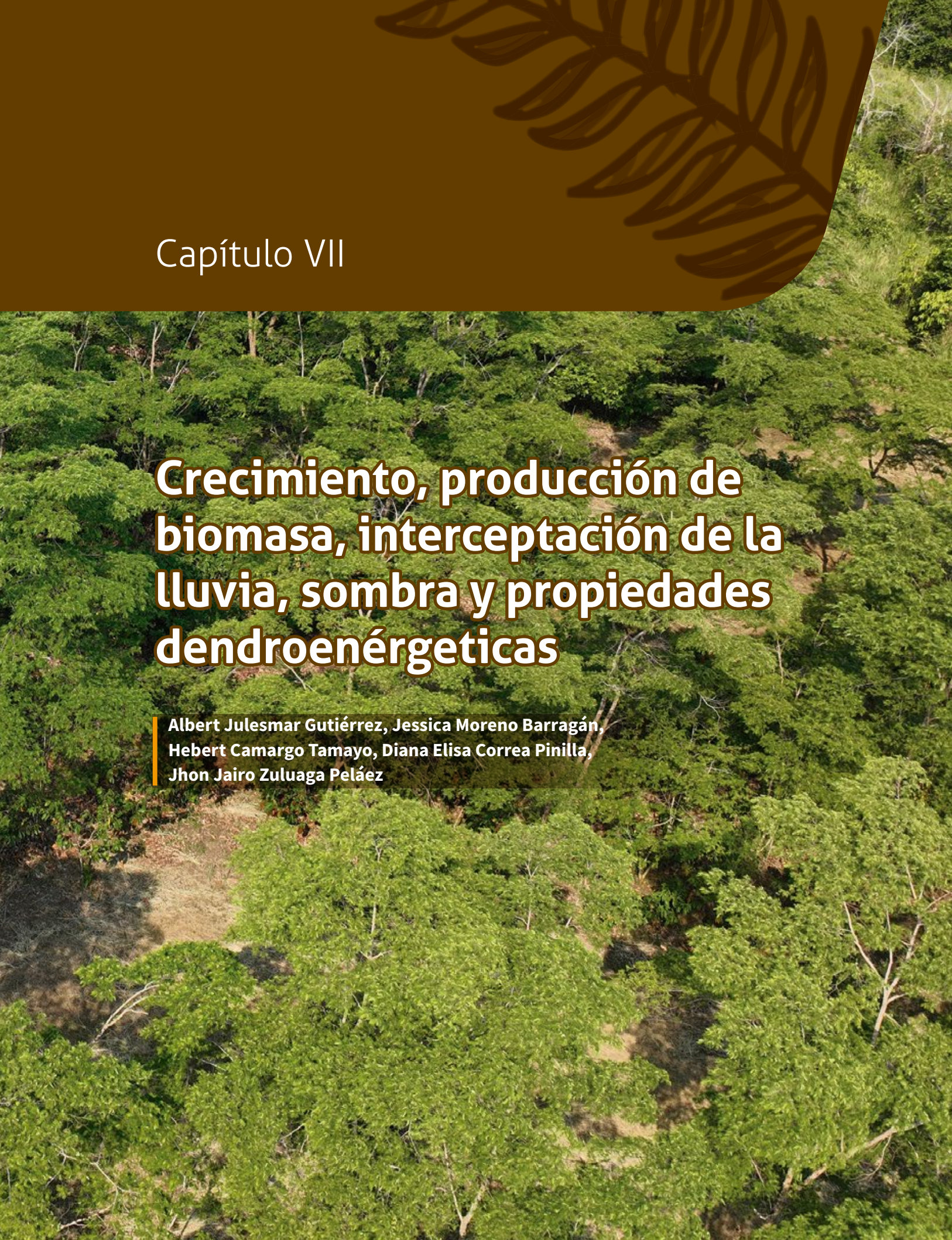
Capítulo VII

Crecimiento, producción de biomasa, interceptación de la lluvia, sombra y propiedades dendroenérgeticas

Albert Julesmar Gutiérrez, Jessica Moreno Barragán, Hebert Camargo Tamayo, Diana Elisa Correa Pinilla, Jhon Jairo Zuluaga Peláez



Este capítulo presenta los avances de investigaciones realizadas por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), en el Centro de Investigación La Libertad, ubicado en el piedemonte de Villavicencio (Meta), para contribuir al conocimiento forestal y ampliar la información disponible para la especie *M. trianae*, en cuanto a los aspectos que se mencionan a continuación.

Modelo de crecimiento

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar variables de difícil medición como la altura del árbol, en función de pocas variables de fácil medición como el diámetro y la edad del árbol.

Teniendo en cuenta las condiciones agroclimáticas de Villavicencio, Meta (Centro de Investigación La Libertad), se desarrolló un modelo alométrico (ecuación 1), a partir de registros de desarrollo en plantación de especímenes de yopo (*M. trianae*) para predecir el crecimiento en altura (H) de la especie en metros con respecto a la edad en meses y el diámetro a la altura del pecho en centímetros (DAP, 1,30 m), en su etapa inicial (72 meses después de establecido en campo), puestos a una distancia de 5,0 x 5,0 m (400 árboles/ha) y en suelos de paisaje de piedemonte en un relieve de terraza alta.

$$\textit{Altura Total (H)} = 0{,}2759046(DAP^2 * \textit{Edad})^{0{,}378} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Después de seguir el crecimiento de esta especie durante seis años, se determinó que presentó un desarrollo de 11,6 m de altura y 17,9 cm de diámetro, y unos incrementos medios anuales (IMA) en altura (H) y en DAP de 1,93 m/año y 2,99 cm/año, respectivamente, con una sobrevivencia del 76,9 %.

Se ha encontrado que esta especie, establecida para la reforestación-protección en suelos de altillanura en el municipio de Puerto Gaitán, Meta (Beltrán Guarnizo, 2011), alcanzó un desarrollo del diámetro de tallo de 16,1 cm y en altura 2,44 m a los 14 meses de establecerse en campo. Mientras que, para este mismo periodo, en suelos de piedemonte del municipio de Villavicencio, Meta, la misma especie alcanzó 8,24 cm de diámetro en el tallo (medido a 10 cm del suelo) y 3,81 m en altura. Esta

diferencia puede estar influenciada por las características particulares de las unidades de suelo donde fueron establecidas.

Biomasa de raíces finas

La biomasa radical es un parámetro que expresa la cantidad de biomasa (gramos de materia seca de raíces) en una unidad de área determinada a la profundidad de muestreo (g m^{-2}), por lo que se puede tomar como parámetro para estimar la fijación de carbono por la especie en el ecosistema (Morales Ríos, 1997; Arnáez-Serrano & Moreira-González, 2006). Se realizaron muestreos de raíces en dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm) y en dos posiciones con respecto a la copa, que fueron al 50 % (posición media copa) y al 100 % (posición perímetro de copa). La mayor cantidad de biomasa radicular de raíces finas (< 5 mm) de la especie se encontró en los primeros 15 cm de profundidad, con 0,28 y 0,19 g para las dos posiciones; sin embargo, se observa mayor cantidad de biomasa en media copa. Igualmente, se observó que la biomasa de raíces disminuye con la profundidad (tabla 4).

Tabla 4. Valores promedio de biomasa de raíces finas de yopo (*M. trianae*), a los 72 meses de edad, en el Centro de Investigación La Libertad

Biomasa (g)		
Profundidad (cm)	**Posición**	
	Media copa	**Perímetro de copa**
0-15	0,287	0,193
15-30	0,090	0,050

Fuente: Elaboración propia

Densidad lineal de raíces finas

La densidad lineal de raíces (DLR) finas (<5,0 mm de diámetro) es una variable que emplea el valor en longitud de las raíces analizadas, y las expresa en una unidad de área específica; además, relaciona los centímetros de raíces encontradas en una determinada área de suelo, lo cual se expresa como (cm cm^{-2}); esto se relaciona con la competencia por espacio, aireación del suelo y la conducción de agua y nutrientes después de la muerte de estas pequeñas estructuras (Morales Ríos, 1997;

Arnáez-Serrano & Moreira-González, 2006). A los 72 meses de edad de la especie *M. trianae* existe más DLR finas (< 5 mm) en la posición media copa en el rango de 0-15 cm de profundidad, y la densidad disminuye en un 60 % a medida que aumenta la profundidad, y para la posición de perímetro de copa disminuye un 17 %. Como se observa en la tabla 5, no se encontró diferencia entre las posiciones en la primera profundidad 0-15 cm, mientras que en el rango de 15 a 30 cm de profundidad sí existen diferencias.

Tabla 5. Valores promedio de densidad de raíces finas de yopo (*M. trianae*), a los 72 meses de edad, en el Centro de Investigación La Libertad

Densidad longitudinal de raíces (cm/cm²)		
Profundidad (cm)	**Posición**	
	Media copa	**Perímetro de copa**
0-15	0,45	0,43
15-30	0,18	0,35

Fuente: Elaboración propia

Longitud y longitud especifica de raíces finas

La longitud (L) del sistema radical de la planta es muy importante, dado que de esta depende la adquisición de agua y de nutrientes. En general, la longitud de la raíz por unidad de biomasa o longitud específica de raíces (LER) relaciona los centímetros de raíces por unidad de biomasa seca y se expresa como (cm mg^{-1}); además, varía mucho en las especies leñosas, ya que está directamente relacionada con la productividad primaria, la acumulación de carbono en suelo, la fertilidad de suelos, entre otras (Herrera-Gorocica, 2014). La L promedio de raíces para yopo (*M. trianae*) es mayor en la posición de media copa para la primera profundidad de 0-15 cm, con un valor de 215,02 cm, y disminuye a 90,36 cm a medida que aumenta la profundidad. En el caso de la LER, la disminución es solo del 12 %; LER y es mayor en la profundidad de 15-30 cm, en ambas posiciones (tabla 6).

Tabla 6. Valores promedio de longitud y longitud específica de raíces finas de yopo (*M. trianae)*, a los 72 meses de edad, en el Centro de Investigación La libertad

Profundidad (cm)	Longitud de raíces (cm)		Longitud específica raíces (cm/mg)	
	Posición			
	Media copa	Perímetro de copa	Media copa	Perímetro de copa
0-15	215,02	204,54	1,02	1,18
15-30	90,36	178,09	2,75	4,69

Fuente: Elaboración propia

Biomasa aérea y contenido de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg y C)

Para poder cuantificar los contenidos de elementos mayores y de carbono (C) en la biomasa área de la especie *M. trianae*, se deben realizar las siguientes actividades: 1) selección y corte del árbol; 2) desrame y trozado con la ayuda de una motosierra; 3) separación del árbol en los siguientes componentes: fuste o tallo mayor de 5 cm de diámetro con corteza, ramas entre 1 y 5 cm de diámetro, ramas menores de 1 cm, hojas, ramas mayores de 5 cm de diámetro con corteza, frutos, flores y corteza; 4) pesaje en verde de cada uno de estos componentes en campo; 5) toma de submuestras para peso en verde y seco, y 6) envío a laboratorio de cada uno de los componentes, para determinar elementos mayores y carbono (figura 41). La cantidad de nutrientes asociada a cada componente de la parte aérea del árbol depende, entre otros factores, de la edad, las características climáticas y edáficas, y de las labores culturales con las que se desarrolla la especie (Alvarado & Raigosa, 2007).

Fotos: Jessica Moreno Barragan y Diana Catalina Cervera

Figura 41. Muestreo destructivo para determinar nutrientes y carbono. a. Apeo o tala del árbol; b. Pesaje de ramillas verdes en campo; c. Separación de ramas, ramillas y hojas para peso verde en campo; d. Secado en horno de muestras de cada componente.

En la tabla 7, se presentan las concentraciones de los principales nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg) para cada componente de la especie yopo (*M. trianae*), a los 68 meses de edad de establecido en un suelo de terraza alta del piedemonte localizada en Villavicencio, Meta (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2004). La mayor cantidad de biomasa

seca del árbol se presentó en el fuste o tallo, con el 50,47 % (73,18 kg) del total de la biomasa del árbol, lo que representa 36,83 kg de carbono (C); seguido por las ramas mayores de 1 cm de diámetro, con el 41,12 % del total de la biomasa; la menor biomasa seca la presentaron las hojas y ramas con menos de 1 cm de diámetro, con el 8,41 %. En términos generales, el peso seco total promedio de tres arboles de *M. trianae* fue de 145,29 kg y 71,38 kg de carbono (C), que corresponde al 49,13% de la biomasa. Las mayores concentraciones de N, Ca, Mg, y K se presentaron en el fuste y de P, en las hojas.

Tabla 7. Contenido promedio de biomasa y nutrientes de la especie yopo (*M. trianae*), a los 68 meses de edad, en el Centro de Investigación La libertad

Componente	% del árbol	Peso seco (kg)	N	P	Ca	Mg	K	C
			(g)					(kg)
Ramas 1-5cm*	19,68	28,69	200,82 b	2,87 b	37,30 b	11,47 abc	68,85 b	13,81 b
Hojas	4,21	6,01	191,04 b	9,61 a	16,82 b	12,01 ab	45,66 b	3,16 b
Ramillas <1cm*	4,20	5,71	67,93 c	2,28 b	21,69 b	7,42 bc	25,12 b	2,74 b
Ramas >5cm*	21,44	31,70	133,14 bc	3,17 b	25,36 b	6,34 c	47,55 b	15,65 b
Fuste	50,47	73,18	343,96 a	7,32 a	73,18 a	14,64 a	190,27 a	36,83 a
Total	100,00	145,29	936.89	25,25	174,35	51,89	377,45	71,38

Nota: El promedio con igual letra por variable no presenta diferencias estadísticas significativas (p>0.05). Donde: * diámetro de ramas y ramillas, nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y carbono (C).

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la tasa de fijación anual de carbono (C) en la parte área de árboles yopo (*M. trianae*) a los 68 meses de establecido, a una distancia de 5 x 5 m (400 árboles por hectárea), es de 28,55 t de C/ha/año (71,38 kg de C/árbol x 400 árboles/ha), que corresponden a 104,8 t de CO_2e/ha de dióxido de carbono equivalente (28,55 t de C/ha/año x 3,67 factor de conversión de C a CO_2e). Otras especies nativas de la Orinoquia presentan un potencial para la captura de carbono (C), como es el caso de simaruba (*S. amara*) con 26,65 t de C/ha/año, establecido a 4 x 4 m (625 árboles/ha) que equivalen a 97,8 t CO2e/ha y el cañofistol (*C. moschata*), establecido a 5 x 5 m (400 árboles/ha), con 16,82 t de C /ha/año y 61,7 tCO2e/ha. Estas especies fueron establecidas en las mismas condiciones, en suelos de piedemonte en Villavicencio, Meta (Gutiérrez Vanegas et al., 2020).

Índice de eficiencia del uso de nutrientes de yopo (*M. trianae*)

El índice de eficiencia del uso de nutrientes (EUN) es la capacidad de un árbol para producir biomasa con escasos nutrimentos; además, indica cómo un determinado elemento puede facilitar la productividad (Alvarado & Raigosa, 2007); la EUN, relaciona la biomasa seca con el contenido del nutriente en dicha biomasa y está dada en kilogramos de biomasa por cada gramo de nutriente; con un mayor valor de EUN, la especie es mucho más eficiente en la utilización del nutriente y por tanto se generará menor exportación del nutriente por cantidad de biomasa seca producida.

En la tabla 8, se presentan los valores medios de biomasa seca y el índice de eficiencia en el uso de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg y C) para cada componente de la especie del yopo (*M. trianae*), a los 68 meses de edad y con una producción de materia seca de 145,29 kg. Esta especie presenta un índice de eficiencia para P de 33,13 (lo que significa que por cada gramo de fósforo que absorba la planta se producen 33,13 kilogramos de biomasa seca), seguido de Mg, C y Ca con 13,77, 10,12 y 3,64, y con valores menores el K y N, con 1,83 y 0,71, respectivamente.

En general, para la biomasa total de árboles de yopo (*M. trianae*), la EUN decrece en el siguiente orden: P> Mg> Ca > K> N (tabla 8).

Tabla 8. Biomasa seca y eficiencia del uso de nutrientes de cada componente de la especie yopo (*M. trianae*), a los 68 meses de edad, en el Centro de Investigación La libertad

Componente	Peso seco (kg)	Índice de eficiencia del uso de nutrientes					
		N	P	Ca	Mg	K	C
		kilogramo de biomasa/gramo de nutriente					kg/kg
Ramas 1-5 cm*	28,69	0,14 c	10,00 a	0,77 c	2,50 b	0,42 b	2,08 b
Hojas	6,01	0,03 e	0,63 c	0,36 d	0,50 d	0,13 e	1,90 d
Ramillas <1cm*	5,71	0,08 d	2,50 b	0,26 e	0,77 c	0,23 d	2,09 a
Ramas >5 cm*	31,70	0,24 a	10,00 a	1,25 a	5,00 a	0,67 a	2,03 c
Fuste	73,18	0,21 b	10,00 a	1,00 b	5,00 a	0,38 c	2,03 c
Total	145,29	0,71	33,13	3,64	13,77	1,83	10,12

Nota: El promedio con igual letra por variable no presenta diferencias estadísticas significativas (p>0.05). Donde: * diámetro de ramas y ramillas, nitrógeno (N), fosforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y carbono (C).

Fuente: Elaboración propia

Costo nutritivo

El costo nutritivo (CN) representa la cantidad de nutrimentos almacenados en cada uno de los componentes del árbol y está directamente relacionado con la habilidad para el ciclaje de nutrientes (Alvarado & Raigosa, 2007). El menor costo nutritivo se evidenció en el fósforo en las ramas >5 cm y en el fuste con 0,10 g de nutriente/kg de biomasa; esto significa que por cada kilogramo de biomasa (ramas >5cm y fuste) que salga del sistema para leña se estarían exportando 0,10 g de fósforo para ambos componentes. El mayor costo nutritivo sería para el nitrógeno. El resto de componentes que no salgan del sistema contribuirán al ciclaje de nutrientes.

En general, para la biomasa total de árboles de yopo (*M. trianae*), el mayor CN se presenta en el siguiente orden: N>K>Ca>Mg>P (tabla 9).

Tabla 9. Biomasa seca y costos nutritivos de cada componente de la especie yopo (*M. trianae*), a los 68 meses de edad, en el Centro de Investigación La libertad

Componente*	Peso seco (kg)	Costo nutritivo					
		N	P	Ca	Mg	K	C
		Gramo de nutriente / kilogramo de biomasa seca					kg/kg
Ramas 1-5 cm*	28,69	7,00 c	0,10 c	1,30 c	0,40 c	2,40 d	0,48 c
Hojas	6,01	31,80 a	1,60 a	2,80 b	2,00 a	7,60 a	0,53 a
Ramillas <1 cm*	5,71	11,90 b	0,40 b	3,80 a	1,30 b	4,40 b	0,48 c
Ramas >5 cm*	31,70	4,20 e	0,10 c	0,80 e	0,20 d	1,50 e	0,49 b
Fuste	73,18	4,70 d	0,10 c	1,00 d	0,20 d	2,60 c	0,49 b
Total	145,29	59,60	2,30	9,70	4,10	18,50	2,47

Nota: El promedio con igual letra por variable no presenta diferencias estadísticas significativas (p>0,05). Donde: *diámetro de ramas y ramillas, nitrógeno (N), fosforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y carbono (C).

Fuente: Elaboración propia

Determinación de opacidad del dosel

Conocer el nivel de opacidad (luz que atraviesa el dosel) con el que aporta una especie forestal puede ser determinante y decisivo en la planificación forestal y agroforestal. Los requerimientos de la especie que se va a impactar en un sistema agroforestal o en un asocio determinan el tipo de sombrío por elegir. La elección del componente arbóreo depende en gran medida del porcentaje de luz que pasa a través de la copa, bien sea para el desarrollo de una especie transitoria o para el aporte en el confort térmico de especies ganaderas.

Así, se pudo observar en una plantación establecida con árboles de yopo (*M. trianae*), con una edad de 72 meses, que estos presentaban una altura promedio de 11,6 ± 0,38 m y un diámetro a la altura del pecho (DAP) de 17,9 ±0,95 cm; su índice de área foliar efectivo estaba entre 0,38 y 0,99, y su porosidad se encontraba entre el 45 % y el 73 %. Por lo tanto, la sombra promedio era aproximadamente del 50 % (figura 42).

Figura 42. Fotografía esférica con lente de 180° de la porosidad de las copas de la especie *M. trianae.*

Determinación de la interceptación y la transferencia de agua al suelo

Esta investigación buscó evaluar algunos factores hidrológicos con los cuales esta especie forestal nativa contribuye a la transferencia de agua precipitada al suelo; por ejemplo, la precipitación abierta (PA), la interceptación (Int.), la precipitación interna (PI), el escurrimiento por el tronco (Et) y la precipitación efectiva (Pe), con el fin de determinar la eficiencia del uso del agua y su importancia en el manejo forestal para aportar a la sostenibilidad hidrológica (figura 43).

Fotos: Jessica Moreno Baaragán

Figura 43. Ensayo de interceptación de agua. a. Escurrimiento por el tronco (Et) y precipitación interna (PI); b. Panorámica con pluviómetros lineales para cuantificar la PI en una plantación de *M. trianae.*

Durante el periodo entre marzo y septiembre de 2019, la precipitación registrada fue de 1.956 mm; mayo y junio fueron los meses más lluviosos y los menos lluviosos, marzo y septiembre. Como se puede observar en la tabla 10, para las condiciones de plantación en las que fue establecido el yopo (*M. trianae*), a una distancia de siembra de 5x5 m, fue transferido al suelo mediante una precipitación efectiva (Pe) de 1.857,7 mm, lo que corresponde al 95,5 % de la precipitación total y tan solo fueron interceptados (Int) 98,2 mm (5%).

La PI alcanzó un volumen total de 1.837,4 mm, que representan el 93 % de la PA, y el flujo de agua lluvia por el tronco (Et) de *M. trianae* fue de 20,3 mm, correspondiente al 1 % de precipitación total (tabla 10). Este comportamiento se debe al índice de aérea foliar de la especie que se encuentra entre 0,38-0,99; por lo tanto, es una especie que no intercepta mucha agua y la cual podría ser una buena opción de asocio en sistemas agroforestales para cultivos transitorios.

Tabla 10. Interceptación y transferencia de agua lluvia al suelo por la especie yopo (*M. trianae*), a los 72 meses de edad, en el Centro de Investigación La libertad

Mes/año	PA		PI		Et		Pe		Int.	
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
Mar./19	109,9	100	93,4	84,9	0,7	0,6	94,1	85,6	15,9	14,4
Abr./19	297,2	100	280,8	94,5	5,2	1,8	286,0	96,2	11,2	3,8
May./19	366,5	100	359,0	97,9	4,1	1,1	363,1	99,1	3,4	0,9
Jun./19	366,4	100	359,9	98,2	4,1	1,1	364,0	99,4	2,3	0,6
Jul./19	341,5	101	308,0	90,2	2,6	0,8	310,6	91,0	30,9	9,0
Ago./19	322,6	102	299,3	92,8	2,2	0,7	301,5	93,4	21,1	6,6
Sep./19	151,9	103	137,1	90,3	1,4	0,9	138,5	91,2	13,4	8,8
Total	1.956,0	100	1.837,4	93,9	20,3	1,0	1.857,7	95,0	98,2	5,0

Nota: PA = precipitación en abierto, PI = precipitación interna, Et = flujo por el tronco, Int. = intercepción, Pe = precipitación efectiva.
Fuente: Elaboración propia

Propiedades dendroenergéticas

La dendroenergía (energía forestal) se deriva directa o indirectamente de la biomasa leñosa e incluye energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos primarios o secundarios que provienen de bosques, terrenos forestales, árboles, arbustos y herbáceas en general. La dendroenergía representa la energía producida después de la combustión de los dendrocombustibles, como la leña, el carbón, los pallets, las briquetas, etcétera, y corresponde al poder calorífico neto del combustible (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020; Guyat et al., 2004).

Algunas de las características deseables de las especies para ser consideradas dendroenergéticas son: que presenten rápido crecimiento, alta capacidad de rebrote, adaptabilidad a diversas condiciones de sitio, resistencia a las plagas y enfermedades, bajos contenidos de humedad, generación de bajo porcentaje de cenizas, alta densidad aparente y alto poder calórico (FAO, 2020; Guevara Bonilla, 2017).

El poder calorífico o calórico de un cuerpo es la cantidad de calor generada por la combustión de una unidad de peso de este cuerpo. Este poder calorífico se expresa en calorías por gramo o en kilocalorías por kilogramo (kcal/kg) (Carmona Atencio et al., 1999; Hinostroza, 1994). Las especies con mayor contenido de lignina y alta densidad tienen un poder calórico más alto que las maderas de las especies con mayor contenido de celulosa. Igualmente, a medida que se incrementa la edad del árbol, el poder calorífico aumenta (Hinostroza, 1994).

El yopo (*M. trianae*) es una especie forestal dendroenergética, porque presenta una alta densidad aparente con un valor medio de 0,77 g/cm^3 (Acero Duarte, 2005) y un poder calorífico de 17.230 kj*kg^3, además de los contenidos de cenizas (0,71 %), carbono (48,9 %), oxígeno (43,3 %) entre otras (tabla 11). Esto, sumado a las propiedades de combustibilidad —como velocidad de carbonización, pérdida porcentual de peso y tiempo de extinción de la llama—, hace que la especie yopo (*M. trianae*) tenga un alto potencial para su uso a gran escala en la fabricación de productos con fines energéticos, como pellets y briquetas. Asimismo, el yopo, por su capacidad de encender recién cortado, tiene ventajas comparativas en tiempo de aprovechamiento y transformación que otras especies sí necesitan (Agudelo Castaño & Almanza Jaramillo, 2010).

Tabla 11. Caracterización fisicoquímica de carbonizados de la especie yopo (*M. trianae*)

Propiedad	Contenidos (%)
Humedad	6,19
Sólidos volátiles	47,72
Carbono fijo	45,38
Cenizas	0,71
Carbono (C)	48,96
Oxígeno (O)	43,37
Hidrógeno (H)	5,38
Calcio (Ca)	0,0559
Potasio (K)	0,0422
Aluminio (Al)	0,0042
Magnesio (Mg)	0,0243
Hierro (Fe)	0,0083

Fuente: Elaboración propia, a partir de Agudelo Castaño y Almanza Jaramillo (2010)