancia para mejorarlo.

¡Estimados Drs. gracias por el apoyo para asistir al Simposio internacional del Carbono!

## DEDICATORIAS

Dios, gracias por darme la vida y tener a mi lado a toda esta gente que me ama y cree en mí. A mis papás (Ofe y Teo), hermanos, sobrinos, comadre Erika; gracias por estar en mi vida y por el apoyo que recibí de cada uno de ustedes. (Gracias má por cuidar a mi pequeña cuando iba al instituto). A los Mundo Zamora (Reina, Nicolás, Adriana y Celia) gracias por todo el cariño que he recibido desde el primer día y ánimos.

¡Los quiero!

Mi gran amigo Víctor, siempre estaré agradecida por la ayuda que me diste y por recomendarme al Dr. Héctor. Fernanda, gracias por tú ayuda cuando fuimos a trabajar a campo (sé que sufriste). Te quiero mucho. Tere, gracias por esas horas de desvelo cuando estudiábamos juntas, eres una excelente amiga.

A mi familia Enrique y Lilian.

¡Mi querido Enriquito!, fuiste el primero en animarme a iniciar este proyecto, siempre escuché palabras de motivación y ánimo. Gracias corazón por ser paciente y aguantar mi ausencia. Pronto estaremos juntos.

Pequeña Lilian, eres el regalo más maravilloso que dios, la vida y tú papá pudieron darme, gracias por toda la ayuda en este último año; fuimos al Colpos a dejar las muestras, Campeche a nuestro curso, llegamos y directo al trabajo de campo, seguimos con el curso de Genética y por último la práctica, sé que no te di descanso y no te consentí, pero era necesario hacerlo. Gracias por enseñarme a ser una mujer fuerte y ser mamá, todas esas horas de desvelos valen la pena. Espero veas en mi un buen ejemplo a seguir y nunca digas que no se puede.

¡Para lograrlo, tienes que creerlo!

Y sí. Ya lo estoy creyendo.

Karla

## RESUMEN

En la actualidad la obtención de ecuaciones alométricas que relacionan el contenido de biomasa y carbono con variables dendrométricas tiene gran relevancia, dado que permiten estimaciones precisas y rápidas de biomasa y carbono en ecosistemas forestales. El objetivo de la presente investigación fue medir el almacenamiento de carbono en la biomasa de la parte aérea de la vegetación del área forestal del predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. Debido a la inexistencia de ecuaciones para estimar biomasa y carbono en *Pinus rudis* Endl. se ajustaron modelos basados en muestreos destructivos de 25 árboles, los cuales se seleccionaron de manera que representaran las diferentes categorías diamétricas de la especie en el predio. Antes de ser cortados los árboles, se les midió el diámetro normal (DN) y, una vez derribados la altura total (Alt) y el peso en campo para posteriormente determinar su biomasa. De cada árbol se obtuvieron muestras de fuste, ramas y follaje. En campo se determinó el peso fresco de las muestras. En laboratorio se obtuvo el peso seco de las muestras, después se estimó la biomasa individual de cada árbol, usando para ello la relación entre el peso seco y peso fresco de las mismas. Para determinar el carbono de los diferentes componentes se tomaron muestras de siete árboles y se analizaron en el laboratorio. Una vez obtenido el contenido de biomasa y carbono por individuo se ajustaron modelos no lineales para explicar la relación de la biomasa y carbono con el diámetro normal, altura total o ambas variables. Para estimar la biomasa y carbono aéreo total de todo el predio, se usaron las ecuaciones existentes para estimar la biomasa y el carbono de árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham. y *Pinus pseudostrobus* Lindl.. Además se estimó el contenido de biomasa y carbono de los estratos herbáceo y arbustivo. Las ecuaciones que tuvieron un mejor ajuste para determinar la biomasa en *P. rudis* fueron:  $B = 0.0860DN^{2.3399}$ ,  $B = 0.1174Alt^{2.7198}$  y  $B = 0.0584DN^{2.1790}Alt^{0.3343}$ , mientras que para el contenido de carbono fueron:  $CC = 0.0153DN^{2.5909}$  y  $CC = 0.01497exp^{0.51533Alt}$ . Los valores de biomasa y carbono total más bajos se presentaron en el bosque puro de *P. rudis* (64.66 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa y 27.45 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono); por el contrario, en el bosque mezclado de *P. patula* y *P. rudis* se

encontraron los valores más altos ( $148.79 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biomasa y  $70.89 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono). La menor cantidad de biomasa y carbono en el estrato herbáceo y arbustivo ( $6.03 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biomasa y  $3.02 \text{ Mg ha}^{-1}$  de carbono) se encontraron en el bosque mezclado de *P. patula* y *P. rudis*. La biomasa promedio por hectárea estimada para el predio fue de  $118.90 \text{ Mg ha}^{-1}$  y el contenido de carbono de  $56.48 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Estos resultados nos permitieron entender el estado en que se encuentran la biomasa y el contenido de carbono en las asociaciones vegetales presentes en la actualidad en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

Palabras clave: Almacén de carbono arbóreo, biomasa arbórea, ecuaciones alométricas, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*.

## ABSTRACT

Allometric equations are able to relate the content of biomass and carbon with plant dendrometric variables, which allow us to estimate quickly and accurately estimates of carbon in forest ecosystems. The objective of the present investigation was to measure the storage of carbon in the biomass of the aerial part of the vegetation in the forest area in Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. Due to the inexistence of equations to estimate biomass and carbon in *Pinus rudis* Endl., models based on destructive sampling of 25 trees were adjusted, by selecting them in a way that their represented the different diametric categories of the species in the farm. Before being cut, their normal diameter (DN) was measured and once they were cut down, then the total height (Alt) and the weight were measured in the field, next their biomass was determined. From each tree, samples were obtained of stem, branches and foliage. In the field, the fresh weight of the same samples was determined. The dry weigh of the samples was taken in the laboratory. Individual biomass of each tree was estimated by the relationship between the dry weight and the fresh weight of the samples. Seven sampled trees were analyzed in the laboratory to determine the carbon content of their components. Once the biomass and carbon content of the trees were obtained, non-linear models were adjusted to explain the relationship of biomass and carbon content with the normal diameter, total height or both variables. In order to estimate the biomass and total aerial carbon of all the farm, the existing equations were used to estimate the biomass and carbon content of *Pinus patula* Schl. et Cham. and *Pinus pseudostrobus* Lindl. trees. Furthermore, the biomass and carbon content of both the herbaceous and shrub layers were estimated. The equations that better fit to determine the biomass in *P. rudis* were:  $B = 0.0860 \cdot DN^{2.3399}$ ,  $B = 0.1174 \cdot Alt^{2.7198}$  and  $B = 0.0584 \cdot DN^{2.1790} \cdot Alt^{0.3343}$ , while for the carbon content were  $CC = 0.0153 \cdot DN^{2.5909}$  and  $CC = 0.01497 \cdot \exp^{0.51533Alt}$ . The lowest biomass and total carbon values were found in the pure forest of *P. rudis* (64.66 Mg ha<sup>-1</sup> of biomass and 27.45 Mg ha<sup>-1</sup> of carbon); whereas, in the mixed forest of *P. patula* and *P. rudis* the highest values were found (148.79 Mg ha<sup>-1</sup> of biomass and 70.89 Mg ha<sup>-1</sup>



of carbon). The lowest amount of biomass and carbon in the herbaceous and shrub layers ( $6.03 \text{ Mg ha}^{-1}$  of biomass and  $3.02 \text{ Mg ha}^{-1}$  of carbon) were found in the mixed forest of *P. patula* and *P. rudis*. The average biomass per hectare estimated for the farm was  $118.90 \text{ Mg ha}^{-1}$  and the carbon content was  $56.48 \text{ Mg ha}^{-1}$ . These results allowed us to understand the state of the biomass and the carbon content in the plant associations currently present in the Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

Key words: Arboreal carbon stock, tree biomass, allometric equations, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*.

## ÍNDICE

ACTA DE VOTOS APROBATORIOS.....	I
DECLARACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
DEDICATORIAS.....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT.....	VII
1.- INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	4
2.1 Ciclo del Carbono .....	4
2.2 Descripción e importancia de <i>Pinus rudis</i> Endl. ....	5
2.3 Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y contenido de carbono .....	6
2.4 Estimación del contenido de carbono en bosques y plantaciones en México ..	7
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	8
4. OBJETIVOS .....	8
4.1. Objetivo general.....	8
4.2. Objetivos específicos.....	8
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
5.1 Área de estudio.....	9
5.2 Estimación de la biomasa aérea y el contenido de carbono almacenados en la vegetación del predio Agua del Conejo .....	10
5.3 Estimación de la biomasa y el contenido de carbono en <i>Pinus rudis</i> .....	10
5.4 Obtención de las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el contenido de carbono en <i>Pinus rudis</i> .....	13
5.4.1 Ajuste de modelos para estimar la biomasa de árboles de <i>Pinus rudis</i> ..	13
5.4.2 Ajuste de modelos para estimar el carbono de árboles de <i>Pinus rudis</i> ..	14
5.5 Estimación de la biomasa y contenido de carbono almacenado en la vegetación del predio Agua del Conejo .....	14
6. RESULTADOS .....	18
6.1. Biomasa individual para árboles de <i>Pinus rudis</i> .....	18

6.2. Ecuaciones de biomasa para <i>Pinus rudis</i> .....	18
6.3 Contenido de carbono en árboles individuales de <i>Pinus rudis</i> .....	24
6.4 Ecuaciones para estimar el contenido de carbono en <i>Pinus rudis</i> .....	24
6.5 Biomasa total y por estrato arbóreo en el predio Agua del Conejo .....	27
6.5.1 Biomasa por rodales .....	27
6.5.2 Biomasa por tipo de asociación de especie .....	28
6.5.3 Biomasa por especies arbórea .....	28
6.6 Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea y por estrato en el predio Agua del Conejo .....	29
6.6.1 Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por rodales .....	29
6.6.2 Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por tipo de asociación de especies .....	30
6.6.3 Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por especies arbóreas .....	30
7. DISCUSIÓN.....	32
7.1 Biomasa individual para árboles de <i>Pinus rudis</i> .....	32
7.2 Ecuaciones de biomasa para <i>Pinus rudis</i> .....	33
7.3 Contenido de carbono en árboles individuales de <i>Pinus rudis</i> .....	34
7.4 Ecuaciones para estimar el contenido de carbono en <i>Pinus rudis</i> .....	35
7.5 Biomasa total y contenido de carbono almacenado en la parte aérea de plantas en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz .....	35
8. CONCLUSIONES.....	39
9. REFERENCIAS .....	40
10. ANEXOS.....	49

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tipos de vegetación y superficie total en hectáreas del predio Agua del Conejo.....	9
Cuadro 2. Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa y el carbono de las especies arbóreas en el predio Agua del Conejo. ....	15
Cuadro 3. Diámetro normal, altura total y distribución de la biomasa por componente estructurales en árboles de <i>Pinus rudis</i> en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. ....	18
Cuadro 4. Porcentaje de biomasa en los componentes estructurales de <i>Pinus rudis</i> . ....	20
Cuadro 5. Porcentaje de carbono promedio por componente estructural en <i>Pinus rudis</i> . ....	24
Cuadro 6. Densidad del arbolado, área basal, diámetro normal promedio y la biomasa por rodal en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.....	27
Cuadro 7. Densidad del arbolado, área basal, diámetro normal promedio y biomasa por asociación vegetativa en el predio Agua del Conejo, Acajete Veracruz. ....	28
Cuadro 8. Densidad del arbolado, área basal, diámetro normal promedio y biomasa de especies en el predio Agua del Conejo, Acajete Veracruz. ....	29
Cuadro 9. Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por rodal en el predio Agua del Conejo, Acajete Veracruz. ....	30
Cuadro 10. Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por asociación vegetativa en el predio Agua del Conejo, Acajete Veracruz. ....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación de la biomasa total con el diámetro normal de árboles de <i>Pinus rudis</i> en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. ....	19
Figura 2. Relación de la biomasa total con la altura total de árboles de <i>Pinus rudis</i> en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. ....	21
Figura 3. Relación de la biomasa total con el diámetro normal y la altura total de árboles de <i>Pinus rudis</i> en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. ....	22
Figura 4. Relación entre el contenido de carbono (CC) y diámetro normal en árboles de <i>Pinus rudis</i> en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. ....	24
Figura 5. Relación entre el contenido de carbono (CC) y la altura total en árboles de <i>Pinus rudis</i> en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. ....	26

## 1.- INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el gas de origen antropogénico más abundante en la atmósfera y contribuye con un 76% al calentamiento global, una forma de mitigar sus efectos es almacenarlo en la biomasa de las plantas (Ávila *et al.*, 2001).

Mediante el proceso de fotosíntesis, la vegetación fija  $\text{CO}_2$  atmosférico incorporándolo a sus procesos metabólicos. El carbono (C) del  $\text{CO}_2$  participa en la composición de todas las estructuras necesarias (follaje, ramas, raíces y tronco) para que el árbol pueda desarrollarse; de esta manera ganan volumen e incrementan su biomasa (Díaz-Franco *et al.*, 2007; Figueroa, 2010). El C que se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y antes de que sea liberado nuevamente a la atmósfera se considera almacenado (Ordóñez, 2008).

Por lo anterior, el crecimiento y desarrollo de los bosques cumplen un papel importante como sumidero de C y en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) (Sedjo, 1990). Ya que entre el 27 y 30 % de la superficie del planeta está cubierta por bosques, los cuales almacenan el 45 % del carbono terrestre. Se ha estimado que al año capturan alrededor del 30 % de todas las emisiones de  $\text{CO}_2$  (Pardos, 2010; Pan *et al.*, 2011; Vázquez, 2013).

El primer paso para evaluar la productividad de los ecosistemas y la contribución de los bosques en el ciclo global del carbono es el cálculo de la biomasa (Parresol, 1999; Ketterings *et al.*, 2001; Castañeda-Mendoza *et al.*, 2005). En este sentido, la biomasa representa la cantidad de material acumulado en las plantas en la parte aérea y subterránea del ecosistema (Castellanos, 1993; Figueroa, 2010). La biomasa aérea es el material total almacenado en el fuste, ramas vivas y muertas, follaje, corteza, estructuras reproductivas expresadas en peso seco (Návar, 2009).

A partir de la biomasa se puede calcular la concentración de carbono en la vegetación, incorporando el carbono atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis. Es válido utilizar el valor del 50 % de la biomasa como componente de carbono (FAO, 2007). Por lo que la estimación de la biomasa se puede emplear para comparar la estructura funcional del ecosistema forestal en un intervalo de condiciones climáticas similares (Schroeder *et al.*, 1997).

La variación de la biomasa y el potencial de secuestro de carbono en un sistema forestal dependerá del contenido inicial en carbono orgánico, tasas de crecimiento, edad del rodal y del sitio (Pardos, 2010).

Para la estimación de biomasa y carbono almacenado en ecosistemas forestales se han desarrollado métodos directos e indirectos. Los primeros consisten en un análisis destructivo midiendo el peso fresco y el peso seco de cada uno de los componentes de los árboles seleccionados, después de pesar y medir variables de cada uno de los árboles y los segundos a través de ecuaciones y ajustes de modelos matemáticos obtenidos por análisis de regresión a partir de variables individuales (Brown, 1997).

Las ecuaciones alométricas son modelos matemáticos que relacionan la biomasa permitiendo estimar volumen o carbono de un individuo (Morfin *et al.*, 2015). Estas ecuaciones utilizan variables fáciles de medir del árbol que pueden formar parte del modelo tales como el diámetro normal, altura total y comercial, crecimiento diamétrico y área basal (Francis, 2000).

La importancia de generar ecuaciones de biomasa es que permiten evaluar la estructura y condición de un bosque, cuantificar su productividad, determinar la cantidad de carbono fijado, la tasa de fijación de CO<sub>2</sub>, y con ello valorar el impacto en la mitigación de gases efecto invernadero (Méndez-González *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2013). Los modelos alométricos de biomasa para árboles individuales son típicamente específicos para las condiciones de sitio, manejo y especie (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011).

Estas ecuaciones mejoran su predicción cuando se consideran al mismo tiempo las variables diámetro y la altura. La medición de alturas no es muy práctica, debido a que para realizar su medición toma mucho tiempo. En algunas condiciones de bosques, donde las coberturas son cerradas, se dificultan identificar las puntas de los árboles, sobre todo cuando las mediciones se hacen en forma indirecta (Griert and Logan, 1978; Brown, 2001; Acosta-Mireles *et al.*, 2002).

En México el uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa es restringido para la mayoría de las especies arbóreas. Lo anterior debido a la escasa disponibilidad de ellas para estimar el contenido de carbono (Cruz, 2007; Pimienta *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009). Además, la cuantificación de la biomasa y el crecimiento de la vegetación en los ecosistemas son críticos para las estimaciones de fijación de carbono, un tema actualmente relevante por sus implicaciones en relación al cambio climático (Snowdon *et al.*, 2001).



## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 Ciclo del Carbono**

El carbono es un componente básico de todos los compuestos orgánicos y se relaciona con la fijación de energía por medio de la fotosíntesis (Smith y Smith, 2001).

La dinámica de los ecosistemas terrestres depende de las interacciones entre diversos ciclos biogeoquímicos, particularmente el ciclo del carbono (C), fertilidad del suelo a través de los ciclos de nutrientes y el ciclo hidrológico, los cuales pueden resultar modificados por actividades antropogénicas (IPCC, 2007).

Los principales almacenes de carbono se encuentran en los océanos, suelo, biomasa vegetal y la atmósfera. El ciclo del carbono se define como el flujo de éste, en sus distintas formas, entre la superficie terrestre, su interior y la atmósfera (Ciesla, 1996).

A nivel mundial los principales cambios que se esperan hacia finales del siglo XXI, de acuerdo con las predicciones hechas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001, 2007) se pueden resumir en los siguientes hechos: aumento al doble de la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico, aumento de la temperatura media global de 1.50 a 4.50 °C, incremento global en la precipitación de 3 a 5 % y elevación media del nivel del mar en unos 45 cm. Para el crecimiento de los bosques serán cambios clave el aumento de temperatura en altitudes elevadas y disminución de las precipitaciones en altitudes bajas. Como consecuencia estos cambios ocasionarán la disminución en la humedad del suelo, reducción del crecimiento y aumento de la presencia de incendios forestales, por consiguiente, la pérdida de cubierta forestal (Pardos, 2010).

Los bosques juegan un papel primordial en el ciclo de carbono al absorber y retener CO<sub>2</sub> atmosférico, el cual en parte fluye de nuevo a la atmósfera en los procesos de respiración autótrofa y heterótrofa (Pardos, 2010), el almacenamiento de C ocurre en los tejidos de las plantas a través del incremento de la biomasa forestal (Sedjo, 1990).

El primer paso para evaluar la contribución de los bosques en el ciclo global del carbono es el cálculo de la biomasa (Parresol, 1999; Ketterings *et al.*, 2001; Castañeda-Mendoza *et al.*, 2005). A partir de la biomasa se puede calcular la concentración de carbono en la vegetación, en términos generales se estima que aproximadamente el 50 % de la biomasa es carbono (FAO, 2007).

## **2.2 Descripción e importancia de *Pinus rudis* Endl.**

*Pinus rudis* Endl. es una especie que alcanza una altura de 8 a 30 m y un diámetro normal de 40 a 70 cm. Las ramas superiores de esta especie son ascendentes formando una copa espesa y redondeada. Las ramas bajas son perpendiculares al fuste. Su corteza es gruesa de color claro marrón grisáceo, dividida en placas escamosas por las fisuras horizontales y verticales; en los árboles jóvenes, es rugosa y escamosa aunque no es clara. Las hojas se encuentran generalmente en fascículos de cinco, raramente cuatro o seis; son gruesas, rígidas y erectas, ligeramente curvadas de 10 - 15 cm de largo, aunque en su mayoría de unos 14 cm. Los conos son largo-ovoides, casi simétricos y ligeramente curvados. Estos casi siempre son erectos y de 10-15 cm de largo, aunque la mayoría son de 12 cm. El color de los conos es marrón oscuro a casi morado-marrón. A los conos se les puede encontrar en parejas o en grupos de tres y cuatro pedúnculos gruesos y cortos (de 10 mm). Estos permanecen unidos a las ramitas cuando el cono se cae. Los conos se abren en la madurez durante los meses de invierno y son semi-persistentes. Las semillas son pequeñas, oscuras, de unos 5 mm de largo, con un ala estrecha articulada (Eguiluz, 1978; Perry, 1991). La madera de *P. rudis* se emplea en la industria de la pulpa para papel y de aserrío, en algunas regiones la madera se usa para muebles, durmientes, cercas y leña (Eguiluz, 1978). El clima

donde se establece es templado frío (Caballero, 1967), se encuentra bien representado en pendientes inclinadas (Perry, 1991). *P. rudis* es una de las especies que alcanzan las últimas asociaciones arbóreas, cerca de los límites máximos altitudinales (Eguiluz, 1978).

### **2.3 Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y contenido de carbono**

En varias partes del mundo se han realizado estudios para determinar los parámetros de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea contenida en especies forestales (Gaillard *et al.*, 2002). En nuestro país se han generado estas ecuaciones para algunas especies arbóreas latifoliadas, como es el caso de las ecuaciones para calcular la biomasa aérea utilizando diámetro normal y altura en *Clethra hartwegii* Britt., *Rapanea myricoides* (Schl.) Lundell., *Alnus glabrata* Fernald., *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Inga sp.* y *Quercus peduncularis* Née., en Oaxaca, México (Acosta-Mireles *et al.*, 2002). Así como ecuaciones para estimar biomasa y carbono utilizando diámetro normal en cuatro especies leñosas neotropicales, *Guazuma ulmifolia* Lam., *Trichospermum mexicanum* (DC.) K. Schum., *Inga vera* Willd. y *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb. en La Selva Lacandona, México (Douterlungne *et al.*, 2013).

En coníferas, también se han generado ecuaciones para biomasa y carbono, utilizando el diámetro normal, por ejemplo, para *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl. et Cham. en un bosque natural de clima templado frío en Tlaxcala, México (Avendaño *et al.*, 2009); también para *Pinus patula* Schl. et Cham. en áreas reforestadas en Xiacuí, Ixtlán Oaxaca (Pacheco, 2011) y *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl, Texcoco, México (Vigil, 2010) en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México (Méndez-González *et al.*, 2011), en este último caso utilizando el diámetro normal y la altura. Además se han generado, ecuaciones para estimar componentes de biomasa de *Pinus durangensis* Ehre., *Pinus cooperi* Blanco, *Pinus arizonica* Engelm. y *Pinus engelmannii* Carr. en plantaciones forestales de Durango, México, utilizando el diámetro basal, altura total, altura de fuste limpio y proyección vertical

de la copa (Návar *et al.*, 2001). (En los anexos 1 y 2 se resumen las ecuaciones existentes para estimar la biomasa y carbono de las especies en México).

## **2.4 Estimación del contenido de carbono en bosques y plantaciones en México**

También se han realizado estudios para determinar la captura de carbono total en predios bajo diferentes condiciones de vegetación. Por ejemplo, los estudios realizados para determinar el carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham en Tlaxco, Tlaxcala (Díaz-Franco *et al.*, 2007). Otro ejemplo es el estudio realizado para estimar el carbono almacenado en vegetación natural e inducida en bosques de *Alnus* spp., *Liquidambar* spp., *Quercus* spp., acahuales y praderas en terrenos de ladera en Oaxaca, México (Acosta *et al.*, 2001). También se estimó el contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México (Galeana-Pizaña *et al.*, 2013). Esto mismo se realizó en bosques del sur de Nuevo León (Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011) y en una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. en Hidalgo (Pacheco *et al.*, 2007). Finalmente también se estimó el contenido de carbono en el sotobosque de plantaciones jóvenes de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden. y *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake y en pastizales aledaños en fronteras de Oaxaca y Veracruz, México (Fierros-González y Gómez-Guerrero, 2014).

### **3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cuál es la cantidad de carbono aéreo almacenado en la vegetación del predio forestal Agua del Conejo?

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1. Objetivo general**

Estimar el almacenamiento de carbono en la biomasa aérea del área forestal del predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

#### **4.2. Objetivos específicos**

- Generar ecuaciones alométricas de biomasa y carbono para *Pinus rudis* Endl., utilizando diámetro normal y/o altura.
- Estimar el contenido de biomasa total y carbono almacenado en los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo del predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el predio denominado Agua del Conejo, ubicado en la congregación de Mazatepec, municipio de Acajete, Veracruz, cuya altitud es de 2,987 m y se ubica geográficamente en los 19° 32'38.3" de latitud N y 97°05'29.1" de longitud O (INEGI, 2015). El clima que predomina es templado húmedo semi-frío C(m)b con verano fresco largo, temperatura del mes más cálido entre 6.5 y 22°C, el sustrato edáfico está representado por suelos de tipo Andosol húmico (Th) y Andosol Ortico (To) con textura media (Romero, 2011).

En el Cuadro 1 se presentan las asociaciones arbóreas presentes en el predio.

**Cuadro 1. Tipos de vegetación y superficie total en hectáreas del predio Agua del Conejo.**

Asociación arbórea	Superficie (ha)
<i>Pinus rudis</i>	4.0982
<i>Pinus rudis- Pinus patula</i>	16.7152
<i>Pinus patula- Pinus pseudostrobus</i>	4.1369
<b>Total</b>	24.9503

El estrato arbustivo está conformado por las especies: *Crataegus mexicana* Moc Sessé, *Baccharis conferta* Kunth, *Senecio salignus* DC y *Prunus capulí*; el estrato herbáceo por *Lupinus campestri* Cham et Schltdl, *Acaena elongata* L, *Agrostis setifolia*, *Fragaria mexicana* L, *Galium mexicanum* Kunth, *Alchemilla procumbens* Rose, *Arenaria lanuginosa* (Michx) Rohrb, *Cirsium sp.* *Conopholis mexicana*, *Daucus montanus* Humb et Bonpl ex Schult, *Desmodium pinetorum*, *Desmonium neomexicanum*, *Digitalis purpurea* L, *Didymaea mexicana* Hook. F, *Drymaria gracilis* Cham Schltdl, *Eryngium monocephalum* Cav y *Eupatorium ligustrinum* DC (Romero, 2011).

## **5.2 Estimación de la biomasa aérea y el contenido de carbono almacenados en la vegetación del predio Agua del Conejo**

Para estimar la biomasa y el contenido de carbono de la vegetación presente en el predio; se midieron los estratos arbóreo, herbáceo y arbustivo, en el caso de la estimación de la biomasa y del contenido de carbono en el estrato arbóreo fue necesario generar o utilizar ecuaciones alométricas existentes para las especies presentes en el predio. Por ejemplo para *P. rudis* no existían ecuaciones por lo que fue necesario primero obtener las ecuaciones para esta especie. A continuación, se describe la metodología empleada para este caso. Para la estimación de la biomasa y el contenido de carbono de los estratos herbáceo y arbustivo más adelante se describirá la metodología seguida.

## **5.3 Estimación de la biomasa y el contenido de carbono en *Pinus rudis***

Primero se determinó la biomasa por componente estructural (fuste, follaje-ramillas y ramas) y total de la especie, posteriormente el contenido de carbono para cada uno de ellos.

Para la determinación de la biomasa por componente estructural se utilizó el método destructivo sugerido por Acosta-Mireles *et al.* (2002); Avendaño *et al.* (2009); Carrillo *et al.* (2014); Díaz-Franco *et al.* (2007), siguiendo un muestreo dirigido. Para el presente caso se seleccionaron 25 árboles de diferentes categorías diamétricas procurando que fueran representativos de las diferentes categorías diamétricas presentes en el predio y que no presentaran daños físicos o estuvieran enfermos.

Antes de derribar los árboles, se les midió el diámetro normal (DN) con una cinta diamétrica Forestry Suppliers Inc, longitud de 10 m. Una vez derribados, se midió la altura de fuste limpio y la altura total, el fuste se seccionó en trozas de dimensiones comerciales de 2.55 y 1.25 m, antes de cortar cada troza, se obtuvo una rodaja por troza de aproximadamente 5 cm de grosor; por ejemplo una rodaja

de la primera troza (parte inferior del fuste), otra de la siguiente troza y así sucesivamente hasta la última troza del fuste. La copa del árbol se seccionó en dos o tres partes iguales con la finalidad de facilitar la separación de los componentes estructurales de ramas gruesas y follaje junto con ramillas. Una vez realizada la separación, de cada árbol se obtuvieron de dos a tres muestras de follaje con ramillas y ramas. En campo, se obtuvo el peso fresco de cada componente del árbol (trozas, ramas y follaje-ramillas), utilizando una báscula marca Jderna con capacidad de 200 kg y una estructura como soporte con capacidad de 200 kg. De igual manera, todas las muestras de rodajas, follaje-ramillas y ramas se pesaron en campo y etiquetaron utilizando una báscula marca THOR con capacidad de 20 kg con una precisión de 0.25 g.

Todas las muestras de rodajas, ramas y follaje-ramillas se trasladaron a un invernadero provisional ubicado en la localidad de Jilotepec, Veracruz, para su secado. Semanalmente se registraba el peso de cada muestra hasta alcanzar un peso constante, después de obtener el pesos de cada muestra en el invernadero, se tomaron submuestras de aproximadamente 50 g, las cuales se pesaron en una balanza digital marca OHAUS CS 5000 con capacidad de 5 kg con una precisión de 0.001 g y se colocaron en bolsas de papel previamente etiquetadas. Las submuestras se llevaron al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Veracruzana y se pusieron en una estufa marca BOEDEL Scientific Modelo 107800 a 60 °C durante 72 hrs o hasta obtener un peso constante para secarlas en su totalidad y registrar su peso nuevamente. Con el peso registrado en campo y el peso seco de las muestras y submuestras se obtuvo el porcentaje de humedad y el factor de la relación peso seco: peso fresco de la muestra tomada de cada componente del árbol. De esta manera y realizando los cálculos necesarios se garantizó medir la cantidad de humedad que tenía cada componente del árbol y que al descontarla proporciona la obtención exacta de la cantidad de biomasa por árbol.

La biomasa de cada componente se obtuvo multiplicando el peso fresco por el porcentaje resultante de la relación peso seco: peso fresco (Díaz-Franco *et al.*,



2007; Lim *et al.*, 2013). La biomasa total de cada árbol fue el resultado de la suma de la biomasa de los componentes estructurales (fuste, ramas, follaje-ramillas) (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2013).

Una vez obtenida la biomasa de los 25 árboles seleccionados se eligieron siete de ellos para determinar el porcentaje de carbono por cada uno de sus componentes. La selección de estos árboles fue empleando un modelo lineal, donde la variable independiente fue el diámetro normal y la variable dependiente fue el logaritmo de la biomasa de las rodajas. Se utilizaron bandas de predicción del modelo lineal para predecir los valores máximos y mínimos del logaritmo de la biomasa por cada valor del diámetro, eliminando diámetros hasta obtener una banda más ajustada a los valores predichos (Ferrari y Head, 2010). Los análisis estadísticos fueron desarrollados en el paquete estadístico R i386 3.2.2.

De esta manera se eligieron datos de 15 muestras de ramas, 15 de follaje y 24 muestras de rodajas haciendo un total de 54 muestras de los siete árboles seleccionados. Las 54 submuestras fueron procesadas conforme a la metodología descrita por Acosta (2003). Cada submuestra de rodajas, ramas y follaje-ramillas se astillaron, molieron y tamizaron por una malla 30 mm. Posteriormente en el laboratorio de fertilidad de suelos y química ambiental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo nuevamente se secaron en una estufa de secado a 70°C por 24 horas. Se determinó la concentración de carbono total (Ct) de cada submuestra por medio de la digestión seca a 900°C, en el autodeterminador automático de C, modelo TOC SSM 5050A Shimadzu.

Para determinar el contenido de carbono de los componentes estructurales de los árboles, se multiplicó la biomasa de cada componente (fuste, ramas y follaje-ramillas) por el promedio del porcentaje del contenido de carbono obtenido en el laboratorio:

$$CCC = BTC * \%C$$

donde: CCC es el contenido de carbono por componente (fuste, ramas y follaje-ramillas; expresado en kg), BTC es la biomasa total del componente de cada árbol en kg y %C es el porcentaje de carbono del componente determinado por el laboratorio.

La suma del contenido de carbono de los componentes del árbol corresponde al carbono total de la biomasa aérea del árbol.

## **5.4 Obtención de las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el contenido de carbono en *Pinus rudis***

### **5.4.1 Ajuste de modelos para estimar la biomasa de árboles de *Pinus rudis***

Para ajustar modelos alométricos a partir de variables de fácil medición como el diámetro normal y altura total del árbol para determinar la biomasa, se utilizan modelos matemáticos de regresión. En el modelo, la predicción es el valor de las variables de respuesta predichas dadas las variables explicativas (Picard *et al.*, 2012).

Se realizaron gráficas de dispersión de puntos con coordenadas correspondientes a dos variables, en el eje de las X la variable explicativa (diámetro normal y/o altura total) y en el eje Y la variable dependiente (biomasa). Una vez observado el comportamiento de los datos, se probaron modelos lineales y no lineales de potencia por mínimos cuadrados a partir de variables como el diámetro normal (DN) y/o altura total del árbol (Alt) y se estimaron los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  (Picard *et al.*, 2012). El ajuste se comprobó de manera visual, a través de las gráficas realizadas, las cuales se realizaron con árboles de 7.2 a 42.2 cm de diámetro normal y 4.85 a 19 m de altura total. Un criterio importante para la toma de decisiones para incluir más variables es el costo que representa en campo y la dificultad de medidas, pero en ocasiones el incluir más variables no justifica la mejoría en el ajuste del modelo.

#### **5.4.2 Ajuste de modelos para estimar el carbono de árboles de *Pinus rudis***

Una vez obtenidos los porcentajes del contenido de carbono de los árboles seleccionados se ajustaron modelos no lineales por mínimos cuadrados, para la variable explicativa de DN se ajustó un modelo de potencia y para la altura total un modelo exponencial o de Maltus, se estimaron los coeficientes  $\beta_0$  y  $\beta_1$  a partir del conjunto de datos del contenido de carbono (Picard *et al.*, 2012). Todos los ajustes de los modelos se realizaron con el paquete estadístico R i386 3.2.2.

#### **5.5 Estimación de la biomasa y contenido de carbono almacenado en la vegetación del predio Agua del Conejo**

Para medir la biomasa total y el carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles por rodal, asociación vegetativa y especies presentes en el predio Agua del Conejo, fue necesario realizar un muestreo en campo. La selección de los sitios de muestreo se realizó a través de la metodología de aceptación y rechazo de integración numérica simulada Montecarlo, la cual consiste en realizar un análisis numérico que se basa en el uso de secuencias de puntos aleatorios para muestrear los valores de las variables (León, 2013), eligiendo los diferentes sitios de acuerdo a la composición arbórea en el lugar de estudio, todo esto con el paquete estadístico R i386 3.2.2.

Para determinar la biomasa y el contenido de carbono aéreo en el área de estudio se establecieron doce sitios circulares de 500 m<sup>2</sup> con un radio de 12.62 m, tres por rodal. Cada sitio fue georeferenciado con un GPS marca etrex GARMIN LEGEND HCx, se midió el diámetro normal de todos los árboles con diámetros normales superiores a 7.5 cm con una cinta diamétrica marca Forestry Supplies Inc, longitud de 10 m y la altura total del árbol con un clinómetro eléctrico marca Haglof metros/grados (1-CSE).

Con los datos obtenidos y las ecuaciones alométricas para cada especie arbórea, se calculó la biomasa y carbono de cada rodal, asociación vegetativa y especies. La metodología empleada es una variación de la propuesta por Kotto-Same *et al.* (1997) y Monreal *et al.* (2005).

Se estimó el área basal para los sitios de con la siguiente fórmula:

$$AB = 0.7854 (DN)^2$$

donde: AB es igual al área basal en m<sup>2</sup>/ha, 0.7854 constante obtenida de dividir  $\pi/4$  y DN es el diámetro normal (cm). Se obtuvo el promedio del área basal para cada rodal.

Empleando los datos de diámetro normal y altura total obtenidos del muestreo, se utilizaron las ecuaciones obtenidas en el presente trabajo para estimar la biomasa y el carbono aéreo para *P. rudis*. Mientras que para *P. patula* se utilizaron las ecuaciones generadas por Díaz-Franco *et al.* (2007). Para estimar la biomasa de *P. pseudostrobus* se utilizó la ecuación proporcionada por Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011). Como no existía una ecuación para estimar carbono en la especie, se tomaron los datos de diámetro normal y el contenido de carbono reportado por Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011). Con ellos se ajustó un modelo que permitiera obtener la estimación del contenido de carbono en la especie (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar la biomasa y el carbono de las especies arbóreas en el predio Agua del Conejo.**

Especie	Ecuación biomasa	Ecuación carbono	Autor
<i>Pinus rudis</i>	$B = \beta_0 * DN^{\beta_1}$	$CC = \beta_0 * DN^{\beta_1}$	Presente estudio
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.0357 * DN^{2.6916}$	$CC = 0.021 * DN^{2.6451}$	Díaz-Franco <i>et al.</i> 2007
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.35179 * DN^2$	$CC = - 0.001708 + 0.177127 * DN^2$	Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011)

Para estimar la biomasa total y el contenido de carbono en el estrato arbóreo de los rodales, primero se determinó la biomasa individual de cada árbol en cada sitio de muestreo. En seguida, se estimó el promedio de la biomasa y carbono por árbol ( $\bar{Y}$ ), posteriormente se extrapoló el número de árboles presentes en los tres sitios de muestreo de cada rodal a una hectárea (densidad del arbolado por hectárea, N). Por último, la biomasa y el contenido de carbono en el estrato arbóreo por hectárea ( $\widehat{B}$ ) se obtuvieron con la siguiente fórmula:

$$\widehat{B} = N \bar{Y}$$

Para determinar la biomasa y el contenido de carbono del estrato herbáceo y arbustivo en cada uno de los sitios de muestreo, con la ayuda de una brújula marca SUUNTO MC-1, se ubicaron cuatro cuadros de 1 x 1 m<sup>2</sup> dirigido hacia cuatro puntos cardinales (el primero se ubicó al noreste, segundo al sureste, tercero al suroeste y por último al noreste) recolectando en cada uno todo el material vegetativo presente en ellos.

Las muestras se trasladaron a un invernadero ubicado en el Instituto de Investigaciones Forestales de la Universidad Veracruzana, registrando su peso cada semana hasta obtener un peso seco constante, posteriormente se tomaron submuestras de aproximadamente 30 g las cuales se pesaron en una balanza digital marca OHAUS CS 5000 con capacidad de 5 kg con una precisión de 0.001 g y se colocaron en bolsas de papel previamente etiquetadas. Las submuestras se llevaron al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas Universidad, Veracruzana para su secado, en un horno de secado a 60 °C durante 72 hrs o hasta obtener un peso constante. Para obtener el carbono de hierbas y arbustos se multiplicó la biomasa total por el factor 0.50% para posteriormente extrapolarlo a la superficie de cada rodal (IPCC, 2007).

La biomasa total del predio se estimó mediante la sumatoria de la biomasa arbórea por cada rodal más la de hierbas y arbustos. De esta misma manera se obtuvo el contenido de carbono del estrato vegetativo en el predio.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Biomasa individual para árboles de *Pinus rudis*

El diámetro normal de los 25 árboles muestreados varió de 7.20 a 42.20 cm, la altura total de 4.85 a 20.40 m y la biomasa de 9.03 a 545.05 kg (Cuadro 3). La proporción de biomasa total varió principalmente en función del diámetro normal, conforme este aumentó la cantidad de biomasa total fue mayor para los árboles de esta especie (Figura 1).

La distribución de biomasa por componente estructural varió de la siguiente manera: en el fuste de 37.14 a 77.10% con un promedio de 65.52% y es el componente estructural con mayor biomasa acumulada, seguido por las ramas en donde varió de 7.98 a 46.59% con promedio de 23.44%, finalmente el follaje con 4.67% a 23.39 % con promedio de 11.04% (Cuadro 4).

### 6.2. Ecuaciones de biomasa para *Pinus rudis*

Los modelos que presentaron un mejor ajuste para estimar la biomasa utilizando diámetro normal, altura total o ambas variables al mismo tiempo fueron modelos no lineales de potencia.

La ecuación para estimar biomasa a partir del diámetro normal (DN) en la especie estudiada fue del siguiente tipo:

$$B = \beta_0 DN^{\beta_1}$$

donde: B es la biomasa en kg, DN es el diámetro normal en cm,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  Son los parámetros de regresión.

**Cuadro 3 . Diámetro normal, altura total y distribución de la biomasa por componente estructurales en árboles de *Pinus rudis* en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.**

Árbol	Diámetro (cm)	Altura (m)	BIOMASA (Kg)			
			Fuste	Follaje	Ramas	Total
1	7.2	4.85	5.936	1.080	2.011	9.027
2	7.3	5.25	3.979	1.267	0.455	5.701
3	10.0	6.97	5.473	2.397	6.864	14.735
4	11.3	11.0	7.688	0.566	2.749	11.003
5	13.2	7.70	11.870	4.289	7.484	23.643
6	14.5	10.05	17.351	3.406	7.097	27.854
7	15.0	9.90	21.472	5.010	12.736	39.218
8	15.6	14.10	42.951	2.602	10.155	55.708
9	17.3	12.10	37.256	5.006	11.469	53.731
10	19.1	8.30	35.802	18.400	24.451	78.653
11	20.4	12.25	61.941	8.733	21.777	92.451
12	22.6	17.10	100.985	8.243	15.297	124.525
13	23.8	11.65	89.809	20.274	33.202	143.285
14	24.7	11.50	77.440	23.017	61.732	162.189
15	25.5	15.10	119.612	12.939	33.770	166.320
16	26.0	20.10	169.663	12.746	33.591	216.000
17	28.0	16.30	182.610	17.353	55.794	255.757
18	28.2	17.70	175.028	17.652	40.000	232.680
19	30.3	16.40	171.305	28.146	66.864	266.316
20	31.0	17.50	156.151	12.337	42.459	210.947
21	33.6	15.60	248.959	33.288	69.610	351.857
22	35.3	20.40	249.818	39.918	90.144	379.880
23	37.0	17.50	222.201	29.164	51.510	302.876
24	42.0	19.0	380.898	50.466	153.998	585.362
25	42.2	19.0	367.157	69.844	108.050	545.050



**Cuadro 4 . Porcentaje de biomasa en los componentes estructurales de *Pinus rudis*.**

Árbol	DN (cm)	Altura (m)	Fuste (%)	Follaje (%)	Ramas (%)
1	7.2	4.85	65.76	11.96	22.28
2	7.3	5.25	69.80	22.22	7.98
3	10.0	6.97	37.14	16.27	46.59
4	11.3	11.0	69.87	5.14	24.99
5	13.2	7.70	50.21	18.14	31.65
6	14.5	10.05	62.29	12.23	25.48
7	15.0	9.90	54.75	12.77	32.48
8	15.6	14.10	77.10	4.67	18.23
9	17.3	12.10	69.34	9.32	21.34
10	19.1	8.30	45.52	23.39	31.09
11	20.4	12.25	67.00	9.45	23.56
12	22.6	17.10	81.10	6.62	12.28
13	23.8	11.65	62.68	14.15	23.17
14	24.7	11.50	47.75	14.19	38.06
15	25.5	15.10	71.92	7.78	20.30
16	26.0	20.10	78.55	5.90	15.55
17	28.0	16.30	71.40	6.78	21.82
18	28.2	17.70	75.22	7.59	17.19
19	30.3	16.40	64.32	10.57	25.11
20	31.0	17.50	74.02	5.85	20.13
21	33.6	15.60	70.76	9.46	19.78
22	35.3	20.40	65.76	10.51	23.73
23	37.0	17.50	73.36	9.63	17.01
24	42.0	19.0	65.07	8.62	26.31
25	42.2	19.0	67.36	12.81	19.82
<b>Promedio</b>			<b>65.52</b>	<b>11.04</b>	<b>23.44</b>
<b>Desv. Est.</b>			<b>111.21</b>	<b>17.14</b>	<b>37.60</b>

Una vez estimado los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  la ecuación obtenida se muestra en la Figura 1.

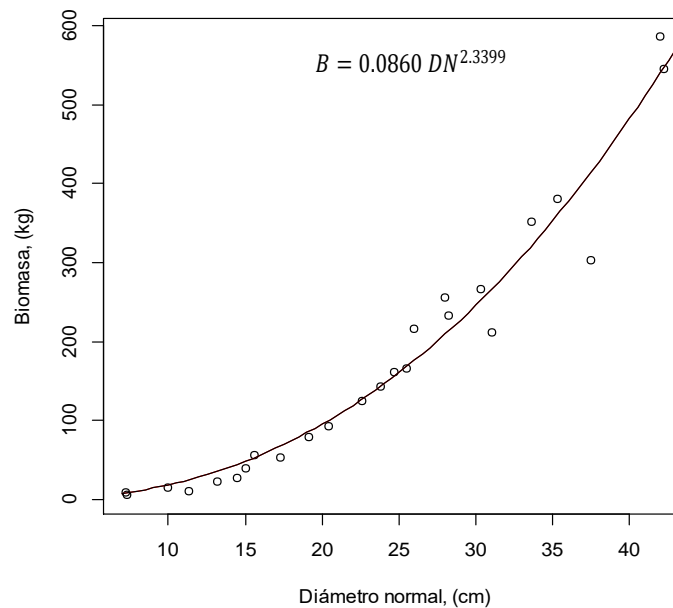


Figura 1. Relación de la biomasa total con el diámetro normal de árboles de *Pinus rudis* en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

En la Figura 1 se muestra la dispersión de puntos de muestreo en base a los datos obtenidos para cada árbol muestreado. Se puede observar que los datos obtenidos en campo se alejan muy poco de la línea de tendencia, es decir los datos reales se alejan poco de los esperados o predichos. Además se observa una tendencia positiva que indica que a mayor diámetro normal mayor biomasa total y viceversa. Sin embargo, esta tendencia no fue lineal debido a que el incremento no fue constante, ya que hay un punto en que un aumento del diámetro normal conlleva a un incremento considerable en la biomasa total de los árboles.

La ecuación para estimar biomasa a partir de la altura total del árbol en *Pinus rudis* fue del siguiente tipo:

$$B = \beta_0 Alt^{\beta_1}$$

donde:  $B$  es la biomasa en kg,  $Alt$  es la altura total del árbol en m y  $\beta_0$  y  $\beta_1$  parámetros de regresión.

Una vez estimado los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  la ecuación obtenida se muestra en la Figura 2.

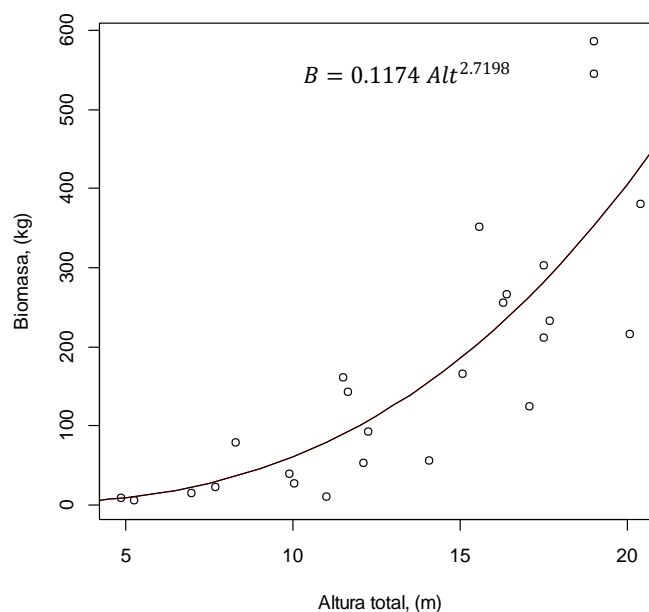


Figura 2. Relación de la biomasa total con la altura total de árboles de *Pinus rudis* en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

En la Figura 2 se muestra la relación entre la altura total del árbol y la biomasa total de los árboles, sin embargo se observa que los datos observados se alejan más de los datos esperados o predichos, comparándolos con los valores de la ecuación del DN con la biomasa total. Al igual a lo encontrado en la ecuación anterior, en este caso, tampoco la tendencia fue lineal, como ya se explicó existe un punto en que un aumento en la altura total conlleva un incremento considerable en la biomasa total de los árboles; sin embargo, el incremento de biomasa en función del diámetro es de mayor magnitud que lo que se obtiene en función de la altura total del árbol.

De acuerdo a la dispersión de los datos mostrados en las Figuras 1 y 2 se observó que la relación del DN con la biomasa total mostró un mejor ajuste en comparación a la relación de la altura total con la biomasa total.

La ecuación para estimar biomasa en función de las variables diámetro normal (DN) en cm y altura total (Alt) en m del árbol en *Pinus rudis* fue del siguiente tipo:

$$B = \beta_0 DN^{\beta_1} Alt^{\beta_2}$$

donde: B: biomasa en kg, DN es el diámetro normal en cm, Alt altura total del árbol y  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  parámetros de regresión.

Una vez estimado los parámetros  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  la ecuación obtenida se muestra en la Figura 3.

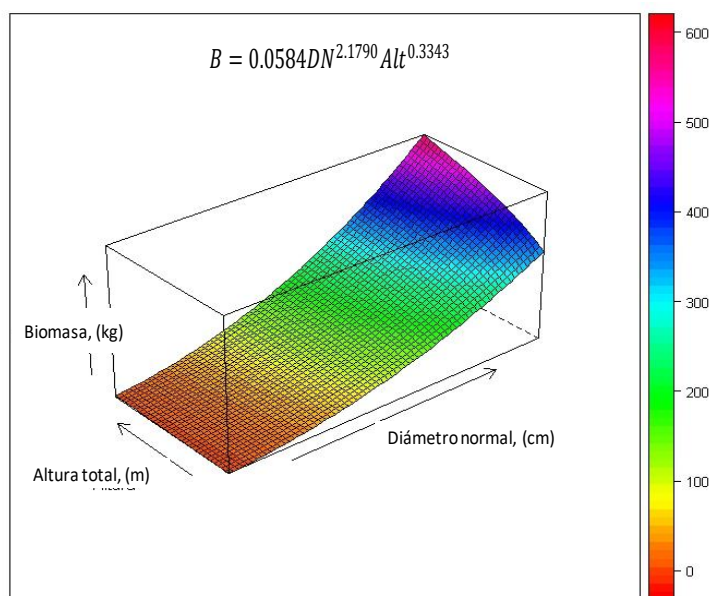


Figura 3. Relación de la biomasa total con el diámetro normal y altura total del árbol de *Pinus rudis* en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

En la Figura 3 se muestra la relación de la biomasa total (Kg) con el DN (cm) y la altura total (m), observándose que conforme incrementa el DN y la altura total de los árboles tiene mayor cantidad de biomasa total. Al igual que en los

casos anteriores, la relación no fue lineal ya que llega a un punto en que un aumento de DN y altura total conlleva un incremento considerable en la biomasa total de los árboles.

El DN tiene una relación positiva con respecto a la cantidad de la biomasa total del árbol, siguiendo una tendencia de tipo ascendente, en la cual hay un incremento de la biomasa a medida que aumenta el DN.

### 6.3 Contenido de carbono en árboles individuales de *Pinus rudis*

En los árboles analizados, el porcentaje de carbono para el fuste varió de 48 a 53.50, con un promedio de 49.40; para las ramas varió de 48.50 a 50.40, con un promedio similar al del fuste; y para el follaje-ramillas varió de 48.80 a 49.40, con un promedio de 49.18. Finalmente el promedio del porcentaje de carbono total del árbol fue de 49.32 (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Porcentaje de carbono promedio por componente estructural en *Pinus rudis*.**

Componente	Árbol 1	Árbol 2	Árbol 3	Árbol 4	Árbol 5	Árbol 6	Árbol 7	Promedio	Desv. Est.
Fuste	53.50	49.74	48.70	48.40	48.05	49.05	48.34	49.40	1.89
Follaje	49.23	49.20	49.40	49.30	49.40	48.80	48.90	49.18	0.24
Ramas	49.41	49.60	49.00	50.00	48.90	50.40	48.50	49.40	0.66
Árbol total	50.71	49.51	49.03	49.23	48.78	49.42	48.58	49.32	0.70

### 6.4 Ecuaciones para estimar el contenido de carbono en *Pinus rudis*

La mejor ecuación para estimar el contenido de carbono (CC) en *P. rudis* con base al diámetro normal (DN) correspondió a un modelo no lineal de potencia (Figura 4).

La ecuación para estimar el contenido de carbono a partir del DN del árbol en *Pinus rudis* fue del siguiente tipo:

$$CC = \beta_0 DN^{\beta_1}$$

donde: CC es el contenido de carbono en kg, DN es el diámetro normal en cm,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  parámetros de regresión.

Una vez estimado los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  la ecuación obtenida se muestra en la Figura 4.

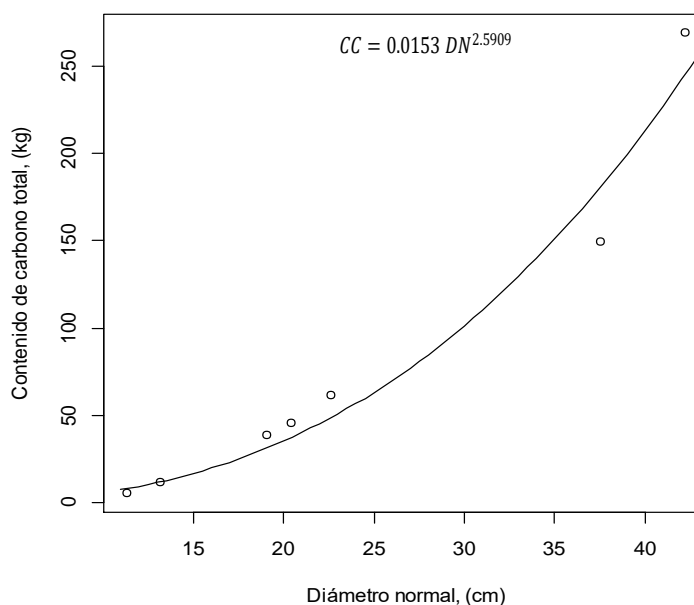


Figura 4. Relación entre el contenido de carbono (CC) y diámetro normal en árboles de *Pinus rudis* en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

En la Figura 4 se muestra la relación entre el contenido de carbono (CC) y el diámetro normal (DN). Se observó una tendencia positiva que indica que a mayor DN mayor contenido de carbono y viceversa. Sin embargo, esta tendencia no fue lineal ya que el incremento en el contenido de carbono no fue constante y existe un punto en que un aumento de DN conlleva un incremento considerable en contenido de carbono en la parte aérea de los árboles.

El modelo para estimar el contenido de carbono de la parte aérea de los árboles (CC) en función de la altura de los mismos que mejor se ajustó fue un modelo no lineal exponencial o de Malthus. En la Figura 5 los resultados muestran

que el contenido de carbono a partir de cierta altura se expresa de una forma exponencial y su aumento se ve reflejado considerablemente.

La ecuación para estimar el contenido de carbono a partir de la altura total del árbol en *Pinus rudis* fue del siguiente tipo:

$$CC = \beta_0 \exp^{\beta_1 Alt}$$

donde: CC es el contenido de carbono en kg, *Alt* es la altura total en m,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  parámetros de regresión.

Una vez estimado los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$  la ecuación obtenida se muestra en la Figura 5.

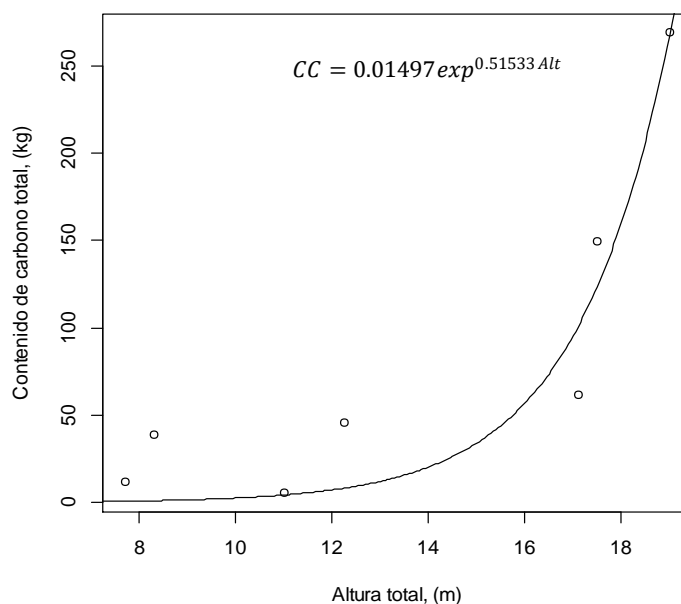


Figura 5. Relación entre el contenido de carbono (CC) y la altura total en árboles de *Pinus rudis* en el predio Agua del conejo, Acajete, Veracruz.

De acuerdo a la dispersión de los datos mostrados en las Figuras 4 y 5 se observó que la relación de DN con el contenido de carbono mostró un mejor ajuste en comparación a la relación de la altura total con el contenido de carbono.

No se realizó un modelo para estimar el contenido de carbono que incluyera al mismo tiempo el diámetro normal y altura total del arbolado debido a que su relación fue de diferente tipo.

## **6.5 Biomasa total y por estrato arbóreo en el predio Agua del Conejo**

### **6.5.1 Biomasa por rodales**

En el Cuadro 6 se muestran la densidad del arbolado, área basal, diámetro normal promedio y la biomasa presente en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz. El número de árboles por hectárea varió de 260 (rodal 4) a 340 (rodal 3). El área basal promedio por rodal varió de 16.20 m<sup>2</sup>/ha (rodal 1) a 35.02 m<sup>2</sup>/ha (rodal 3). El diámetro normal promedio varió de 23.64 cm (rodal 1) a 35.24 cm (rodal 3). La biomasa total (biomasa arbórea y biomasa de hierbas y arbustos) varió de 64.66 a 154.65 Mg ha<sup>-1</sup>; de ésta la biomasa arbórea varió de 54.70 a 151.09 Mg ha<sup>-1</sup> y la correspondiente a hierbas y arbustos de 3.56 a 9.96 Mg ha<sup>-1</sup>. La biomasa promedio por hectárea estimada para todo el predio fue de 118.90 Mg ha<sup>-1</sup>.

El rodal 1 fue el que concentró la menor cantidad de biomasa total y arbórea (64.66 y 54.70 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) mientras que el rodal 3 fue en el que se encontró la mayor cantidad de biomasa total y arbórea (154.65 y 151.09 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), sin embargo, fue en el que se encontró menor cantidad en el estrato herbáceo y arbustivo (3.56 Mg ha<sup>-1</sup>).

**Cuadro 6. Densidad del arbolado, área basal, diámetro normal promedio y biomasa por rodal en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.**

	<b>Rodal 1</b>	<b>Rodal 2</b>	<b>Rodal 3</b>	<b>Rodal 4</b>
Número de árboles/ha	333	280	340	260
Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	16.20	24.35	35.02	21.52
Diámetro normal promedio (cm)	23.64	32.13	35.24	32.47
Biomasa arbórea (Mg ha <sup>-1</sup> )	54.70	134.42	151.09	104.10
Biomasa de hierbas y arbustos (Mg ha <sup>-1</sup> )	9.96	8.49	3.56	9.25
Biomasa total (Mg ha <sup>-1</sup> )	64.66	142.91	154.65	113.35



### 6.5.2 Biomasa por tipo de asociación de especie

En el Cuadro 7 se muestran la densidad del arbolado, área basal, diámetro normal promedio y la biomasa por asociación arbórea. El número de árboles varió de 260 (asociación de *P. patula* – *P. pseudostrobus*) a 333 (bosque de *P. rudis*). El área basal promedio por tipo de asociación varió de 16.20 m<sup>2</sup>/ha (bosque de *Pinus rudis*) a 29.69 m<sup>2</sup>/ha (asociación *P. patula* – *P. rudis*). El diámetro normal promedio varió de 23.64 cm (bosque de *P. rudis*) a 33.69 cm (asociación *P. patula* – *P. rudis*). El bosque puro de *Pinus rudis* fue el que concentró la menor cantidad de biomasa total y arbórea (64.66 y 54.70 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) mientras el bosque de *P. patula* - *P. rudis* fue en el que se encontró mayor cantidad de biomasa total y arbórea (148.79 y 142.76 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) y, la menor cantidad en el estrato herbáceo y arbustivo (6.03 Mg ha<sup>-1</sup>).

**Cuadro 7. Densidad del arbolado, área basal, diámetro normal promedio y biomasa por asociación vegetativa en el predio Agua del Conejo, Acajete Veracruz.**

	<b>Bosque de <i>P. rudis</i></b>	<b>Bosque de <i>P. patula</i> - <i>P. rudis</i></b>	<b>Bosque de <i>P. patula</i> - <i>P.</i> <i>pseudostrobus</i></b>
Número de árboles/ha	333	310	260
Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	16.20	29.69	21.52
Diámetro normal promedio (cm)	23.64	33.69	32.47
Biomasa arbórea (Mg ha <sup>-1</sup> )	54.70	142.76	104.10
Biomasa de hierbas y arbustos (Mg ha <sup>-1</sup> )	9.96	6.03	9.25
Biomasa total (Mg ha <sup>-1</sup> )	64.66	148.79	113.35

### 6.5.3 Biomasa por especies arbórea

En el Cuadro 8 se presenta la densidad del arbolado, área basa, diámetro normal promedio y biomasa por especie arbórea. El número de árboles varió de 87 (*P. pseudostrobus*) a 213 (*P. rudis*), el área basal promedio por especie varió de 10.84 m<sup>2</sup>/ha (*P. patula*) a 16.42 m<sup>2</sup>/ha (*P. rudis*), el diámetro normal promedio varió de

23.84 cm (*P. patula*) a 42.03 cm (*P. pseudostrobus*). *P. rudis* fue el que se encontró la menor cantidad de biomasa total arbórea con 60.49 Mg ha<sup>-1</sup>, seguido por *P. patula* con 64.82 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que *P. pseudostrobus* fue en el que se encontró mayor cantidad de biomasa total arbórea con 68.47 Mg ha<sup>-1</sup>. Por lo anterior se puede señalar que la biomasa estimada en el presente trabajo para las tres especies tuvo valores muy cercanos.

**Cuadro 8. Densidad del arbolado, área basal, diámetro normal promedio y biomasa de especies en el predio Agua del Conejo, Acajete Veracruz.**

	<i>P. rudis</i>	<i>P. patula</i>	<i>P. pseudostrobus</i>
Número de árboles/ha	213	121	87
Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	16.42	10.84	15.28
Diámetro normal promedio (cm)	28.99	23.84	42.03
Biomasa total arbórea (Mg ha <sup>-1</sup> )	60.49	64.82	68.47

## 6.6 Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea y por estrato en el predio Agua del Conejo

### 6.6.1 Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por rodales

En el Cuadro 9 se muestra el carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea el cual varió de 27.45 a 72.35 Mg ha<sup>-1</sup>; de ésta el carbono arbóreo varió de 22.47 a 70.57 Mg ha<sup>-1</sup> y la correspondiente a hierbas y arbustos de 1.78 a 4.98 Mg ha<sup>-1</sup>. El carbono aéreo promedio por hectárea almacenado en la biomasa aérea fue de 56.48 Mg ha<sup>-1</sup>.

El rodal 1 fue el que concentró la menor cantidad de carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea y arbórea (27.45 y 22.47 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) mientras el rodal 3 fue en el que se encontró mayor cantidad de carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea y arbórea (72.35 y 70.57 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), sin embargo, fue en el que se encontró la menor cantidad en los estratos herbáceo y arbustivo (1.78 Mg ha<sup>-1</sup>).

**Cuadro 9. Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por rodal en el predio Agua del Conejo, Acajete Veracruz.**

	Rodal 1	Rodal 2	Rodal 3	Rodal 4
Carbono arbóreo (Mg ha <sup>-1</sup> )	22.47	65.17	70.57	52.07
Carbono de hierbas y arbustos (Mg ha <sup>-1</sup> )	4.98	4.25	1.78	4.62
Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea (Mg ha <sup>-1</sup> )	27.45	69.42	72.35	56.69

#### 6.6.2 Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por tipo de asociación de especies

En el Cuadro 10 se presenta el carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea. El bosque puro de *P. rudis* fue en el que se encontró la menor cantidad de carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea y arbóreo (27.45 y 22.47 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) mientras el bosque de *P. patula* - *P. rudis* fue en el que se encontró mayor cantidad de carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea y arbóreo (70.89 y 67.87 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), por otra parte fue en el que se encontró menor cantidad en el estrato herbáceo y arbustivo (3.02 Mg ha<sup>-1</sup>).

**Cuadro 10. Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por asociación vegetativa en el predio Agua del Conejo, Acajete Veracruz.**

	Bosque de <i>P. rudis</i>	Bosque de <i>P. patula</i> - <i>P. rudis</i>	Bosque de <i>P. patula</i> - <i>P. pseudostrobus</i>
Carbono por asociación (Mg ha <sup>-1</sup> )	22.47	67.87	52.07
Carbono de hierbas y arbustos (Mg ha <sup>-1</sup> )	4.98	3.02	4.62
Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea (Mg ha <sup>-1</sup> )	27.45	70.89	56.69

#### 6.6.3 Carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por especies arbóreas

El carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea por especie arbórea. *P. rudis* fue el que se encontró la menor cantidad de carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea con 25.27 Mg ha<sup>-1</sup>, seguido por *P. patula* con 32.07 Mg ha<sup>-1</sup>,

mientras que *P. pseudostrobus* fue en el que se encontró mayor carbono aéreo total almacenado en la biomasa aérea con 34.47 Mg ha<sup>-1</sup>.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1 Biomasa individual para árboles de *Pinus rudis*

El mejor ajuste que presentó la ecuación para estimar la biomasa de *P. rudis* en función del diámetro normal es común a otras especies de pinos, por ejemplo, Carrillo *et al.* (2016) reportaron esta misma en árboles de *Pinus hartwegii* Lindl., especie muy cercana a *P. rudis*. Esta misma tendencia se ha reportado en otras especies de coníferas, por ejemplo en *Abies religiosa* (Avendaño *et al.*, 2009), *P. patula* (Figueroa, 2010) y en *P. arizonica*, *P. durangensis*, *P. cooperi*, *Pinus ayacahuite* Ehre., *Pinus leiophylla* Schl. et Cham. y *Pinus* spp (Návar-Cháidez, 2010). Lo anterior indica que el diámetro normal tiene una mayor relación con la biomasa que la que presenta la altura, lo que da como resultado que el uso de diámetro mejora la predicción de la biomasa arbórea (Carrillo *et al.*, 2014 y Díaz-Franco *et al.*, 2007).

En lo referente a la proporción de biomasa por componente estructural, se tiene que en *P. hartwegii* especie muy cercana a *P. rudis* la proporción promedio de biomasa por componente estructural (fuste 65.30 %, ramas 23.80 % y follaje 10.90 %) (Carrillo *et al.*, 2016) fue muy similar a la encontrada en *P. rudis* en el presente trabajo. Esta similitud se mantiene aún con otras especies más lejanas a *P. rudis*, como en *P. duranguensis*, en el que la proporción fue para el fuste de 64.00 %, para las ramas de 22.50 % y para el follaje de 13.5%; en *P. cooperi* fue de 67.00 % en el fuste, en ramas de 22.04 % y en el follaje de 10.60 % (Návar *et al.*, 2001). En otras especies de coníferas se han encontrado proporciones diferentes, en *P. patula*, Díaz-Franco *et al.* (2007) reportaron 82 % en el fuste, 10 % en ramas y 8 % en follaje; Flores-Nieves *et al.* (2011) reportaron en *A. religiosa* 97.00 % en fuste, 3.00 % en ramas y 0.07 % en follaje y en *P. greggii* Pacheco *et al.* (2007) reportaron 51.00 % en fuste, 24.00 % en ramas y 25.00 % en follaje. Lo que indica que la proporción de biomasa por componente estructural varía con la especie. Se puede observar que en todos los casos, el fuste es el que presenta la mayor cantidad de biomasa, debido a que es el componente donde se forma la

mayor cantidad de madera. La similitud en cuanto al porcentaje de biomasa en sus diferentes componentes estructurales de *P. rudis* con respecto a otras especies, se puede deber a que presentan hábitos de crecimiento y desarrollo similares así como arquitectura de la planta muy semejante.

## **7.2 Ecuaciones de biomasa para *Pinus rudis***

Es común encontrar que el modelo de potencia es buen estimador de la biomasa a partir del diámetro normal en especies de pino, por ejemplo en *P. arizonica* (Návar, 2009), *P. ayacahuite* (Návar, 2009), *P. cooperi* (Návar, 2009), *P. devoniana* (Méndez-González *et al.*, 2011), *P. durangensis* (Montes de Oca-Cano *et al.*, 2009; Návar, 2009; Návar, 2010), *P. engelmannii* (Návar, 2009), *P. hartwegii* (Jiménez, 2010; Carrillo *et al.*, 2016), *Pinus herrerae* Martínez (Návar, 2009), *P. leiophylla* (Návar, 2009), *Pinus maximinoi* H. E. Moore (González, 2008), *Pinus montezumae* Lamb (Bonilla, 2009; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009), *Pinus oocarpa* Schiede (Návar, 2009), *P. patula* (Díaz, 2005; Díaz-Franco *et al.*, 2007; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009; Pacheco, 2011), *Pinus pinceana* Gordon (Jiménez, 2013), *P. pseudostrobus* (Ayala, 1998; Domínguez, 2005; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009; Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011; Méndez-González *et al.*, 2011; Palma, 2011) y *Pinus teocote* Schl et Cham (Domínguez, 2005; Návar, 2009; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009; Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011).

Cabe mencionar que se han encontrado otros modelos exponenciales en algunas especies de pinos, aunque en menor escala, por ejemplo en *P. arizonica* (Návar, 2010), *P. ayacahuite* (Návar, 2010), *Pinus cembroides* Zucc (Guerrero, 2013), *P. cooperi* (Návar, 2010), *P. durangensis* (Návar, 2010), *P. leiophylla* (Návar, 2010), *P. oocarpa* (Návar, 2010), *P. patula* (Castellanos *et al.*, 1996), *P. pseudostrobus* (Aguirre *et al.*, 2007; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2007; Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Návar 2010) y *P. teocote* (Aguirre *et al.*, 2007; Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Návar 2010) y en *P. greggii* un modelo cuadrático (Mora, 2010) (Ver anexo 1).

Se ha reportado que el diámetro normal es mejor estimador de la biomasa que la altura total del arbolado, además la altura es un parámetro más complicado de medir en campo, se comete mayor error y se invierte mayor tiempo en su medición (Moreno *et al.*, 2011; Carrillo *et al.*, 2014 y 2016). Por lo que no existen modelos para estimar biomasa total a partir de la altura total del arbolado, siendo el encontrado en el presente trabajo el primero.

Existen diferentes modelos para estimar la biomasa total a partir del diámetro normal y la altura total del arbolado de manera conjunta en algunas otras especies de pinos, por ejemplo en *P. cooperi* (Pimienta *et al.*, 2007), *P. greggii* (Aguilar, 2009), *P. patula* (Figueroa *et al.*, 2010; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012) (Anexo 1). Sin embargo en *P. ayacahuite* (Ayala, 1998), *Pinus Oaxacana* Mirov (Ayala, 1998), *P. oocarpa* (Ayala, 1998), *P. montezumae* (Ayala, 1998) y *P. pseudostrobus* (Ayala, 1998; Palma, 2011), son semejantes al encontrado en este estudio.

### **7.3 Contenido de carbono en árboles individuales de *Pinus rudis***

El porcentaje del contenido de carbono total por componente estructural y promedio por árbol encontrado en el presente estudio (cercano al 50 %) fue similar al encontrado en otras especies de pinos, *P. hartwegii* (Carrillo *et al.*, 2016), *P. patula* (Díaz-Franco *et al.*, 2007), *P. montezumae* (Carrillo *et al.*, 2014). Lo que coincide con el IPCC (2007) quien menciona que el contenido de carbono se puede determinar a partir de la multiplicación de la biomasa total por el factor 0.50 (correspondiente al 50 % de la biomasa).

El cálculo del contenido de carbono mediante métodos destructivos sería recomendable cuando se desconoce la concentración de carbono en cada uno de los componentes estructurales del árbol y se requiere de una alta precisión, pero esto dependerá de los objetivos del estudio y de la aplicación que se le vaya a dar a los resultados. Sin embargo, cuando solo se desea una estimación general no sería recomendable utilizar los métodos destructivos por el alto costo y el trabajo que involucran, así como la alteración ecológica que ocasionan.

#### **7.4 Ecuaciones para estimar el contenido de carbono en *Pinus rudis***

Es habitual utilizar un modelo de potencia para estimar el contenido de carbono a partir del diámetro normal en la mayoría de especies de coníferas, por ejemplo en *A. religiosa* (Avendaño, 2006; Avendaño *et al.*, 2009; Razo-Zárate *et al.*, 2013; Rodríguez-Sánchez y Calva-Vásquez, 2014), *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl (Vigil, 2010), *P. hartwegii* (Carrillo *et al.*, 2016; Jiménez, 2010), *P. montezumae* (Carrillo *et al.*, 2014), *P. patula* (Díaz, 2005; Díaz-Franco *et al.*, 2007) y *P. pseudostrobus* (Palma, 2011). Sin embargo se han encontrado otros modelos cuadráticos en algunas especies de pinos, como en *Pinus pringlei* Shaw (García *et al.*, 2015) y *P. hartwegii* (Moreno, 2010) (Ver anexo 2).

Hasta el momento no existen reportes de ecuaciones para estimar el contenido de carbono a partir de la altura total del arbolado, por lo que la ecuación encontrada en el presente estudio es la primera. Lo anterior quizá debido a que el diámetro normal del arbolado presenta una mejor relación con el contenido de carbono que la altura total del arbolado; ya que como se vio en el presente trabajo y en otros estudios el diámetro normal presenta una mejor relación con la biomasa. Además esta variable es más fácil de medir en campo, lo que permite ahorrar trabajo, tiempo y costos.

En el presente trabajo no se realizó un modelo para estimar el contenido de carbono que incluyera al mismo tiempo el diámetro normal y altura total del arbolado, sin embargo en *P. cooperi* (Pimienta *et al.*, 2007), *P. greggii* (Pacheco *et al.*, 2007) y *P. pseudostrobus* (Palma, 2011) reportan modelos utilizando estas dos variables (Anexo 2).

#### **7.5 Biomasa total y contenido de carbono almacenado en la parte aérea de plantas en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz**

Las diferencias encontradas en la producción de biomasa y carbono en el estrato arbóreo estuvieron en función de la composición vegetal, la estructura (DN y área basal) y densidad del arbolado por unidad de área; sin embargo pueden estar



influyendo algunos otros factores no evaluados en la presente investigación, como puede ser el crecimiento diferencial ocasionado por la calidad del sitio y la edad del arbolado como lo sugieren Patenaude *et al.* (2003) y Galeana-Pizaña *et al.* (2013). Por ejemplo el bosque mezclado de *P. patula* - *P. rudis* presentó la mayor cantidad de biomasa y carbono acumulados en el estrato arbóreo y total debido a que esta asociación vegetal presentó mayor área basal, diámetros normales y la segunda mayor densidad de árboles. Mientras que el bosque puro de *P. rudis* presentó menor cantidad de biomasa y carbono en el estrato arbóreo y totales debido a que tuvo menor área basal y diámetros normales. Probablemente en la asociación de *P. patula* - *P. rudis* existió una compensación en los tamaños de los árboles dada por la existencia de *P. patula*. Por su parte la asociación *P. patula* - *P. rudis* concentró la menor cantidad de biomasa y carbono en los estratos herbáceo y arbustivo, lo anterior debido posiblemente a que presenta mayor área basal y una de las menores densidades del arbolado, al existir una alta densidad del arbolado y si estos son de una mayor talla (DN) la cantidad de luz que el estrato arbóreo deja pasar hasta el suelo es menor y por lo tanto este estrato reduce su desarrollo (Acosta *et al.*, 2001).

En cuanto al análisis por especie *P. pseudostrobus* concentró la mayor cantidad de biomasa y carbono, a pesar de que presentó la menor densidad del arbolado, pero tuvo los diámetros normales mayores respecto a *P. rudis* y *P. patula* por lo que se puede pensar que en la producción de biomasa existió una compensación de las tallas (DN) a la densidad del arbolado (Rojas, 2004).

La biomasa estimada en el presente trabajo para las tres especies (*P. rudis*, *P. patula* y *P. pseudostrobus*) fue similar. Al comparar con otras especies de pinos se tiene que los valores encontrados fueron menores a los reportados en *P. hartwegii* (especie muy cercana a *P. rudis*, 233.61 Mg ha<sup>-1</sup>) en los estados de Tlaxaca - Puebla (Rojas-García y Villers-Ruiz, 2008), en *P. patula* (178.10 Mg ha<sup>-1</sup>) en Hidalgo (Chávez-Aguilar *et al.*, 2016) y en *P. cooperi* (98.10 Mg ha<sup>-1</sup>) en Durango (Pimienta *et al.*, 2007). Sin embargo fueron mayores a lo reportado para *P. oocarpa* (40.43 Mg ha<sup>-1</sup>) en Jalisco (Castañeda-González *et al.*, 2012) y a *P.*

*teocote* (41.50 Mg ha<sup>-1</sup>) en Tamaulipas (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009) (Ver anexo 3).

El contenido de carbono estimado en este estudio para *P. rudis* (25.27 Mg ha<sup>-1</sup>) fue cercano al valor reportado para *P. hartwegii* con densidad abierta (21.21 Mg ha<sup>-1</sup>) en bosques de la Ciudad de México (Galeana-Pizaña *et al.*, 2013) y *P. oocarpa* (20.20 Mg ha<sup>-1</sup>) en Jalisco (Castañeda-González *et al.*, 2012). Por otra parte el carbono para *P. patula* fue de 32.07 Mg ha<sup>-1</sup> y resultó menor al encontrado por Acosta-Mireles *et al.* (2009) (75.30 Mg ha<sup>-1</sup>) en Tlaxcala, sin embargo fue mayor a lo reportado para *P. hartwegii* (44.00 Mg ha<sup>-1</sup>) en bosques de la Ciudad de México (Espinoza, 2005) y *P. teocote* (47.01 Mg ha<sup>-1</sup>) en Nuevo León (Aguirre-Calderón y Jiménez - Pérez, 2011); para *P. pseudostrubus* fue de 34.47 Mg ha<sup>-1</sup>, resultando menor a lo encontrado para la misma especie por Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) (73.18 Mg ha<sup>-1</sup>); sin embargo fue mayor a lo reportado para *P. pseudostrobus* (19 Mg ha<sup>-1</sup>) en Michoacán (Fragoso, 2003) (Anexo 3).

Las diferencias encontradas en la producción de biomasa y acumulación de carbono con respecto a otras especies se pueden deber a que tal y como lo mencionan Anderson y Spencer (1991) estas variables dependen en gran medida del sitio donde se encuentren establecidas las especies (suelo, variables climáticas, exposición, relieve, etc.), la etapa de desarrollo, intervención del ecosistema, el uso del suelo y aspectos genéticos inherentes a las mismas especies.

Por lo anterior, se recomienda determinar el contenido de carbono por especie, para conocer en qué momento llega a su máxima productividad de acumulación de biomasa y carbono para alcanzar la máxima sustentabilidad.

Es importante realizar estudios detallados sobre captura de carbono en el resto de los almacenes (suelo, mantillo y raíces), para así tener la información más completa sobre el contenido de captura de carbono total en este tipo de

ecosistemas. También es importante determinar cómo cambia la captura de C y su aceleración o desaceleración en condiciones de interacción con otras especies.

## 8. CONCLUSIONES

Los modelos ajustados para estimar la biomasa en árboles individuales de *P. rudis* a partir del diámetro normal, altura total y la combinación de estos fueron modelos no lineales de potencia. Para el contenido de carbono fue un modelo de potencia cuando se utiliza el diámetro normal, mientras que cuando se utiliza la altura total fue un modelo no lineal exponencial. Resultó mejor tener como variable predictiva al el diámetro normal en la acumulación de biomasa y carbono, además de que presenta la ventaja de que su medición en campo es fácil de realizar y sin necesidad de emplear métodos destructivos que impliquen el derribo de árboles con trabajos exhaustivos y costosos.

El fuste es el componente estructural que concentró la mayor proporción de biomasa para *Pinus rudis* y estuvo relacionado principalmente con el crecimiento del diámetro normal.

El contenido de carbono por componente estructural y árbol total fue cercano al 50 %, por lo que se puede estimar el contenido de carbono multiplicando el contenido de biomasa por el factor de 0.50.

En el bosque mezclado de *P. patula* - *P. rudis* fue en donde se encontró la mayor cantidad de carbono almacenado en la parte aérea de la vegetación y la menor cantidad en el estrato herbáceo y arbustivo, mientras que en el bosque puro de *P. rudis* fue donde se encontró la menor cantidad. Por tanto, los resultados de esta investigación ayudan a entender cómo cambian el contenido de carbono en las diferentes tipos de asociaciones vegetal presentes en el predio Agua del Conejo, Acajete, Veracruz.

## 9. REFERENCIAS

- Acosta M., M., K. Quednow., J. Etchevers. y C. Monreal. 2001. Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. Simposio Internacional Medicion y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 11 p.
- Acosta Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J.D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725–736.
- Acosta M., M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 135 p.
- Acosta-Mireles, M., F. Carrillo-Anzures. y M. Díaz-Lavariega. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana* 27: 105-114.
- Aguilar, J. 2009. Captura de carbono en una plantación de *Pinus greggii* Engelm., en Arteaga Coahuila. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 60 p.
- Aguirre O., J. Jiménez, G. Domínguez y E. Treviño. 2007. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Morelia, México 28– 31 de Octubre de 2007.
- Aguirre-Calderón, O. y J. Jiménez-Pérez. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6):73–84.
- Aguirre-Salado, C.A., J.R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H.M. de los Santos-Posadas, R. Haapanen y A.I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *Patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43(2): 209-220.
- Anderson, J. and T. Spencer. 1991. Carbon, nutrient and water balances of tropical rain forest ecosystem subject to disturbance. MAB – Digest/FAO-Unesco. 55 p.
- Avendaño, D. 2006. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Abies religiosa* (H.B.K) Schl. et Cham., en Tlaxcala, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 66 p.

- Avendaño H. D.M., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J.D. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnica Mexicana* 32 (3): 233-238.
- Ávila G., F. Jiménez J. Beer, M. Gómez y M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Revista Agroforestería en las Américas* 8 (30): 32-35.
- Ayala, R. 1998. Ecuaciones para estimar biomasa de pinos y encinos en la meseta central de Chiapas. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. 70 p.
- Bonilla, E. 2009. Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. 60 p.
- Brown, S. 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forest: a primer. FAO Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Brown, S. 2001. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116: 363-372.
- Caballero D., M. 1967. Estudio comparativo de *Pinus rudis* y *Pinus hartwegii*. Tesis de Licenciatura. Departamento de Bosques. Escuela Nacional de Agricultura Chapingo, México. 139 p.
- Carrillo A. F., M. Acosta M., E. Flores A., J. E. Juárez B. y E. Bonilla P. 2014. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5 (5): 779-793.
- Carrillo A. F., M. Acosta M., C. del R. Jiménez C., L. González M. y J. D. Etchevers B. 2016. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (3): 681-691.
- Castañeda-Mendoza, A., J. Vargas-Hernández, A. Gómez-Guerrero, J.I. Valdez-Hernández y H. Vaquera-Huerta. 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia* 39:107-116.
- Castañeda-González, J.C., A. Gallegos-Rodríguez, M. Sánchez-Durán y P.A. Domínguez-Calleros. 2012. Biomasa aérea y posibles emisiones de  $\text{CO}_2$  después de un incendio; caso del bosque "La Primavera", Jalisco, México. *Ra Ximhai* 8(3):1-15.

- Castellanos B., J. F. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento en rodales coetáneos de *Pinus patula*. Tesis de Maestría. Programa forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 75 p.
- Castellanos J., Velázquez A., Vargas J., Rodríguez C. y Fierros A. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30:123–128.
- Ciesla, W. M. 1996. Cambio climático, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto. FAO. Roma. 146 p.
- Chávez-Aguilar, G., G. Ángeles-Pérez, M. Pérez-Suárez, M.A. López-López, E. García-Moya y C. Wayson. 2016. Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 22(3): 23-36.
- Cruz M., Z. 2007. Sistema de ecuaciones para estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 39 p.
- Díaz, R. 2005. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en el estrato aéreo en bosques de *Pinus patula* Schl. et Cham. en Tlaxcala México. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma Chapingo. 50 p.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala. y J.D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34.
- Domínguez-Cabrera, G., O. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, R. Rodríguez-Laguna y J. Díaz-Balderas. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15 (1):59–64.
- Domínguez, G. 2005. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. 63 p.
- Douterlungne D., A.M. Herrera-Gorocica., B.G. Ferguson, I. Siddique y L. Soto-Pinto. 2013. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia* 47: 385-397.
- Espinoza, M. 2005. Estimación del contenido y captura de carbono en el bosque de *Pinus hartwegii* de la cuenca alta del río Magdalena, Magdalena

- Contreras, D.F. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México, D.F. 72 p.
- Eguiluz P., T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis de Licenciatura. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 623 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2007. *Los bosques y el cambio climático*. Recuperado de <http://foris.fao.org/static/pdf/infonotes/infofaospanish>.
- Ferrari, D. and T. Head. 2010. Regression in R. Part I: Simple Linear Regression. UCLA Department of Statistics Statistical Consulting Center. [http://scc.stat.ucla.edu/page\\_attachments/0000/0139/reg\\_1.pdf](http://scc.stat.ucla.edu/page_attachments/0000/0139/reg_1.pdf) (consulta: marzo 24, 2017).
- Fierros-González, A. M. y A. Gómez-Guerrero. 2014. Captura de carbono en el sotobosque de plantaciones jóvenes de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* y en pastizales aledaños en el Sureste de México. En: Paz P. F., J. Wong G., M. Bazan y V. Saynes. (Eds). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013. Serie: síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Colegio de Postgraduados Universidad Autónoma Chapingo. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Texcoco, Edo. de México pp: 14-21.
- Figueroa C., Ángeles G., Velázquez A. y de los Santos H. 2010. Estimación de la biomasa en un Bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1:105–112
- Figueroa N., C.M. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría. Postgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 72 p.
- Flores-Nieves, P., M.Á. López-López, G. Ángeles-Pérez., M. de L. de la Isla-Serrano y G. Calva-Vásquez. 2011. Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2 (8): 9-20.
- Fragoso, P. 2003. Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio Cerro Grande municipio de Tancítaro Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Agrobiología Presidente Juárez. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán, México. 65p.
- Francis, J. K. 2000. Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science* 36 (3-4): 346-350.



- Gaillard de B. C., M. Pece, M. Juárez de G., A. Maldonado, V. H. Acosta y A. Gómez. 2002. Biomasa aérea de ejemplares de Quebracho Blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) en dos localidades del Parque Chaqueño Seco. *Quebracho* 9:115- 127.
- Galeana-Pizaña., J.M., J.A.B. Ordóñez-Díaz y N. Corona-Romero. 2013. Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y Bosques* 19 (1):53-69.
- González, M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis doctoral. Centro Agronómico Tropical de investigación y Enseñanza. 194 p.
- Griert C. C. and R. S. Logan. 1978. Old-growth Douglas-fir communities of a western Oregon watershed: biomass distribution and production budgets. *Ecological Monographs*. 47(4): 373-400.
- Guerrero, L. 2013. Cuantificación de biomasa, carbono y producción de oxígeno de *Pinus cembroides* Zucc. en Mazapil, Zacatecas, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 33 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. Información nacional, por entidad y municipios. Recuperado <http://www.inegi.org.mx/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Summary for policymaker. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado <http://www.IPCC.ch/pub/spm22-01.pdf>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Resumen para Responsables de Políticas. En: Parry, M.L. O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson. (Eds.). Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del PICC. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido. 116 p.
- Jiménez, C. 2010. Uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl., en el Parque Nacional Izta-Popo. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo. 55 p.
- Jiménez, E. 2013. Ecuaciones alométricas para estimación de biomasa aérea en *Prosopis laevigata* Willd. y *Pinus pinceana* Gordon. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 35 p.
- Ketterings, Q. M., R. Coe, M. V. Noordwijk, Y. Ambagau and C. A. Palm. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for

- predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146: 199-209.
- Kotto-Same., J., P.-L. Woomer., M. Appolinaire and Z. Louis. 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Cameroon. *Agriculture Ecosystems and Environment* 65: 245-256.
- León, G. 2013. Métodos de Montecarlo. Universidad Autónoma de Tamaulipas. 8p.
- Lim, H., K.H. Lee, K.H. Lee and I.H. Park. 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *Journal of Forest Research* 18: 316–322.
- Méndez-González., J., S.L. Luckie-Navarrete., M.A. Capo-Arteaga y J.A. Nájera-Luna. 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.
- Monreal, C.M., J.D. Etchevers, M. Acosta, M. C. Hidalgo, J. Padilla, R.M. López, L. Jiménez y A. Velásquez. 2005. A method for measuring above and below ground C stocks in hillside landscapes. *Canadian Journal of Soil Science* 85: 523-530.
- Montes de Oca-Cano, E., P. García-Ramírez, J.A. Nájera-Luna, J. Méndez-González. 2009. Ajuste de ecuaciones de biomasa para *Pinus durangensis* (Martínez M.) en la región de El Salto, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 65–71.
- Mora, E. 2010. Carbono almacenado en la fitomasa aérea en una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Arteaga, Coahuila. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila. 65 p.
- Moreno, N. 2010. Estimación de la captura de carbono en los bosques comunales de *Pinus hartwegii* Lindl. en la zona de Amecameca, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 36 p.
- Moreno G., N., M.A. Herrera M. y R.L. Caraciolo F. 2011. Modelo para cálculo estimación del carbono en tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe en la Reserva Nacional Malleco– Chile. *Árvore* 35:1299-1306.
- Morfin R., J. E., J. M. Michel F., R. González M., O. Carrillo, R. Mayorga, L. Rangel, J. Orozco O., G. Rodríguez A. y G. Pacheco G. 2015. PROTOCOLO, Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México. Norwegian Ministry Of Foreign Affairs, CONAFOR, PNUD y FAO. Zapopan, Jalisco, México. 136 p.

- Návar J., N. González 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. 18-20 de Octubre, 2001. Valdivia, Chile. 12p.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forest of northwestern Mexico. *Forest ecology and Management* 257: 427–434.
- Návar-Cháidez, J. 2010. Biomass allometry for tree species of northwestern México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12: 507-519.
- Ordóñez D., J.A.B. 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias* 90: 37-42.
- Pacheco E., F.C., A. Aldrete, A. Gómez G., A.M. Fierros G., V. M. Cetina Alcalá. y H. Vaquera H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *pinus greggii* Engelm en Hidalgo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30 (3): 251-254.
- Pacheco, A. G. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea por compartimientos en reforestaciones de *Pinus patula* Schl. et Cham en Xiacuí, Ixtlán Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad de la Sierra de Juárez. Oaxaca, México. 58 p.
- Palma, A. 2011. Estimación de biomasa y carbono de *Pinus pseudostrobus* en San José del Rincón, Estado de México. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 58 p.
- Pan Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch and D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993.
- Pardos, J.A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España. 253 p.
- Parresol, B.R. 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45 (4): 573-593.
- Patenaude, G.L., B.D.J. Briggs, R. Milne, C.S. Rowland, T.P. Dawson y S.N. Pryor. 2003. The carbon pool in a British semi-natural woodland. *Forestry* 75(5): 109-119.
- Perry, J. P. 1991. The Pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, Oregon, U.S.A. 231 p.

- Picard N., L. Saint André y M. Henry. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. Rome, Italy. Montpellier, France. 223 p.
- Pimienta de la T., D. de J., G. Domínguez C., O. Aguirre C., F.J. Hernández y J. Jiménez P. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1): 35-46.
- Razo-Zárata, R., A.J. Gordilo-Martínez, R. Rodríguez-Laguna, C.C. Maycotte-Morales y O.A. Acevedo-Sandoval. 2013. Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 19(2): 73-86.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O. Aguirre-Calderón y E. Jurado-Ibarra. 2007. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 32:39-56
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O.A. Aguirre-Calderón, E.J. Treviño-Garza, y R. Razo-Zárata. 2009. Estimación del carbono almacenado en un bosque de pino-encino en la Reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai* 5(3): 317-327.
- Rodríguez-Ortíz, G., A. Aldrete, V.A. González-Hernández, H.M. De Los Santos-Posadas., A. Gómez-Guerrero y A.M. Fierros-González. 2011. ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*?. *Agrociencia* 45(7): 19-732.
- Rodríguez-Ortíz, G., H.M. De Los Santos-Posadas, V.A. González-Hernández, A. Aldrete, A. Gómez-Guerrero y A.M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1): 25-41.
- Rodríguez-Sánchez, V. y G. Calva-Vásquez. 2014. Estimación del carbono contenido en el bosque de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham. en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. En: Paz P., F., J. Wong G., M. Bazan y V. Saynes. (Eds.). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2013. Serie: Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono. Colegio de Postgraduados. Universidad Autónoma Chapingo. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Texcoco, Edo. de México, México. pp: 7-13.

- Rojas G., F. 2004. Contenido y captura potencial de carbono en el bosque de *pinus hartwegii* del parque nacional La Malinche: Tlaxcala-Puebla. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de México. México, D. F. 68 p.
- Rojas-García, F. y L. Villers-Ruíz. 2008. Estimación de la biomasa forestal del parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista Ciencia Forestal en México*. 33(104):59-86.
- Romero G., J.O. 2011. Programa de manejo forestal nivel intermedio. Perote, Veracruz. 63 p.
- Sedjo, R.A. 1990. ¿The global carbon cycle: are the forest the missin sink? *Journal of Forestry* 88 (10): 33-34.
- Smith, R. L. y T. M. Smith. 2001. Ecología. Ed. Pearson. 4º edición. Madrid, España. 642p.
- Snowdon, P., J. Raison, H. Keith, P. Ritson, P. Grierson, M. Adams, K. Montagu, H. Bi, W. Burrows and D. Eamus. 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass. National carbon accounting system technical report No. 31. Australian Greenhouse Office. Australian. 114 p.
- Vázquez G., V. 2013. Género y bosques. Temas y enfoques en la literatura internacional. *Revista Mexicana de Ciencias Forestale* 4(16): 10-21.
- Vigil, N. N. 2010. Estimación de biomasa y contenido de carbono en *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. en el campo forestal experimental "Las Cruces", Texcoco, México. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Forestales, Chapingo. Universidad Autónoma Chapingo. México. 61 p.
- Villegas-Jiménez, D.E., G. Rodríguez-Ortiz, , V.A. Velasco-Velasco, J. Ruiz-Luna, J.C. Carrillo-Rodríguez y S.E. Ramírez-Sánchez. 2013. Partición de biomasa aérea en procedencias de *Pinus greggii* plantadas en el sur de México. *Revista Fitotecnía Mexicana* 36 (4): 421-427.

## 10. ANEXOS

### Anexo 1. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de pino.

Especie	Ecuación	Lugar de estudio	Referencia
<i>Pinus durangensis</i>	$B = 3.6406 \cdot DN^{0.7429}$	Durango	Montes de Oca-Cano <i>et al.</i> (2009)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = 5.4961 \cdot DN^{2.4123}$	Durango	Montes de Oca-Cano <i>et al.</i> (2009)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = 3.8048 \cdot DN^{2.9340}$	Durango	Montes de Oca-Cano <i>et al.</i> (2009)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = 8.9546 \cdot DN^{2.9123}$	Durango	Montes de Oca-Cano <i>et al.</i> (2009)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = 0.1382 \cdot DN^{2.3573}$	Chihuahua Durango	Návar (2009)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = 0.0175 \cdot DN^{2.5739}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = \text{Exp}^{-3.532} \cdot DN^{2.731}$	Chihuahua	Návar (2010)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = \text{Exp}^{-3.416} \cdot DN^{2.715}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = \text{Exp}^{-2.084} \cdot DN^{2.323}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = \text{Exp}^{-2.108} \cdot DN^{2.373}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus durangensis</i>	$B = 0.1314 \cdot DN^{2.2815}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus greggii</i>	$B = 6426.6 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}^2 + 291.42 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}$	Hidalgo	Pacheco <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus greggii</i>	$B = 3887.7 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}^2 + 147.36 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}$	Hidalgo	Pacheco <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus greggii</i>	$B = 0.6391 + 0.0014 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}$	Coahuila	Aguilar (2009)
<i>Pinus greggii</i>	$B = -3.193 + 0.0256 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}$	Coahuila	Aguilar (2009)
<i>Pinus greggii</i>	$B = 0.401 + 0.0066 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}$	Coahuila	Aguilar (2009)
<i>Pinus greggii</i>	$B = -867.23 + 57.34 \cdot DN^2$	Coahuila	Mora (2010)

<i>Pinus greggii</i>	$B = 10954 + (-2557.15) \cdot DN + 169.04 \cdot DN^2$	Coahuila	Mora (2010)
<i>Pinus greggii</i>	$B = 29607 + (-293.44) \cdot DN^2 + (-46.21) \cdot Alt + 0.75 \cdot DN^2 \cdot Alt$	Coahuila	Mora (2010)
<i>Pinus hartwegii</i>	$B = 0.0635 \cdot DN^{2.4725}$	Estado de México	Jiménez (2010)

#### Anexo 1. Continuación

<i>Pinus hartwegii</i>	$B = 0.0309 \cdot DN^{2.4722}$	Estado de México	Jiménez (2010)
<i>Pinus patula</i>	$B = \text{Exp}^{-4.45555 \cdot DN^{2.33251}}$	Puebla	Castellanos <i>et al.</i> (1996)
<i>Pinus patula</i>	$B = \text{Exp}^{-3.19559 \cdot DN^{2.02051}}$	Puebla	Castellanos <i>et al.</i> (1996)
<i>Pinus patula</i>	$B = \text{Exp}^{-2.06082 \cdot DN^{2.30026}}$	Puebla	Castellanos <i>et al.</i> (1996)
<i>Pinus patula</i>	$B = \text{Exp}^{-1.8621 \cdot DN^{2.27675}}$	Puebla	Castellanos <i>et al.</i> (1996)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.0485 \cdot DN^{2.3988}$	Tlaxcala	Díaz (2005)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.0948 \cdot DN^{2.4079}$	Tlaxcala	Díaz (2005)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.0357 \cdot DN^{2.6916}$	Tlaxcala	Díaz-Franco <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.021 \cdot DN^{2.6451}$	Tlaxcala	Díaz-Franco <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.407073 \cdot DN^{2.02617}$	Tamaulipas	Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> (2009)
<i>Pinus patula</i>	$B = 29.440 \cdot \text{Exp}^{-26.519/DN}$	Hidalgo	Figuerroa <i>et al.</i> (2010)
<i>Pinus patula</i>	$B = 5.338 + 18.634 \cdot DN^2 \cdot Alt$	Hidalgo	Figuerroa <i>et al.</i> (2010)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.1483 \cdot DN^{1.3707}$	Oaxaca	Pacheco (2011)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.0262 \cdot Dn^{2.6419}$	Oaxaca	Pacheco (2011)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.0514 \cdot Dn^{2.5222}$	Oaxaca	Pacheco (2011)
<i>Pinus patula</i>	$B = 0.0019 \cdot Dn \cdot Alt^{1.98}$	Oaxaca	Rodríguez-Ortiz <i>et al.</i> (2012)
<i>Pinus pinceana</i>	$B = -1.8492 \cdot DN^{2.0374}$	Zacatecas	Jiménez (2013)
<i>Pinus arizonica</i>	$B = 0.0063 \cdot DN^{2.8284}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus arizonica</i>	$B = 0.0819 \cdot DN^{2.4293}$	Chihuahua,	Návar (2009)

		Durango	
<i>Pinus arizonica</i>	$B = 0.0992 \cdot DN^{2.2674}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus arizonica</i>	$B = \text{Exp}^{-1.482 \cdot DN^{2.129}}$	Chihuahua	Návar (2010)
<i>Pinus arizonica</i>	$B = \text{Exp}^{-3.573 \cdot DN^{2.746}}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus arizonica</i>	$B = \text{Exp}^{-0.877 \cdot DN^{1.98}}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus ayacahuite</i>	$B = 0.058 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}^{0.919}$	Chiapas	Ayala (1998)
<i>Pinus ayacahuite</i>	$B = 0.2893 \cdot DN^{2.1569}$	Durango	Návar (2009)
<i>Pinus ayacahuite</i>	$B = 0.6437 \cdot DN^{1.6020}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus ayacahuite</i>	$B = 0.0690 \cdot DN^{2.4515}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)

Anexo 1. Continuación.

<i>Pinus ayacahuite</i>	$B = \text{Exp}^{-3.066 \cdot DN^{2.646}}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus cembroides</i>	$B = \text{Exp}^{0.5474 \cdot DN^{0.9738}}$	Zacatecas	Guerrero (2013)
<i>Pinus cembroides</i>	$B = \text{Exp}^{-0.3712 \cdot DN^{1.2663}}$	Zacatecas	Guerrero (2013)
<i>Pinus cembroides</i>	$B = \text{Exp}^{0.9173 \cdot DN^{1.0730}}$	Zacatecas	Guerrero (2013)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.058 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}^{0.919}$	Chiapas	Ayala (1998)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.537 \cdot DN^{1.882}$	Nuevo León	Domínguez (2005)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 2354.14 \cdot \text{Exp}^{-57.453/DN} + 1.3$	Nuevo León	Aguirre <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = \text{Exp}^{-3.1641 \cdot DN^{2.5996}}$	Nuevo León	Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 2354.14 \cdot \text{Exp}^{-57.453/DN} + 1.3$	Nuevo León	Domínguez-Cabrera <i>et al.</i> 2009
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.128495 \cdot DN^{2.36444}$	Tamaulipas	Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> (2009)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = \text{Exp}^{-2.611 \cdot DN^{2.531}}$	Durango	Návar (2010)



<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.35179 \cdot DN^2$	Nuevo León	Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.001 \cdot DN^{3.954}$	Guanajuato	Méndez-González <i>et al.</i> (2011)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.007 \cdot DN^{2.975}$	Guanajuato	Méndez-González <i>et al.</i> (2011)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.003 \cdot DN^{3.383}$	Guanajuato	Méndez-González <i>et al.</i> (2011)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 7027 \cdot DN^{2.1924}$	Estado de México	Palma (2011)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 3553.1 \cdot DN^{2.2245}$	Estado de México	Palma (2011)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = 0.0455389 \cdot DN^2 \cdot Alt^{0.9256}$	Estado de México	Palma (2011)
<i>Pinus engelmannii</i>	$B = 0.2883 \cdot DN^{1.7343}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus engelmannii</i>	$B = 0.0348 \cdot DN^{2.5893}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus engelmannii</i>	$B = 0.1354 \cdot DN^{2.3033}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus herrerae</i>	$B = 0.2883 \cdot DN^{1.7343}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)

Anexo 1. Continuación.

<i>Pinus herrerae</i>	$B = 0.0348 \cdot DN^{2.5893}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus herrerae</i>	$B = 0.1354 \cdot DN^{2.3033}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus teocote</i>	$B = 0.508 \cdot DN^{1.933}$	Nuevo León	Domínguez (2005)
<i>Pinus teocote</i>	$B = 2543.055 \cdot \text{Exp}^{-56.209 / DN + 1.3}$	Nuevo León	Aguirre <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus teocote</i>	$B = 2543.05 \cdot \text{Exp}^{-56.209 / DN + 1.3}$	Nuevo León	Domínguez-Cabrera <i>et al.</i>

			(2009)
<i>Pinus teocote</i>	$B = 0.4452 \cdot DN^{1.7682}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus teocote</i>	$B = 0.0274 \cdot DN^{2.6928}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus teocote</i>	$B = 0.032495 \cdot DN^{2.76658}$	Tamaulipas	Rodríguez- Laguna <i>et al.</i> (2009)
<i>Pinus teocote</i>	$B = \text{Exp}^{-3.182} \cdot DN^{2.702}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus teocote</i>	$B = 0.40196 \cdot DN^2$	Nuevo León	Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011)
<i>Pinus leiophylla</i>	$B = 0.0255 \cdot DN^{2.5507}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus leiophylla</i>	$B = 0.1855 \cdot DN^{2.1017}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus leiophylla</i>	$B = 0.1751 \cdot DN^{2.2629}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus leiophylla</i>	$B = \text{Exp}^{-3.549} \cdot DN^{2.787}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus leiophylla</i>	$B = \text{Exp}^{-3.039} \cdot DN^{2.523}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus cooperi</i>	$B = 22.3476 + 4.9470 \cdot DN + 0.4911 \cdot DN^2 + 0.0039 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}$	Durango	Pimienta <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus cooperi</i>	$B = 11.509 + (-3.1229) \cdot DN + 0.31 \cdot DN^2 + 0.0004 \cdot DN^2 \cdot \text{Alt}$	Durango	Pimienta <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus cooperi</i>	$B = 0.0254 \cdot DN^{2.4828}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus cooperi</i>	$B = 0.1899 \cdot DN^{2.2270}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus cooperi</i>	$B = 0.2018 \cdot DN^{2.2907}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus cooperi</i>	$B = \text{Exp}^{-1.922} \cdot DN^{2.321}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus cooperi</i>	$B = \text{Exp}^{-3.264} \cdot DN^{2.707}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus devoniana</i>	$B = 0.156 \cdot DN^{1.808}$	Guanajuato	Méndez- González <i>et al.</i> (2011)
<i>Pinus devoniana</i>	$B = 0.044 \cdot DN^{2.117}$	Guanajuato	Méndez- González <i>et al.</i> (2011)

Anexo 1. Continuación.

<i>Pinus oocarpa</i>	$B = 0.058 \cdot DN^2 \cdot Alt^{0.919}$	Chiapas	Ayala (1998)
<i>Pinus oocarpa</i>	$B = -10.4113 + 5.3998 \cdot DN + 0.8144 \cdot DN^2$	Chiapas	González (2008)
<i>Pinus oocarpa</i>	$B = 0.2883 \cdot DN^{1.7343}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus oocarpa</i> , <i>Pinus engelmannii</i> , <i>Pinus herrerae</i>	$B = 0.2883 \cdot DN^{1.7343}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus oocarpa</i> , <i>Pinus engelmannii</i> , <i>Pinus herrerae</i>	$B = 0.0348 \cdot DN^{2.5893}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus oocarpa</i>	$B = 0.0348 \cdot DN^{2.5893}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus oocarpa</i>	$B = 0.1354 \cdot DN^{2.3033}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus oocarpa</i> , <i>Pinus engelmannii</i> , <i>Pinus herrerae</i>	$B = 0.1354 \cdot DN^{2.3033}$	Chihuahua, Durango	Návar (2009)
<i>Pinus oocarpa</i>	$B = \text{Exp}^{-3.065 \cdot DN^{2.625}}$	Durango	Návar (2010)
<i>Pinus maximinoi</i>	$B = 0.3780 \cdot DN^{2.1064}$	Chiapas	González (2008)
<i>Pinus oaxacana</i>	$B = 0.058 \cdot DN^2 \cdot Alt^{0.919}$	Chiapas	Ayala (1998)
<i>Pinus montezumae</i>	$B = 0.058 \cdot DN^2 \cdot Alt^{0.919}$	Chiapas	Ayala (1998)
<i>Pinus montezumae</i>	$B = 0.013 \cdot DN^{3.046}$	Estado de México	Bonilla (2009)
<i>Pinus montezumae</i>	$B = 0.006 \cdot DN^{3.038}$	Estado de México	Bonilla (2009)
<i>Pinus montezumae</i>	$B = 1.30454 \cdot DN^{1.73099}$	Tamaulipas	Rodríguez- Laguna <i>et al.</i> (2009)

**Anexo 2. Ecuaciones alométricas para estimar el contenido de carbono en especies de coníferas.**

<b>Especie</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Lugar de estudio</b>	<b>Referencia</b>
<i>Pinus hartwegii</i>	$C = 0.0309 \cdot DN^{2.4722}$	Estado de México	Jiménez (2010)
<i>Pinus hartwegii</i>	$C = -43.271 + 8.5861 \cdot DN + 0.11843 \cdot DN^2 + 0.017832 \cdot DN^2 \cdot DN$	Estado de México	Moreno (2010)
<i>Pinus hartwegii</i>	$C = 0.030 \cdot DN^{2.472}$	Estado de México	Carrillo <i>et al.</i> (2016)
<i>Pinus patula</i>	$C = 0.0485 \cdot DN^{2.3988}$	Tlaxcala	Díaz (2005)
<i>Pinus patula</i>	$C = 0.021 \cdot DN^{2.6451}$	Tlaxcala	Díaz-Franco <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus montezumae</i>	$C = 0.0065 \cdot DN^{3.0484}$	Estado de México	Carrillo <i>et al.</i> (2014)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$C = 0.0192922 \cdot DN^{2*} \cdot Alt^{0.9392}$	Estado de México	Palma (2011)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$C = 0.126359 \cdot DN^{2.2245}$	Estado de México	Palma (2011)
<i>Pinus montezumae</i>	$C = 0.006 \cdot DN^{3.038}$	--	Bonilla (2009)
<i>Pinus greggii</i> Engelm.	$C = 3287.7 \cdot DN^2 + 147.36 \cdot Alt$	Hidalgo	Pacheco <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus cooperi</i> Blanco	$C = 11,5090 + (-3,1229) \cdot DN + 0,3100 \cdot DN^2 + 0,0004 \cdot DN^2 \cdot Alt$	Durango	Pimienta <i>et al.</i> (2007)
<i>Pinus pringlei</i> Shaw	$C = 0.1931 \cdot DN^2 - 2.089 \cdot DN + 5.588$	Estado de México polinómica	García <i>et al.</i> (2015)
<i>Abies religiosa</i>	$0.035 \cdot DN^{2.513}$	Tlaxcala	Avendaño (2006)
<i>Abies religiosa</i>	$C = 0.0332 \cdot DN^{2.5104}$	Tlaxcala	Avendaño <i>et al.</i> (2009)
<i>Abies religiosa</i>	$C = 0.029083 \cdot DN^{2.38322}$	Hidalgo	Razo-Zárate <i>et al.</i> (2013)
<i>Abies religiosa</i>	$C = 0.031 \cdot DN^{2.595}$	Hidalgo	Rodríguez-Sánchez y Calva-Vásquez (2014)
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl	$C = 0.2637 \cdot DN^{1.7698}$	Estado de México	Vigil (2010)

**Anexo 3. Comparación de estudios de biomasa y carbono en especies de pinos.**

<b>Autor (es)</b>	<b>Localidad</b>	<b>Especie</b>	<b>Biomasa Mg/ha<sup>-1</sup></b>	<b>Carbono Mg/ha<sup>-1</sup></b>
González, 2008	Coapilla, Chiapas	<i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore	161.97	80.98
González, 2008	Coapilla, Chiapas	<i>P. oocarpa</i> var. <i>Ochoterenai</i> Mtz.	142.23	71
Chávez-Aguilar <i>et al.</i> (2016)	Zacualtipán, Hidalgo	<i>P. patula</i>	178.1	--
Acosta-Mireles <i>et al.</i> (2009)	Tlaxcala	<i>P. patula</i>	--	75.30
Aguirre-Salado <i>et al.</i> (2009)	--	<i>P. patula</i>	50	25.00
Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, (2011)	Nuevo león	<i>P. pseudostrobus</i>	--	73.18
Fragoso, 2003	Michoacán	<i>P. pseudostrobus</i>	--	19.00
Villegas-Jiménez <i>et al.</i> (2013)	Oaxaca	<i>P. greggii</i>	25.6	--
Pimienta <i>et al.</i> (2007)	Durango	<i>P. cooperi</i> Blanco	98.1	51.12
Castañeda-González <i>et al.</i> (2012)	Jalisco	<i>P. oocarpa</i>	40.43	20.20
Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> (2009)	Tamaulipas	<i>P. teocote</i>	41.5	--
Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, (2011)	Nuevo León	<i>P. teocote</i>	--	47.01
Rojas-García y Villers-Ruíz, (2008)	Tlaxcala-Puebla	<i>P. hartwegii</i>	233.61	--
Rojas, 2004	Tlaxcala-Puebla	<i>P. hartwegii</i>	--	100
Espinoza, (2005)	CD. México	<i>P. hartwegii</i>	--	44.00
Galeana-Pizaña <i>et al.</i> (2013)	CD. México	<i>P. hartwegii</i> (Densidad cerrada)	--	47.37
Galeana-Pizaña <i>et al.</i> (2013)	CD. México	<i>P. hartwegii</i> (Densidad abierta)	--	21.21

