

**CUANTIFICACION DE LA CAPACIDAD DE CAPTURA DE CARBONO POR LA  
ESPECIE *Pinus tecunumanii* (Schw.) Equilus et Perry BAJO CONDICIONES DE OFERTA  
AMBIENTAL DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA\***

**QUANTIFICATION OF THE CAPACITY OF CARBON CAPTURE BY *Pinus tecunumanii*  
(Schw.) Equilus et Perry UNDER ENVIROMENTAL CONDITIONS OF COFFEE  
COLOMBIAN ZONE\***

Tatiana M. Saldaña V.<sup>1</sup>  
Néstor M. Riaño H.<sup>2</sup>  
Diego Obando B.<sup>3</sup>  
Tulio C. Lagos B.<sup>4</sup>

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo se oriento hacia la determinación del patrón arquitectural y la dinámica en la acumulación de la biomasa y el carbono en cada uno de los órganos constituyentes en la especie *P. tecunumanii*. Este trabajo se realizó en plantaciones comerciales de diferentes edades de Smurfit Kappa Cartón de Colombia S.A., en los municipios de Salento (Quindío), Pereira (Risaralda) y Riosucio (Caldas). Se tomaron mediciones relacionadas con el peso fresco del tallo, raíz, ramas, hojas, diámetro normal, longitud del tallo y necromasa. Se encontró que la arquitectura del dosel de *P. tecunumanii* es de tipo plagiófila y que el crecimiento y acumulación de biomasa se ajusta a un modelo sigmoidal asintótico de tipo  $y = a/[1 + e^{(x-x_0)/b}]$ . La mayor acumulación se presenta en el tallo, seguido por la raíz. El mayor contenido de carbono se encuentra en la corteza del tallo y la necromasa en sus diferentes compartimientos presenta cantidades importantes de carbono almacenado, que van desde 0,176 t/CO<sub>2</sub>-eq/ha, hasta 353 t/CO<sub>2</sub>eq/ha

**Palabras claves:** Pino, arquitectura, biomasa, necromasa, servicios ambientales.

**ABSTRACT**

The aim of this study was oriented to determine the architectural pattern and dynamics in the accumulation of the biomass and carbon in each organ in the specie *P. tecunumanii*. This work was

---

\* Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de Ingeniera Agrónoma. 2010

<sup>1</sup> Estudiante Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño. Pasto, Colombia. e-mail: tatianamaria.sv@gmail.com

<sup>2</sup> Ingeniero Agrónomo. Ph.D. Investigador Científico III. Líder Disciplina Fisiología Vegetal. Centro Nacional de Investigaciones de Café. CENICAFÉ. Manizales, Colombia. e-mail: nestorm.riano@cafedecolombia.com

<sup>3</sup> Ingeniero Forestal. Investigador Asociado. Disciplina Fisiología Vegetal. Centro Nacional de Investigaciones de Café. CENICAFÉ. Manizales, Colombia. e-mail: diego.obando@cafedecolombia.com

<sup>4</sup> Ingeniero Agrónomo. Ph.D. Decano Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. Pasto, Colombia. e-mail: tclagos3@yahoo.com

carried out in commercial plantations of different ages of Smurfit Kappa Carton de Colombia SA, in the municipalities of Salento (Quindío), Pereira (Risaralda) and Riosucio (Caldas). Measurements were related to fresh weight of shaft, root, branches, leaves, normal diameter, longitude of shaft length and necromass. The architecture of the canopy of *P. tecunumanii* is plagiófila and the growth and the accumulation of biomass is adjusted by a sigmoidal asymptotic model like:  $y = a / [1 + e^{-(x - x_0) / b}]$ . The highest accumulation occurs in the shaft, followed by the root. The high content of carbon was found in the bark of the shaft and its different compartments of necromass presents significant amounts of carbon stored, ranging from 0.176 t/CO<sub>2</sub>-eq/ha, to 353 t/CO<sub>2</sub>eq/ha

**Key Words:** Pine, architecture, biomass, necromass, environmental services.

## INTRODUCCIÓN

El calentamiento global es un fenómeno ambiental que genera preocupación por las consecuencias sobre los ecosistemas, los sistemas productivos, el desarrollo económico y social y aún sobre la supervivencia de las especies, incluida la humana. Las causas se atribuyen de un lado a la evolución biogeoquímica del planeta y de otro lado a las acciones antrópicas. Las estrategias para mitigar y adaptarse a este fenómeno, se pueden considerar como oportunidades para la generación de crecimiento y desarrollo sostenible en los países en desarrollo (Lash y Wellington, 2007).

Desde comienzos de la revolución industrial se han incrementado las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI). El más importante de estos es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que participa con más del 50% en las emisiones totales, siendo sus fuentes principales el uso de combustibles fósiles y los cambios en el uso del suelo, sobre todo por deforestación y explotación de madera no sustentable (Eguren, 2004). El aumento de los GEI ha elevado la temperatura media global en los últimos 100 años en alrededor de 0,6°C. Este aumento afecta entre otros factores el incremento espacial y temporal de la sequía, la prolongación de los períodos de lluvias y sus consecuentes inundaciones, descongelamientos de las masas de hielo y aumento del nivel de los mares. De continuar el actual nivel de emisiones, en los próximos 100 años la temperatura media podrá aumentar entre 3 a 6°C y el nivel de los mares aumentará entre 0,4 a 1 m (Sabogal, 2007).

Todos estos cambios han impactando dramáticamente a los ecosistemas naturales, a los distintos sectores de la economía y a las sociedades en general, y de no mediar esfuerzos para su mitigación, se

podría poner en peligro la vida sobre la tierra (Defoseé y Loguercio, 2004). Por lo anterior, según lo acordado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1997 y particularmente en el Protocolo de Kyoto (PK), los países desarrollados se comprometieron a reducir en un 5,2% la emisión de los GEI, con respecto a la producida en 1990, con un período de cumplimiento pactado entre el 2008 y el 2012. Para lograr dicho cumplimiento, el PK implementó tres mecanismos: el comercio de derecho de emisiones, el de implementación conjunta y el mecanismo de desarrollo limpio (MDL). Los dos primeros pueden ser utilizados únicamente por los países con compromisos y el último permite vincular países con y sin compromisos, es decir desarrollados y en vías de desarrollo (Rodríguez y Ramírez, 2008).

El MDL conduce a que países con compromisos de reducción de los GEI, inviertan recursos en países en vía de desarrollo, entre otros para el establecimiento de plantaciones de especies que tengan un alto potencial de fijación del CO<sub>2</sub> atmosférico a través de la fotosíntesis. La síntesis de la materia orgánica a través de la fotosíntesis en un ecosistema, es llamada producción bruta. Las plantas utilizan una parte de los fotoasimilados ricos en energía en la respiración, el resto es incorporado estructuralmente en los diferentes órganos que componen la planta (Ordoñez, 1998).

El CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera es la única fuente de carbono para las plantas y la mayor parte de éste termina convirtiéndose en celulosa. Una vez que el CO<sub>2</sub> atmosférico, es incorporado a los procesos metabólicos, éste participa en la composición de materias primas como la glucosa para formar todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (Brown, 1997). El árbol al crecer incrementa el desarrollo y el crecimiento de sus estructuras vegetativas y reproductivas. Los productos provenientes de la madera tienen un tiempo de vida determinado después del cual, se degradan aportando carbono al suelo y CO<sub>2</sub> producto de su descomposición a la atmósfera (Ordoñez, 1999). Finalmente, durante el tiempo en el que el carbono se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y hasta que es remitido a la atmósfera, se considera que se encuentra almacenado (Ordoñez y Masera, 2001).

La biomasa vegetal se define como el peso equivalente de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema por encima y por debajo del suelo. En el caso de las especies forestales, es común separarla en componentes correspondientes a la masa del tallo, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta. A su vez, puede ser clasificada como biomasa aérea, biomasa subterránea

o hipogea, la que incluye fundamentalmente el sistema radical y biomasa muerta o necromasa compuesta por árboles muertos y detritos acumulados en la superficie. La acumulación de biomasa está fuertemente influenciada por el área foliar, el ángulo de inserción de las hojas, la eficiencia en el uso de la radiación que depende de la vía de fijación del CO<sub>2</sub>, de la naturaleza de la biomasa formada y de cualquier factor interno o externo que afecte la tasa fotosintética de las hojas (estrés hídrico, disponibilidad de nutrientes, temperatura) (Rodríguez y Jiménez, 1989; Schlegel *et al*, 2000 y Hall, 2001).

Williams (1987) afirma que los componentes principales de la materia seca son polisacáridos de la pared celular y lignina, además de componentes del protoplasma, incluyendo proteínas, lípidos, aminoácidos, ácidos orgánicos y minerales. Para algunas especies forestales, diferentes autores han trabajado en mediciones de acumulación de carbono. Lopera y Gutiérrez (2000) encontraron valores de carbono para *Pinus patula* de 51,2% para madera, 56,6% para corteza lignificada y 49,0% para corteza no lignificada, 50,7% y 51,1% para ramas principales y terminales, 51,9% para conos, 50,3% para hojarasca fina, 51,6% en necromasa fina y 48,7% en necromasa gruesa.

Acorde con lo anterior, esta investigación tuvo como objetivos determinar el patrón arquitectural y establecer la dinámica en la acumulación de la biomasa y el carbono en cada uno de los órganos constituyentes en la especie *P. tecunumanii*.

## MATERIALES Y METODOS

**Localización.** El trabajo de campo se llevó a cabo en las plantaciones forestales de *P. tecunumanii* (Tabla 1) pertenecientes a la Empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia S.A., cuyas edades oscilan entre 1 y 15 años.

**Tabla 1.** Localización de las plantaciones de *Pinus tecunumanii*, donde se llevó a cabo la cubicación de los arboles

Departamento	Municipio	Finca	Lote	Año de Siembra	Edad (Años)
Quindío	Salento	Delicias	19	2008	1
Risaralda	Pereira	El Cedral	34	2006	3
Caldas	Riosucio	La Soledad	29	2005	4
Quindío	Salento	Mediaciones	6	2000	9
Quindío	Salento	Andes	20	1994	15

El procesamiento de las muestras de cada componente y el análisis del contenido de carbono se realizaron en el laboratorio de Fisiología Vegetal del Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFÉ en Manizales (Caldas).

**Selección de parcelas e individuos muestreados.** Para delimitar las parcelas de muestreo, se tomó aleatoriamente un árbol como centro y a partir de él se extendió una cuerda de 8,92 m para lograr un área circular de 250 m<sup>2</sup>. Todos los árboles dentro de la parcela fueron marcados y a cada uno se les midió el diámetro normal ( $d_n$ ) en cm. Posteriormente, se calculó el área basal de cada árbol ( $G_{xi}$ ) a través de la función:  $G_{xi} = \frac{\pi}{4} (d_n^2)$ , donde, el área basal de la parcela (G) se calcula mediante  $G = \sum G_{xi}$ . Una vez se obtiene el área basal (G) por parcela, se divide por el número de árboles de la misma, con lo cual se calcula el área basal promedio ( $G_{yi}$ ). De esta se despeja el diámetro cuadrático ( $d_{qx}$ ) de la fórmula:  $G_{xi} = \frac{\pi}{4} (d_{qx}^2)$ . Entonces el diámetro cuadrático es igual a:  $d_{qx} = \sqrt{\frac{\sum G_{xi}}{\frac{\pi}{4}}}$ .

El árbol seleccionado para el muestreo de biomasa en la parcela es aquel cuyo diámetro normal se aproximó más al diámetro cuadrático ( $d_{qx}$ ) (Riaño *et al.*, 2005).

**Determinación de la acumulación de necromasa en plantaciones de *P. tecunumanii*.** La necromasa asociada a cada una de las parcelas y edades estudiadas se determinó mediante la metodología descrita por Riaño (2005). Ésta se clasificó en: gruesa (>10 cm de diámetro), fina (entre 2,5 y 10 cm de diámetro) y muy fina u hojarasca (<2,5 cm de diámetro). La primera fue recolectada en toda el área de la parcela (250 m<sup>2</sup>), la necromasa fina en una subparcela de la primera con 100 m<sup>2</sup> y por último, la hojarasca en tres subparcelas de 0,25 m<sup>2</sup>. Además, se registró el peso fresco de cada una de las categorías de necromasa y se tomaron muestras de 250 g para determinar el peso seco y el contenido de carbono.

**Acumulación y distribución de la biomasa en arboles de *P. tecunumanii*.** Antes de apearse el árbol se midió el diámetro de proyección de la copa en dirección Oriente - Occidente y Norte - Sur. Luego se midió la longitud total y longitud comercial del tallo, se marcaron y enumeraron 10 secciones iguales y se establecieron los 11 diámetros respectivos desde la base hasta el ápice, cortando el tallo en las secciones marcadas. Con estos datos, se calculó el volumen total del tallo, a través de la fórmula conocida como Volumen del cono truncado, que se expresa así:  $V = \frac{1}{3} * \pi * h (R^2 + r^2 + Rr)$ ,

donde  $h$  = altura,  $R$  = radio mayor,  $r$  = radio menor. Posteriormente, se obtuvo el índice de forma del tallo por medio de la relación entre el volumen del cono truncado y el volumen del cilindro, dado por  $V = \pi * r^2 * h$ , teniendo en cuenta los valores de DAP y la altura total del árbol (Obando, 2003).

Para determinar la arquitectura, la copa de la planta se dividió en tres estratos: superior, medio e inferior. En cada estrato se seleccionaron tres ramas aleatoriamente y se les midió el ángulo de inclinación utilizando un compás – transportador; igualmente, se midió el ángulo de inclinación foliar en 20 acículas seleccionadas aleatoriamente en cada una de ramas medidas. Se retiraron y pesaron todas las acículas y ramas de la copa, luego se tomó una muestra de 250 g de cada uno de estos componentes.

El tallo se dividió en las 10 secciones marcadas, a cada sección se le tomó el peso y se midió el espesor de corteza con un pie de rey; luego, de la parte inferior de las trozas enumeradas: 2, 5 y 8 se tomó una muestra (rodela) de aproximadamente 5 cm de espesor, las cuales fueron pesadas con y sin corteza. De estas muestras se obtuvo el peso seco en g. La raíz fue extraída en un área igual a la proyección de copa, tratando de sacar la mayor parte de ésta a una profundidad de un metro. Las raíces extraídas se dividieron en gruesas (>3 cm de diámetro) y finas (<3 cm de diámetro). Se pesaron individualmente y se obtuvo una muestra de 250 g por cada categoría. Las muestras se codificaron y empaquetaron. Luego se secaron a 65°C hasta que alcanzaron un peso seco constante. Una vez obtenido éste valor y por la diferencia de éste con el peso fresco, se cuantificó el contenido de humedad en los diferentes componentes. Estas muestras se trituraron y se molieron en el molino Wiley hasta lograr un polvo fino, que fue utilizado para la determinación del contenido de carbono (CC) (Riaño *et al.*, 2005).

**Contenido de carbono (CC) en los tejidos.** De cada muestra seca y molida se tomó una submuestra de 0,1 g que fue colocada en cápsulas de inyección, para ser depositadas en el automuestreador del analizador elemental Leco – CHN TrueSpec (*Leco Co. USA*), que permite una determinación rápida y precisa de carbono, nitrógeno e hidrógeno expresados en porcentaje. El sistema se basa en el método de Pregl-Dumas, en el cual las muestras son puestas en combustión en presencia de oxígeno puro y los gases generados en máximo nivel de oxidación, son separados y leídos por detectores de infrarrojo y de conductividad.

**Calculo del tiempo térmico.** Adicionalmente, se hizo uso de la información histórica y actual de estaciones meteorológicas en el área de influencia de las plantaciones de las variables climáticas: temperatura mínima diaria, temperatura máxima diaria, brillo solar diario, precipitación diaria, humedad relativa y evaporación. Con las dos primeras variables, se calcula el tiempo térmico diario (Grados día acumulados - °D<sub>acum</sub>) hasta la fecha de muestreo, de acuerdo con Lovatt *et al.* (1984).

**Análisis de los datos.** Se midieron las variables de respuesta en cinco árboles por edad para un total de 25 individuos. Estas variables corresponden a los pesos frescos y secos de raíz, tallo, rama, acículas y corteza, diámetro normal, altura y volumen. Utilizando el tiempo térmico y el tiempo cronológico como variables independientes se ajustaron modelos empíricos no lineales para describir la relación con cada una de las variables dependientes. Con la ayuda del programa MSEXcel 2007 se crearon las bases de datos y los modelos matemáticos se realizaron con el software SigmaPlot V.11.

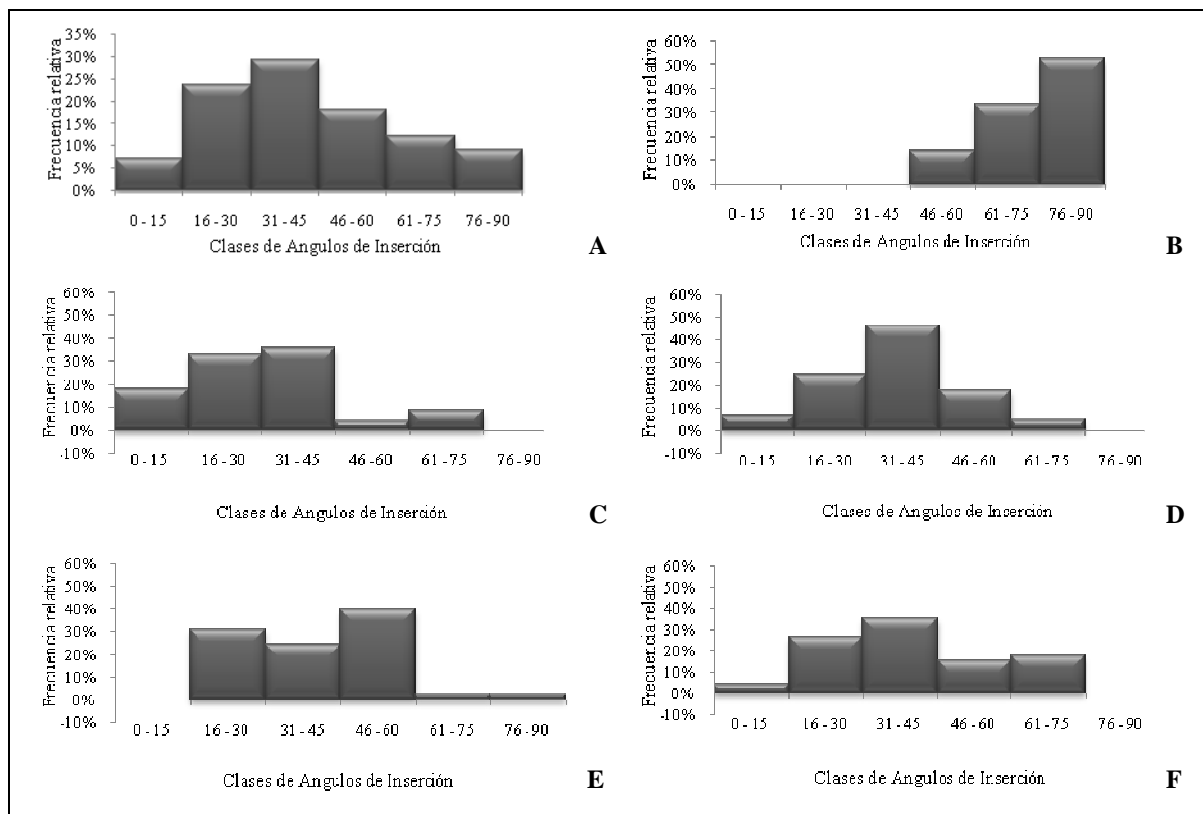
Los CC acumulados por la planta se discriminaron por componente del árbol y se expresaron en peso y en porcentaje. Finalmente, con los modelos obtenidos se estimaron los contenidos totales de carbono en la plantación. Se debe tener en cuenta que para efectos de la venta de los certificados de emisiones reducidas (CER), el carbono fijado en los diferentes componentes del árbol, debe ser expresado como equivalente de CO<sub>2</sub>, para ello es necesario multiplicar el valor del carbono medido por 3.67 que se obtiene de la relación que existe entre el peso molecular del CO<sub>2</sub> (44 g mol<sup>-1</sup>) y el del átomo de C (12 g mol<sup>-1</sup>) (Obando, 2003).

## RESULTADOS Y DISCUSION

**Arquitectura de la planta y orientación del follaje en *P. tecunumanii*.** La orientación del follaje es una de las características del dosel que guarda una estrecha relación con la interceptación de la radiación, puesto que la orientación de las hojas ejerce una marcada influencia sobre la tasa fotosintética de las plantaciones (De Wit, 1965 y Castillo, 1995). Para efectos de clasificación Perry (1988) propone tres clases de orientación de acuerdo con la inclinación foliar: planófila con arreglo foliar principalmente horizontal (0° - 30°), plagiófila con orientación foliar de 45° o entre 31° y 60° y erectófila con arreglo foliar principalmente vertical (61° - 90°). En la Figura 1A se muestra que la mayor frecuencia de los ángulos de inserción de ramas encontrados para *P. tecunumanii* se presenta

entre 31 y 45° con respecto al eje horizontal en toda la copa, es decir que las ramas son de orientación plagiófila.

Solo la edad 1 (Figura 1B) tiene arquitectura de tipo erectófila, es decir, que las ramas presentan ángulos de inserción en su mayoría entre los 76 y 90°. En las siguientes edades se conserva la arquitectura de tipo plagiófila (Figuras 2C-F), donde la mayoría de los ángulos se encuentran cerca a los 45°. Este fenómeno, es inducido por la densidad de la plantación, donde la competencia por luz entre los individuos estimula a las ramas a ubicarse en esta posición en búsqueda de una mayor interceptación de la radiación para la planta.



**Figura 1.** Ángulos de inserción de las ramas en *Pinus tecunumanii* **A.** Ángulos de inserción de las ramas en toda la copa a través del ciclo de evaluación. **B.** Ángulos de inserción de las ramas en la edad 1. **C.** Ángulos de inserción de las ramas en la edad 3. **D.** Ángulos de inserción de las ramas en la edad 4. **E.** Ángulos de inserción de las ramas en la edad 9. **F.** Ángulos de inserción de las ramas en la edad 15

La distribución de las frecuencias de los ángulos de inclinación foliar (acículas) en la especie *P. tecunumanii* dentro de las edades es de orientación plagiófila para el estrato superior y de orientación

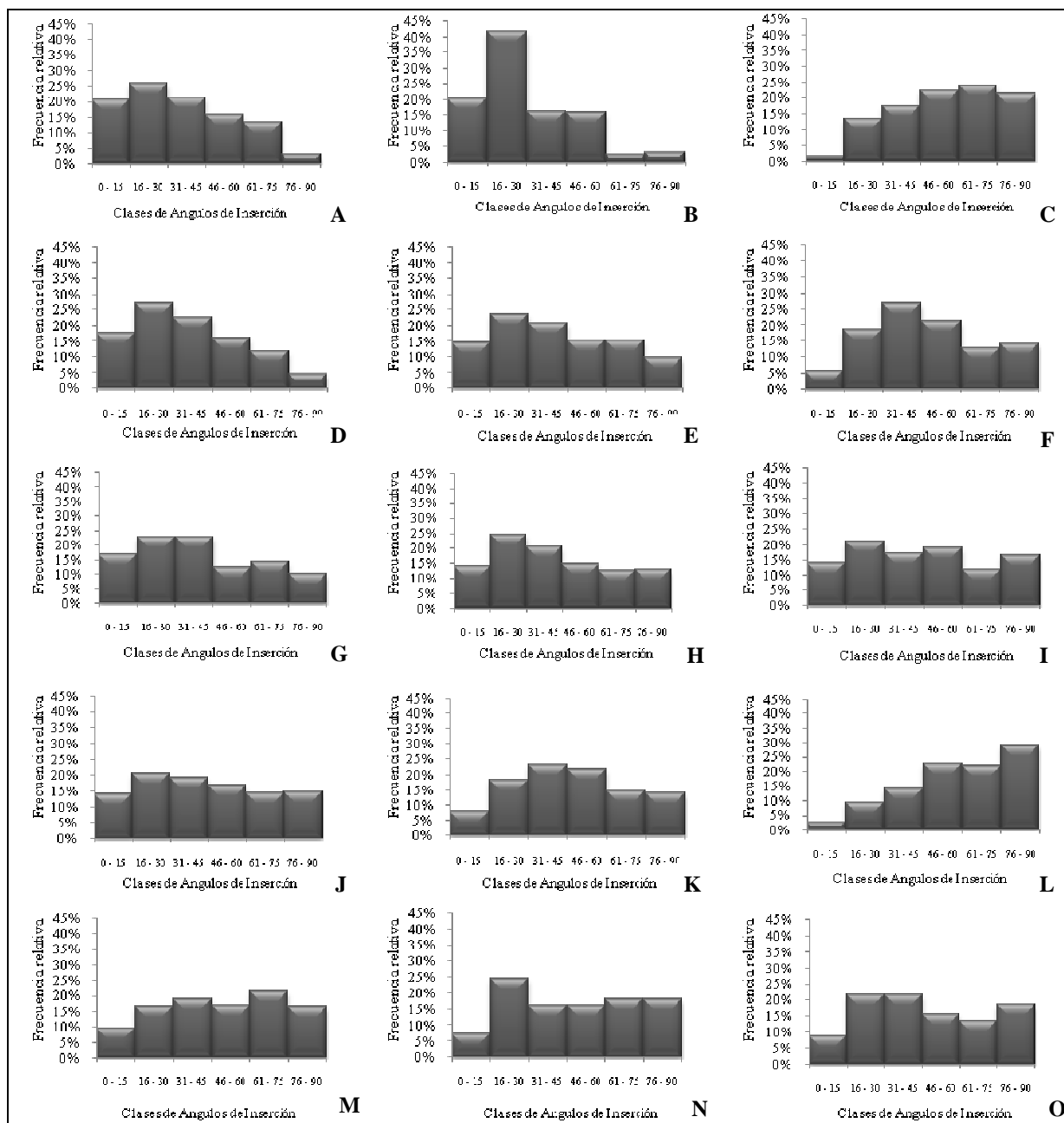


planófila para los estratos medios e inferior de la copa. Es decir, la mayoría de los ángulos de inclinación de las acículas se encuentran entre 0 y 30° con respecto a la horizontal. Este comportamiento concuerda con los resultados de Urrego (2003) para la especie *P. caribaea*, donde sus acículas también presentan una arquitectura plagiófila.

La distribución de los ángulos de inclinación foliar dentro de los tres estratos en los que se dividió la copa, se muestran en la Figura 2. Se observa que en las edades 1, 3 y 4, los estratos inferior y medio presentan arquitectura planófila (Figuras 2A-B-D-E-G-H), donde se presenta la mayor frecuencia de los ángulos entre 0 y 30° con tendencia hacia los 30°. Para las edades 9 y 15 años, en el estrato inferior (Figuras 2J, 2M) se presenta una arquitectura de tipo plagiófila, aunque en este caso la mayor parte de los ángulos tienden a acercarse al menor valor del rango (30°). La arquitectura en el estrato superior en la edad 1 (Figura 2C) es de tipo erectófila, debido a que sus ángulos de inclinación están entre los 60 y 90° respecto a la horizontal, que se explican por la presencia de meristemas apicales en los extremos de las ramas que originan nuevas acículas que aparecen de manera erguida. El mismo tipo de arquitectura erectófila en el estrato superior se presenta en las edades 9 y 15 (Figuras 2L, 2O). La orientación de las acículas bajo este tipo de arquitectura permite que la radiación sea aprovechada también por el follaje de los estratos inferiores.

En las edades 3 y 4, la arquitectura del estrato superior (Figuras 2F, 2I) es de tipo plagiófila, este hecho se debe a que en los lotes evaluados, el área basal es mayor, lo que lleva a una mayor competencia entre individuos por luz solar, ubicando entonces a las acículas de manera menos erecta que en las otras edades y de esa manera captar la mayor cantidad de luz.

El tipo de arquitectura en esta especie es favorable, debido a que la orientación plagiófila y erectófila de la parte superior permite el paso de la luz hacia los estratos inferiores que disponen las acículas de manera más receptiva con ángulos de inclinación menores respecto a la horizontal. Blackman *et al* (1978) propusieron que uno de los arreglos del dosel más eficiente para la producción de materia seca es aquel que posee hojas con tendencia a ser erectas en las capas superiores y llegan a ser progresivamente más horizontales con la profundidad, maximizando la disponibilidad de radiación fotosintéticamente activa.



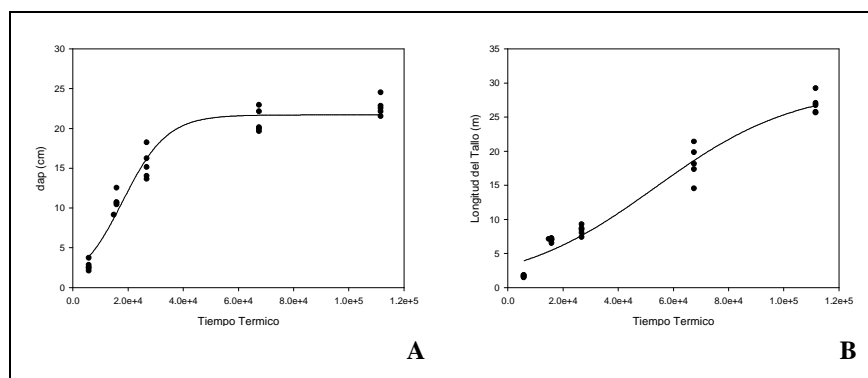
**Figura 2.** Distribución de la frecuencia absoluta de los ángulos de inclinación foliar en *P. tecunumanii*. **A.** Distribución de la frecuencia absoluta en la edad 1, estrato inferior. **B.** Distribución de la frecuencia absoluta en la edad 1, estrato medio. **C.** Distribución de la frecuencia en la edad 1, estrato superior. **D.** Distribución de la frecuencia en la edad 3, estrato inferior. **E.** Distribución de la frecuencia absoluta en la edad 3, estrato medio. **F.** Distribución de la frecuencia en la edad 3, estrato superior. **G.** Distribución de la frecuencia en la edad 4, estrato inferior. **H.** Distribución de la frecuencia absoluta en la edad 4, estrato medio. **I.** Distribución de la frecuencia en la edad 4, estrato superior. **J.** Distribución de la frecuencia en la edad 9, estrato inferior. **K.** Distribución de la frecuencia absoluta en la edad 9, estrato medio. **L.** Distribución de la frecuencia en la edad 9, estrato superior. **M.** Distribución de la frecuencia en la edad 15, estrato inferior. **N.** Distribución de la frecuencia absoluta en la edad 15, estrato 2 medio. **O.** Distribución de la frecuencia en la edad 15, estrato superior.

**Acumulación y distribución de biomasa en arboles de *Pinus tecunumanii* (Schw.) Equilus et Perry.** La densidad de población promedio encontrada en los lotes donde se llevaron a cabo los muestreos se encuentra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Densidad de población promedio para cada edad en plantaciones de *Pinus tecunumanii*

Edad	Promedio Arboles/Parcela	Promedio Arboles/ha
1	24	960
3	22,8	912
4	27,6	1104
9	25,2	1008
15	25,2	1008

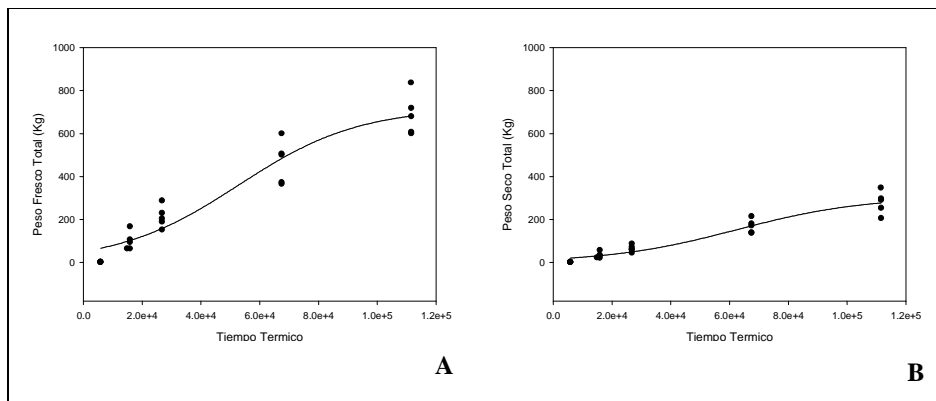
El diámetro normal (DAP) tiene un comportamiento sigmooidal asintótico en función del tiempo térmico (Figura 3A). El mayor valor de DAP corresponde a 21,7 cm, el cual se logra cuando se tienen  $107417,6^{\circ}\text{D}_{\text{acum}}$ . La longitud del tallo para esta especie presenta un comportamiento sigmooidal asintótico en función del tiempo térmico (Figura 3B). El máximo valor de longitud es de 29,4 m y se logra cuando se alcanzan los  $112514^{\circ}\text{D}_{\text{acum}}$ .



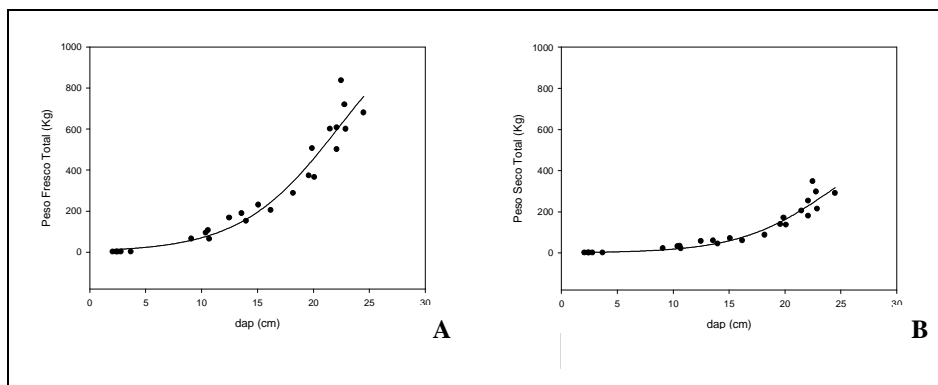
**Figura 3.** Crecimiento de *P. tecunumanii* en función del tiempo térmico. **A.** Incremento del diámetro normal (DAP). **B.** Incremento de la longitud del tallo.

Los modelos obtenidos que permiten la estimación de acumulación de biomasa total del árbol en peso fresco (Figura 4A) y peso seco (Figura 4B), se ajustan a un modelo sigmooidal asintótico. Las ecuaciones alométricas que relacionan la acumulación de biomasa fresca (Figura 5A) y seca (Figura 5B) dependiendo del diámetro normal medido, son adecuadas para la estimación del peso seco y fresco de la planta.

La máxima acumulación de peso seco en toda la planta se logra a los  $111246^{\circ}\text{D}_{\text{acum}}$  con un valor de 305,7 Kg. En el tallo, corresponde a  $241,2 \text{ Kg}$ , que se alcanza a los  $112245^{\circ}\text{D}_{\text{acum}}$  y en la raíz es de 14,1 Kg, valor que se logra cuando se alcanzan los  $112022^{\circ}\text{D}_{\text{acum}}$ . El comportamiento sigmoïdal es el que mejor se ajusta para describir el crecimiento de los componentes de tallo, raíz y corteza en función del tiempo térmico; y el mismo modelo se ajusta para la estimación de biomasa dependiendo del DAP (Tablas 3 y 4).



**Figura 4.** Acumulación de la biomasa en función del tiempo térmico. **A.** Acumulación de la biomasa fresca en función del tiempo térmico. **B.** Acumulación de la biomasa fresca en función del tiempo térmico.



**Figura 5.** Acumulación de biomasa en función del diámetro normal. **A.** Acumulación de biomasa fresca en función del diámetro normal. **B.** Acumulación de biomasa seca en función del diámetro normal.

Los modelos obtenidos para la estimación de biomasa de acículas y ramas en función del tiempo térmico y del diámetro normal presentaron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) por debajo del 40%, por lo tanto, no son confiables para explicar la relación de las variables antes mencionadas, debido a la variabilidad en la cantidad de estos componentes en el momento del muestreo. Dicha variabilidad

puede deberse a labores como podas que hacen que se reduzca la cantidad de estos componentes o la temporada climática que afecta la cantidad y peso de acículas en el árbol.

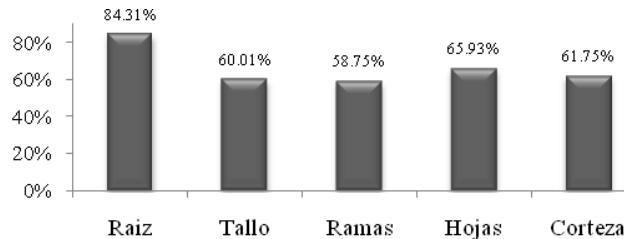
**Tabla 3.** Modelos para estimación de la biomasa fresca y seca (Kg) de los componentes con relación al tiempo térmico en *P. tecunumanii*.

Nº	MODELO	PARAMETROS	R <sup>2</sup>
1	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 528,8364 b= 17567,9435 X <sub>0</sub> = 61786,7948	0,9771
2	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 43,4849 b= 20890,8995 X <sub>0</sub> = 51872,2461	0,9177
3	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 94,9364 b= 17518,5329 X <sub>0</sub> = 40857,6148	0,8732
4	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 241,2093 b= 16699,4240 X <sub>0</sub> = 66990,7682	0,9530
5	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 19,4375 b= 19102,3257 X <sub>0</sub> = 56904,3156	0,8632
6	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 14,1578 b= 21894,9211 X <sub>0</sub> = 48694,2243	0,7764

**Tabla 4.** Modelos para estimación de la biomasa en peso fresco y peso seco (kg) de los componentes con relación al diámetro del árbol en la especie *Pinus tecunumanii*

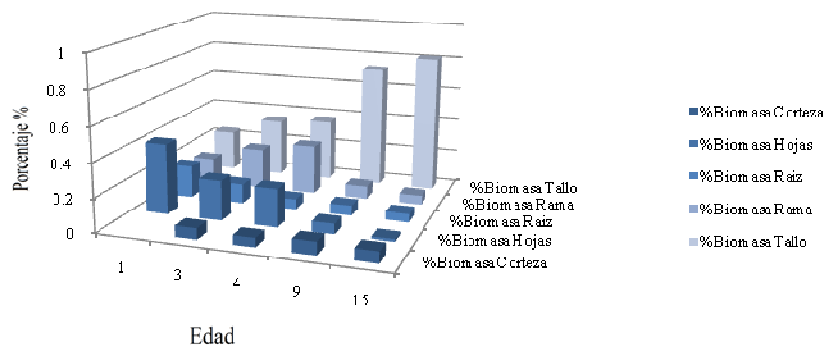
Nº	MODELO	PARAMETROS	R <sup>2</sup>
7	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 719,4567 b= 2,5597 X <sub>0</sub> = 21,1781	0,9446
8	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 66,7141 b= 4,0957 X <sub>0</sub> = 21,4774	0,8792
9	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 131,1848 b= 4,3292 X <sub>0</sub> = 19,1997	0,9088
10	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 295,8323 b= 1,8909 X <sub>0</sub> = 21,0643	0,9347
11	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 37,0367 b= 3,7874 X <sub>0</sub> = 23,2914	0,8336
12	$y = \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-X_0}{b}\right)}}$	a= 26,0270 b= 5,6454 X <sub>0</sub> = 23,397	0,7705

Los contenidos de humedad encontrados para los diferentes componentes del árbol (Figura 6) muestran que las raíces poseen más del 80% de su peso en agua, mientras que el menor porcentaje de humedad se encuentra contenido en las ramas y en el tallo con valores cercanos al 60%.



**Figura 6.** Contenido de humedad (%) en los diferentes componentes del árbol de *Pinus tecunumanii*

Los porcentajes de biomasa en el árbol de *P. tecunumanii* (Figura 7), presentan una distribución uniforme de cada componente con respecto al árbol. El mayor valor en las acículas ocurre en la primera edad con un 41,5% del total de la biomasa, luego disminuye hasta casi el 1%. Las ramas muestran un comportamiento creciente hasta los cuatro años, momento en el que alcanza un 5% de la totalidad del árbol. La disminución en estos valores de acículas y ramas puede deberse a la realización de podas o a una defoliación natural. Con respecto al tallo, en la primera edad, inicia con un 24,3% del total del árbol y mantiene un 30% en las edades de 3 y 4 años, llegando al 70% y 81,5% en las edades mayores. Las raíces, muestran un comportamiento decreciente, donde el valor en la primera edad es de 19,12%, y disminuye al 4% en los 15 años.



**Figura 7.** Distribución del porcentaje de la biomasa en cada componente del árbol para las diferentes edades en plantaciones de *Pinus tecunumanii*

**Acumulación y distribución de carbono en árboles de *P. tecunumanii*.** Los análisis de laboratorio muestran que los contenidos de carbono en porcentaje del peso seco varían según el componente del árbol, sin embargo, el promedio general es del 48,4% del peso seco total. La corteza presenta el mayor

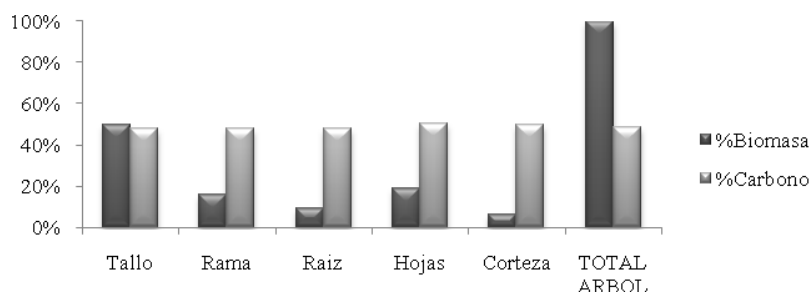
valor de carbono (49,5%), valor que contrasta con lo que representa este componente en el contenido total de biomasa. La biomasa del tallo contiene el 47,9%. Se encontraron diferencias en el contenido de carbono, de acuerdo con la posición, así, se obtuvo el 48, 47,8 y 47,7% en la parte basal, media y superior del tallo, respectivamente. A través del tiempo los porcentajes de carbono para cada componente del árbol se mantienen similares (Tabla 5).

**Tabla 5.** Distribución del porcentaje de carbono para cada componente del árbol a través del tiempo para plantaciones de *Pinus tecunumanii*

Componente	Edad					PROMEDIO
	1	3	4	9	15	
Raíz	47,08% ± 0,29	47,03% ± 0,46	47,77% ± 0,56	48,38% ± 0,78	48,37% ± 0,70	47,73% ± 0,66
Tallo	47,28% ± 0,15	47,78% ± 0,57	47,68% ± 0,35	48,70% ± 0,43	48,40% ± 0,56	47,87% ± 0,65
Ramas	47,6% ± 0,47	47,82% ± 0,74	48,22% ± 0,75	48,64% ± 0,63	49,17% ± 0,79	48,20% ± 0,77
Acículas	47,5% ± 0,51	46,92% ± 0,36	48,26% ± 2,58	49,24% ± 0,66	50,08% ± 1,24	48,40% ± 3,77
Corteza		48,84% ± 0,70	49,63% ± 0,44	50,85% ± 0,67	50,57% ± 0,55	49,48% ± 0,92
PROMEDIO	47,25%	47,57%	48,31%	49,16%	49,31%	

± Desviación Estándar

En la Figura 8 se observa que el mayor porcentaje de biomasa corresponde al tallo (49,7%), seguido de las acículas (18,7%) y las ramas (16,05%). La misma figura muestra también el contenido de carbono en cada componente respecto al total del árbol en términos de porcentaje.



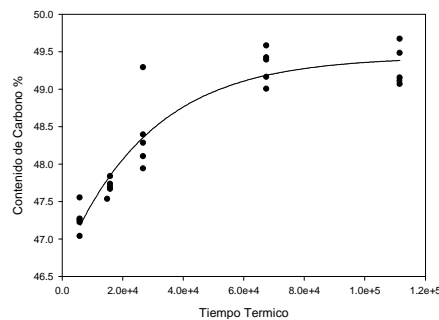
**Figura 8.** Distribución del porcentaje de promedio de carbono por componente del árbol y relación con el porcentaje promedio de biomasa en peso seco para arboles de *Pinus tecunumanii*

Después de convertir los valores de carbono orgánico elemental a valores equivalentes de CO<sub>2</sub>, se obtuvieron los datos acumulados para cada componente y árbol total (Tabla 6). Con el número de árboles por hectárea, se determinó el total de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq capturado por hectárea en cada edad medida, así por ejemplo, para una edad de 9 años se obtienen 302,3 tCO<sub>2</sub>-eq/ha capturado. El modelo

que explica el comportamiento del contenido de carbono es de tipo sigmoïdal asintótico (Figura 9) y corresponde a la ecuación  $y = 49,43/[1 + e^{-(x + 77602,12)/27440,43}]$

**Tabla 6.** Distribución del equivalente de kilogramos de CO<sub>2</sub> capturado por componente y árbol en plantaciones de *Pinus tecunumanii*

Componente	Edad				
	1	3	4	9	15
Raíz	0,09	6,89	6,83	17,22	23,95
Tallo	0,12	19,01	39,68	218,38	400,53
Ramas	0,07	14,69	33,67	22,69	28,62
Acículas	0,20	13,33	30,31	18,60	8,31
Corteza		3,59	6,05	23,03	34,10
TOTAL	0,5	57,5	116,6	299,9	495,5
Kg/CO <sub>2</sub> eq/ha	477,9	52440,8	128678,1	302322,9	499488,0
t/CO <sub>2</sub> eq/ha	0,5	52,4	128,7	302,3	499,5

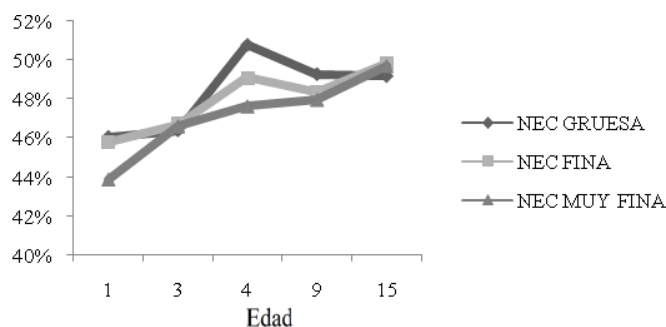


**Figura 9.** Modelo que permite estimar el contenido total de carbono en el árbol en función de la edad de *P. tecunumanii*

Con respecto a la necromasa, la hojarasca muestra los valores más bajos en contenido de carbono que el resto de componentes, aunque estos valores son muy similares en los tres componentes. Este contenido se pierde por la liberación de CO<sub>2</sub> en la descomposición natural de este material (Figura 10; Tabla 7).

La necromasa existente en plantaciones de *P. tecunumanii* constituye un compartimento adicional donde se encuentra acumulado carbono. Teniendo en cuenta las edades evaluadas, la hojarasca y detritos menores a 2,5 cm de diámetro corresponden en promedio a 353,01 tCO<sub>2</sub>-eq/ha, mientras que la necromasa gruesa muestra valores promedio de 20,27 tCO<sub>2</sub>-eq/ha. Se encontró que el total de necromasa gruesa por hectárea al primer año fue de 865,3 kg, y corresponde a material residual de cosechas anteriores. La necromasa fina presento promedio de 0,18 tCO<sub>2</sub>-eq/ha (Tabla 9).





**Figura 10.** Distribución del contenido de carbono (%) a través del tiempo para necromasa en plantaciones de *Pinus tecunumanii*

**Tabla 7.** Comportamiento de la necromasa en plantaciones de *Pinus tecunumanii*

<b>NECROMASA GRUESA</b>					
	<b>Edad</b>				
	1	3	4	9	15
Peso Seco Kg/ha	865,27	532,87	2136,11	558,28	1540,09
% Carbono	46,08 ±	46,43 ±	50,80 ±	49,30 ±	49,20 ±
	0,31	0,55	0,95	0,81	1,48
Kg/C/ha	398,72	247,38	1085,15	275,23	757,73
t/CO <sub>2</sub> -eq/ha	14,62	9,07	39,79	10,09	27,78

<b>NECROMASA FINA</b>					
	<b>Edad</b>				
	1	3	4	9	15
Peso Seco Kg/ha	32,36	5,35	3,33	2,06	7,98
% Carbono	45,82 ±	46,73 ±	49,10 ±	48,35 ±	49,82 ±
	0,25	0,63	2,31	1,27	0,95
Kg/C/ha	14,83	2,50	1,64	0,99	3,97
t/CO <sub>2</sub> -eq/ha	0,54	0,09	0,06	0,04	0,15

<b>NECROMASA MUY FINA</b>					
	<b>Edad</b>				
	1	3	4	9	15
Peso Seco Kg/ha	15596,77	5807,29	13886,07	32673,3	32778,22
% Carbono	43,90 ±	46,62 ±	47,64 ±	47,98 ±	49,70 ±
	2,16	1,69	0,52	0,80	0,95
Kg/C/ha	6846,98	2707,36	6615,32	15676,76	16290,7
t/CO <sub>2</sub> -eq/ha	251,06	99,27	242,56	574,81	597,33

± Desviación Estándar

El CC promedio encontrado en la necromasa muy fina corresponde a un 47,17% aunque esta muestra corresponde a detritos menores de 2,5 cm de diámetro, gran parte de esta resulta ser hojas en

descomposición. Se entiende entonces, que una parte del carbono almacenado en las acículas, es nuevamente liberado de los tejidos después de caer y encontrarse en el suelo.

### CONCLUSIONES

En la especie *P. tecunumanii*, la arquitectura de las ramas es de tipo plagiófila, excepto para la edad 1, que presenta una arquitectura de tipo erectófila. La orientación de las acículas, es de tipo planófila en los estratos inferior y medio. En el estrato superior se presenta una arquitectura de orientación plagiófila.

Los modelos de tipo sigmoideal asintótico explican la variación de la acumulación, distribución de la biomasa y contenido de carbono en función del tiempo térmico. El máximo contenido de carbono se encontró en la corteza seguido por las acículas y las ramas de *P. tecunumanii*.

Los valores de CO<sub>2</sub>eq fueron mayores para la necromasa muy fina u hojarasca, seguidos de la necromasa gruesa y la necromasa fina, en su orden.

### BIBLIOGRAFIA

BLACKMAN, G. BETTERDGE. B. y RAJAS, A. 1978. Interrelations between the nature of the light source ambient air temperature and the vegetative growth of different species within growth cabinets. En: Ann, Botany. London. Volume 35. Pag. 323 a 343.

BROWN, S. 1997. Mitigation potential of carbon dioxide emissions by management of forests. En: Asia Journal. Volume. 25, Number 4. Pag. 277 a 278.

CASTILLO, R. 1995. Interceptación de la radiación solar en cafetales. Bogotá, Colombia. Tesis de Grado (Ingeniería Agronómica). Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Facultad de Agronomía. 142p.

DEFOSEÉ, G. y LOGUERCIO, G. 2004. El aporte de los bosques para la mitigación del cambio climático global y el desarrollo sustentable de comunidades locales. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico CIEFAP. [en línea]. [Argentina]. [Citado Feb., 2009]. Disponible en Internet: URL:

[http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/educacion/actividades/encuentro\\_ctera/comodoro\\_25.PDF](http://www2.medioambiente.gov.ar/documentos/educacion/actividades/encuentro_ctera/comodoro_25.PDF)

DE WIT, C. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Report N° 663. PUDOC, Wageningen. 57p.

EGUREN, L. 2004. El mercado de carbono en América Latina y el Caribe: Balances y perspectivas. [en línea]. [Chile]. [citado Feb., 2010]. CEPAL – División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. Serie 83. 83p. Disponible en Internet: URL: <ftp://ftp.fao.org/docrep/nonfao/LEAD/X6367s/x6367s00.pdf>

HALL, A. Cátedra de Fisiología Vegetal. 2001. Buenos Aires. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 32p.

LASH, J y WELLINGTON, F. 2007. Ventaja competitiva frente al calentamiento global. En: Harvard Business Review. Volumen 85. Numero 3. Pág. 67 – 77.

LOPERA, G. y GUTIÉRREZ, V. 2000. Viabilidad técnica y económica de la utilización de plantaciones de *Pinus patula* como sumideros de CO<sub>2</sub>. Medellín, Colombia, Tesis de Grado (Ingeniería Forestal). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Departamento de Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 146p.

LOVATT, C., STREETER, S., MINTER, T., O'CONNELL, N., FLAHERTY, D., FREEMAN, M., GOODELL, P. 1984. Phenology of flowering in *Citrus sinensis* [L.] Osbeck, cv. Washington Naval orange. Proceedings of the International Society of Citriculture 1, Pag. 186 – 190.

OBANDO, D. 2003. Interceptación de la radiación, acumulación y distribución de biomasa y contenido de carbono en *Gmelina arborea* Roxb y *Pochota quinata* (Jacq) Dugand. Tesis de Grado (Ingeniería Forestal). Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal. 83p.

ORDOÑEZ, A. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado. San Juan Nuevo. Michoacan. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias UNAM, México DF. 89p.

ORDOÑEZ, A. 1999. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México DF.

ORDOÑEZ, J. y MASERA, O. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. En: Madera y Bosques, primavera. Instituto de Ecología AC. Xalapa, México. Volumen 7. N° 001. Pág. 3 a 12.

PERRY, S. G. 1988. Indirect sensing of plant canopy structure with simple radiation measurements. En: Agricultural and Forest Meteorology. Volume 42. Pag. 255 a 278.

RIAÑO, N., TANGARIFE, G., OSORIO, O., GIRALDO, J., OSPINA, C. OBANDO, D., GOMEZ, L., JARAMILLO, L. 2005. Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico. CREFT V1.0. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Federación Nacional de Cafeteros, Centro Nacional de Investigaciones en Café “Pedro Uribe Mejía” CENICAFÉ, Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal CONIF. 51p.

RODRIGUEZ, E. y JIMENEZ, L. 1989. Consideraciones sobre la biomasa, composición química y dinámica del bosque pluvial tropical de colinas bajas, Bajo Calima. En: CONIF Serie documentación. Bogotá. Convenio CONIF. Holanda Buenaventura Colombia. Numero 16. 35p.

RODRIGUEZ, J. y RAMIREZ, M. 2008. Modelación de carbono aéreo y subterráneo de *Tectona grandis* y *Pinus patula* en plantaciones comerciales del neotropico. Medellín, Colombia. Tesis de Grado (Ingeniería Forestal) Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Departamento de Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 66p.

SABOGAL, J. 2007. Generación de pagos por certificados de reducción de emisiones, bajo el mecanismo de desarrollo limpio para cercos vivos en la cuenca alta del Rio Pasto. En: Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión. Volumen XV, numero 1. Universidad Militar Nueva Granada .Pág. 167 – 182.

SCHLEGEL, B., GAYOSO, J. y GUERRA, J. 2000. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Manual de procedimientos, muestreos de biomasa forestal. Valdivia. Universidad Austral de Chile, proyecto FONDEF. 24p.

URREGO, C. 2003. Interceptación de radiación, acumulación y distribución de biomasa y contenido de carbono en *Eucalyptus pellita* F. Muell y *Pinus caribaea*. Morelet Var. Hondurensis (Seneel) Barr et Golf. Tesis de Grado (Ingeniería Agronómica). Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Departamento de Ciencias Agronómicas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 72p.

WILLIAMS, K. 1987. Estimation of tissue construction cost from heat of combustion and organic nitrogen content plant cell and environment. En: Mooney Merino. Volume 10, Number 4. Pag. 725 a 734.